

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РАННЕГО ЗАРОЖДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ОБРАЗЦАХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ТЕПЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2020 г. Л.Н. Степанова^{1,2,*}, В.В. Чернова^{1,2}, И.С. Рамазанов¹

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

²Сибирский государственный университет путей сообщения,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191

*E-mail: aergroup@ngs.ru

Поступила в редакцию 17.08.2020; после доработки 20.08.2020

Принята к публикации 20.08.2020

Проведены статические испытания образцов из углепластиков *Torayca T700, T800*, состоящих из девяти монослоев с укладкой $[\pm 45/90/0_3/90/\pm 45]$, с геометрическими размерами $600 \times 100 \times 0,9$ мм и $500 \times 100 \times 1,4$ мм. В процессе статического и теплового нагружения осуществлен контроль дефектов акустико-эмиссионным (АЭ) методом. Два образца статически нагружались и одновременно подвергались воздействию температуры $T = 100$ °С. Шесть образцов нагружались статически при температуре $T = 20$ °С. В режиме реального времени были локализованы источники сигналов АЭ, которые соответствовали разрушению материала образцов. Для них из зон локации образцов изготавливались шлифы и проводилась фрактография материала углепластика. Выполнен анализ зарегистрированной АЭ-информации. Рассмотрены основные информативные параметры сигналов АЭ, локализованных в рабочей зоне образцов.

С использованием кластерного анализа по цифровой форме для сигналов АЭ определены три типа кластеров. Для первого типа кластеров частота сигналов АЭ превышала 175 кГц и отмечался сравнительно большой уровень энергетического параметра *MARSE*. В кластерах второго типа наблюдались сигналы АЭ, регистрируемые при статическом нагружении и нагреве образца и обладающие меньшими значениями *MARSE* и медианной частотой, не превышающей 170 кГц. При испытании образцов без нагрева медианная частота не превышала 140 кГц. Третий тип кластеров был сформирован из сигналов АЭ, частота которых превышала 400 кГц. Подобные кластеры были характерны только для образцов, испытанных при температуре $T = 20$ °С.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, углепластик, кластерный анализ, дефект, локация, энергия, обработка сигналов.

DOI: 10.31857/S0130308220100024

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы (КМ) широко используются во многих отраслях промышленности. Их применение при производстве ответственных конструкций авиационно-космической техники потребовало исследования физико-механических и прочностных свойств композитов, а также особенностей их разрушения под действием различных нагрузок и при влиянии внешних факторов окружающей среды [1—4].

Одновременное воздействие механических и тепловых нагрузок приводит к ухудшению прочностных характеристик композитов, в том числе и углепластиков, что может приводить к разрушению конструкции [5—7]. Данные недостатки КМ обусловлены малым запасом пластичности, неоднородностью структуры и высокой чувствительностью к механическим повреждениям, а также отсутствием перераспределения нагрузок, как у металлов.

При эксплуатации объектов из углепластиков, подвергаемых не только механическим, но и тепловым нагрузкам, возникает опасность их внезапного разрушения. Этому предшествуют накопления повреждений на уровне структуры материала, которые могут быть вызваны как технологическими причинами (низкая степень отверждения полимерной матрицы, разрыв упрочняющих волокон), так и различными внешними воздействиями (температурой, расслоениями, возникающими вследствие ударов и перегрузок) [8]. Поэтому исследованию процесса изменения структуры углепластика под действием растягивающей статической нагрузки и теплового нагружения являются актуальными.

При проведении испытаний важным является применение методов неразрушающего контроля (НК), определяющих координаты и степень опасности дефектов в режиме реального времени. Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из перспективных методов НК, позволяющих решать эти задачи. Он используется как в нашей стране, так и за рубежом [8—15]. Методом АЭ совместно с фрактографией можно отслеживать в режиме постобработки информацию о раннем зарождении и развитии опасных дефектов (растрескивание матрицы, отрыв волокна, расслоение,

разрыв волокон) и связывать их с основными информативными параметрами сигналов АЭ (амплитуда, энергетический параметр *MARSE*, доминантная частота и т.д.).

Цель работы — определение основных информативных параметров сигналов АЭ в процессе зарождения различных дефектов при одновременном статическом и тепловом воздействии на образцы из углепластика.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Достоверность обнаружения дефектов в композиционных конструкциях при АЭ-контроле зависит от применяемых методик обработки АЭ-информации [9—18]. При этом необходимо получать сведения обо всех обнаруженных источниках сигналов АЭ в режиме реального времени. Для решения этих задач используются различные методы кластерного анализа, позволяющие группировать сигналы АЭ [19].

Для поиска и классификации зарождающихся дефектов на ранних стадиях процесса разрушения композита была выполнена кластеризация по цифровой форме сигналов АЭ [19], зарегистрированных на начальных этапах нагружения. Каждый выделенный кластер состоял из нескольких десятков сигналов АЭ, полученных в различные моменты времени. Кластеризация позволила следить за развитием каждого обнаруженного дефекта.

Известно, что армирующие элементы и матрица КМ обладают различными характеристиками и изменение их свойств отличается от аналогичных изменений однородных материалов. Для анализа связи параметров сигналов АЭ с особенностями разрушения углепластика при различных статических нагрузках и температурах рассмотрена зависимость их основных информативных параметров (доминантная частота, энергетический параметр *MARSE*) от нагрузки.

Проведены статические испытания образцов из углепластиков *Torayca T700*, *T800*.

Статическое нагружение пяти образцов осуществлялось электрогидравлической машиной *MTS-100* ступенчатой нагрузкой через интервал $\Delta P = 10$ кН при температуре $T = 20^\circ \text{C}$. Три образца нагружались при температуре $T = 100^\circ \text{C}$.

В процессе испытаний информация регистрировалась микропроцессорной диагностической АЭ-системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции (свидетельство RU.C.27.007A № 40707), работающей с преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) с полосой пропускания (100—700) кГц.

Для образцов, статически нагружаемых при температуре $T = 20^\circ \text{C}$, регистрировались зоны локации сигналов АЭ, после чего образцы разгружались и выполнялись шлифы из материала, где осуществлялась их локация. Затем проводился фрактографический анализ на шлифах, изготовленных из материала образцов [15]. Сигналы АЭ, локализованные в области расположения захватов нагружающей машины, перед кластеризацией были отфильтрованы.

Три образца из углепластика *Torayca T700* с геометрическими размерами $500 \times 100 \times 1,4$ мм, укладкой монослоев $[\pm 45/90/0_3/90/\pm 45]$ и концентратором напряжения в виде центрального отверстия диаметром 14 мм и два образца из углепластика *Torayca T800* с размерами $600 \times 100 \times 0,9$ мм с отверстием диаметром 12 мм и с той же укладкой монослоев статически нагружались при температуре $T = 20^\circ \text{C}$. Три образца из углепластика *Torayca T800* одновременно со статическим нагружением подвергались дополнительному воздействию температуры $T = 100^\circ \text{C}$. Нагревающее устройство находилось в центре образца в районе концентратора напряжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены статические испытания трех образцов из углепластика *Torayca T700*. Статическое нагружение образцов осуществлялось электрогидравлической машиной *MTS-100* при температуре $T = 20^\circ \text{C}$. Первый и второй образцы нагружались до нагрузки $P_1 = 18$ кН, третий образец — до нагрузки $P_2 = 32$ кН. Получена локация сигналов АЭ в центральной области образца, где располагался концентратор напряжения (рис. 1а). Проведенная фрактография показала, что при нагрузке $P = 18$ кН в первом и втором образцах наблюдалось выкрашивание матрицы, но при этом волокна оставались целыми (рис. 1б, в).

Анализ результатов обработки информации показал, что сигналы АЭ, зарегистрированные при нагружении первого и второго образцов, обладали частотой более 200 кГц, а энергетический параметр *MARSE* с увеличением нагрузки от 8 до 18 кН возрастал от 19 до 33 мВ·мкс (рис. 2а, табл. 1).

При анализе сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении второго образца, также были выявлены кластеры, которым соответствовали частоты $f = (200—250)$ кГц.

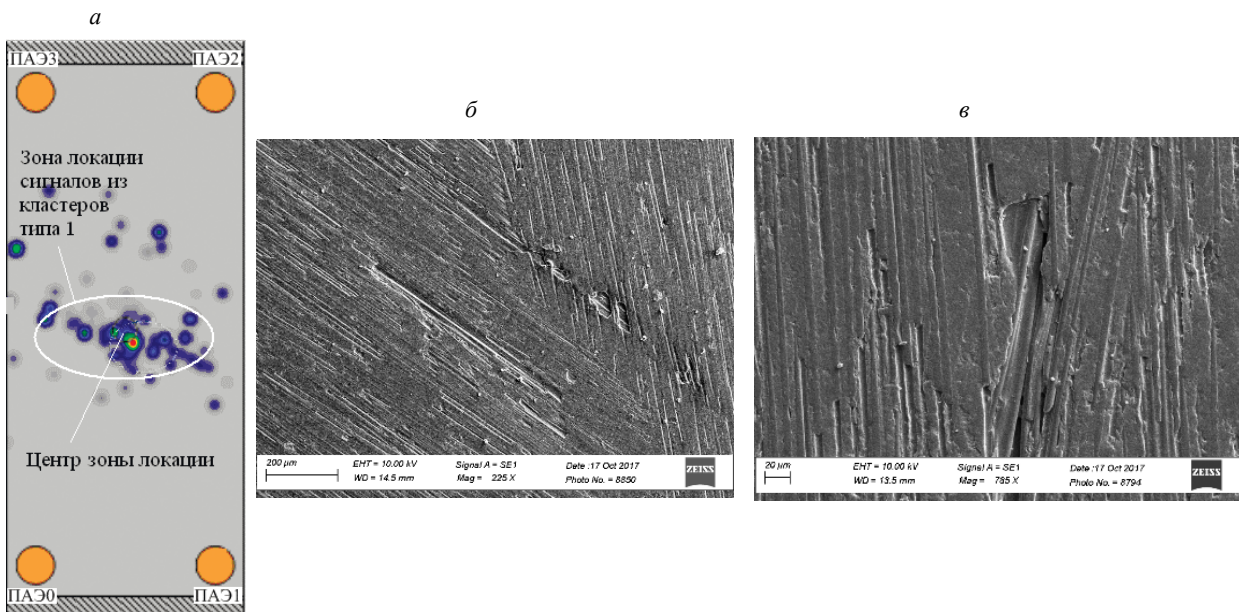


Рис. 1. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении первого образца (а); результаты фрактографии первого (б) и второго (в) образцов.

Таблица 1

Параметры кластеров, полученных при испытании первого образца

Номер кластера	Количество сигналов в кластере	Нагрузка, кН	MARSE, мВ·мкс	Частота, кГц	Тип кластера
1	1009	10	19,86	244	1
2	975	8	19,49	228	1
3	546	14	24,895	240	1
4	396	16	19,195	228	1
5	233	18	33,08	238	1
6	232	12	14,625	240	1
7	157	18	21,115	224	1
8	82	14	20	231	1
9	75	16	21,74	208	1
10	74	14	19,045	212	1

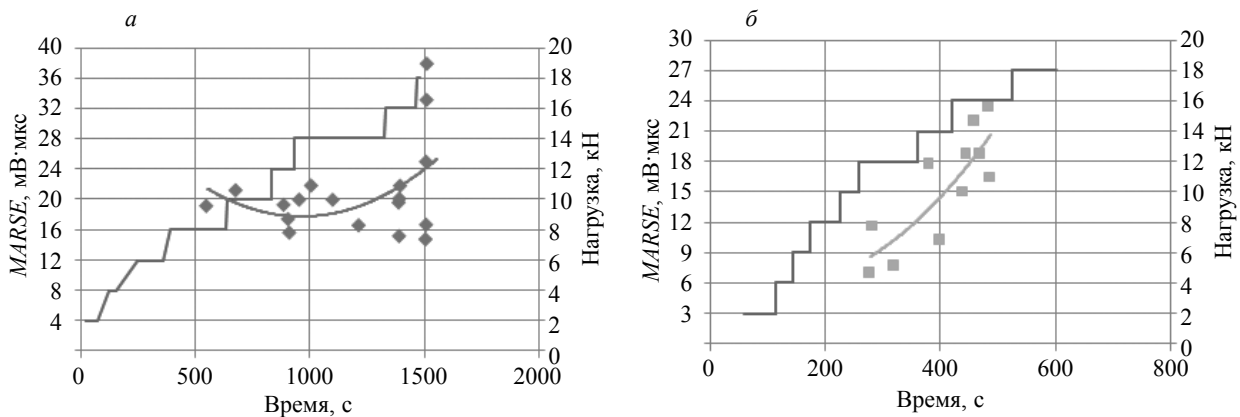


Рис. 2. Зависимость MARSE и нагрузки от времени при нагружении первого (а) и второго (б) образцов.

Таблица 2

Параметры кластеров, полученных при испытании второго образца

Номер кластера	Количество сигналов в кластере	Нагрузка, кН	MARSE, мВ·мкс	Частота, кГц	Тип кластера
1	669	14	17,75	236	1
2	513	16	18,68	224	1
3	249	16	15,12	205	1
4	115	16	22	207	1
5	39	12	6,98	173	1
6	27	16	18,67	210	1
7	23	16	16,53	224	1
8	17	12	11,68	240	1
9	13	14	10,24	259	1
10	13	16	23,4	224	1
11	10	12	7,64	228	1

При нагружении первого и второго образцов повышение нагрузки приводило к возникновению расслоения углепластика в зоне концентрации напряжений, что соответствовало первому типу кластеров (табл. 1, 2).

При нагружении третьего образца при температуре $T = 20$ °С до нагрузки 32 кН наиболее активные источники сигналов АЭ локализовались в области концентратора напряжений и в месте установки датчиков ПАЭ1 — ПАЭ3 (рис. 3а). Для проведения фрактографии были изготовлены шлифы из рабочей зоны третьего образца, где выполнялась локация сигналов АЭ [15]. На шлифах, изготовленных из рабочей зоны третьего образца, наблюдался разрыв волокон, расслоения волокон монослоя, выкрашивание фрагментов материала (рис. 3б).

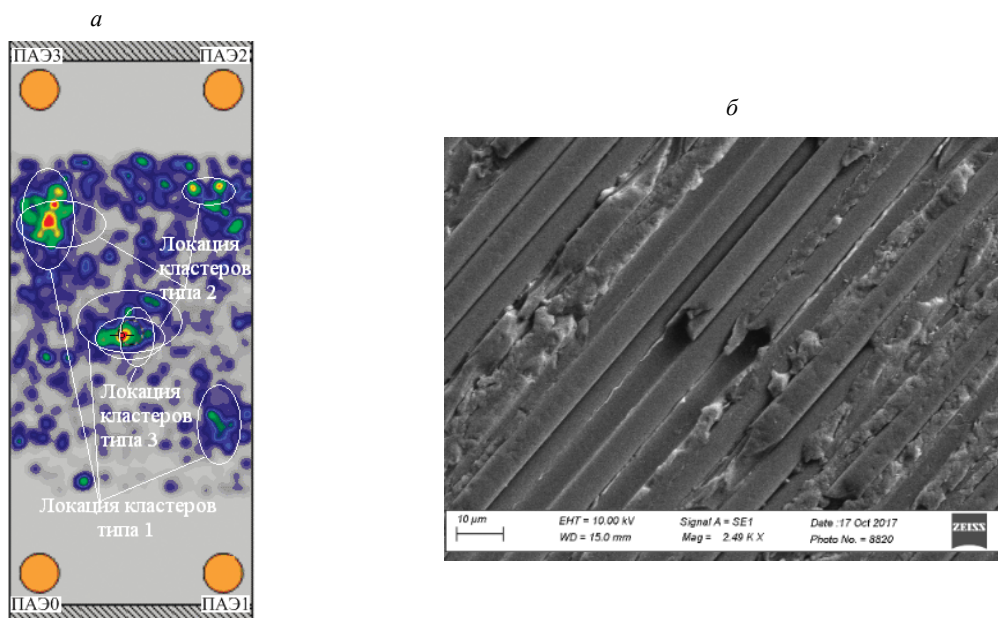


Рис. 3. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении третьего образца (а); результаты его фрактографии (б).

Анализ результатов кластеризации показал, что в третьем образце присутствовали все три типа кластеров (рис. 4, табл. 3). Необходимо отметить, что при нагружении первого и второго образцов

Параметры кластеров, полученных при испытании третьего образца

Номер кластера	Количество сигналов в кластере	Нагрузка, кН	MARSE, мВ·мкс	Частота, кГц	Тип кластера
1	303	16	14,6	218	1
2	274	20	23,385	224	1
3	260	22	13,99	210	1
4	323	26	17,43	224	1
5	330	20	13,48	128	2
6	156	28	13,595	152	2
7	230	32	18,235	128	2
8	1521	22	17,02	279	3
9	614	20	17,31	279	3
10	48	28	11,725	299	3

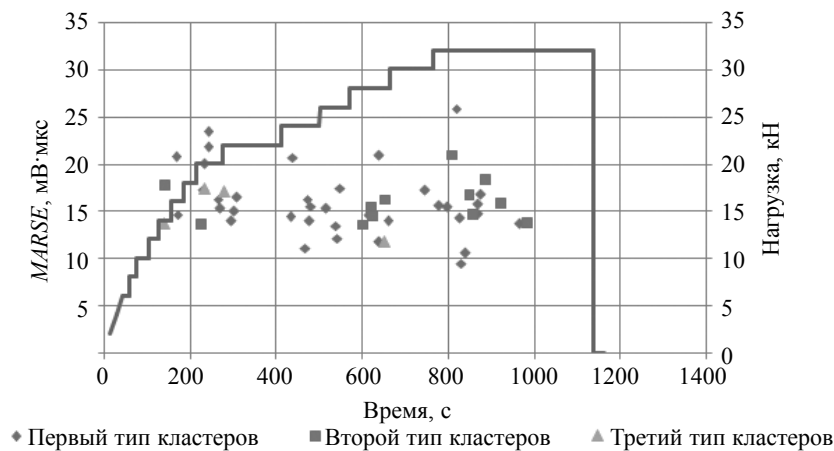


Рис. 4. Зависимость MARSE и нагрузки от времени при нагружении третьего образца.

кластеры второго и третьего типа не наблюдались. На рис. 3а показана локация сигналов АЭ, формирующих кластеры трех типов.

На следующем этапе проводились испытания при статическом нагружении пяти образцов размерами $600 \times 100 \times 0,9$ мм, состоящих из девяти монослоев $[\pm 45/90/0_2/90/\pm 45]$ препрега *Torayca T800*. Образцы нагружались на гидравлической нагружающей машине *MTS-100* ступенчатой нагрузкой через интервал $\Delta P = 10$ кН до их полного разрушения. Два образца одновременно со статическим нагружением подвергались дополнительному воздействию температуры $T = 100$ °С. Нагревающее устройство находилось в центре образца, где располагалось отверстие диаметром 12 мм, являющееся концентратором напряжения. Три образца испытывались при температуре $T = 20$ °С.

На рис. 5 приведена локационная картина сигналов АЭ для четвертого образца, нагружаемого статически при температуре $T = 20$ °С, вплоть до появления расслоений материала по всей зоне контроля. В начале испытаний возникновение дефектов в углепластике *Torayca T800* происходило в области концентратора напряжений, а при нагрузках (50—60) кН наблюдался одновременный рост площади зоны дефектообразования и возникновение расслоений с левого края образца (рис. 5б). Возникающие расслоения на этой стадии разрушения становились заметными при его осмотре. После приложения нагрузки 70 кН произошло расслоение по всей площади образца (рис. 5в).

На рис. 6, 7 показана локационная картина сигналов АЭ для пятого образца, нагружаемого статической нагрузкой при температуре $T = 100$ °С. Как видно из рис. 6, дефектообразование в образце начиналось одновременно по всей площади контроля.

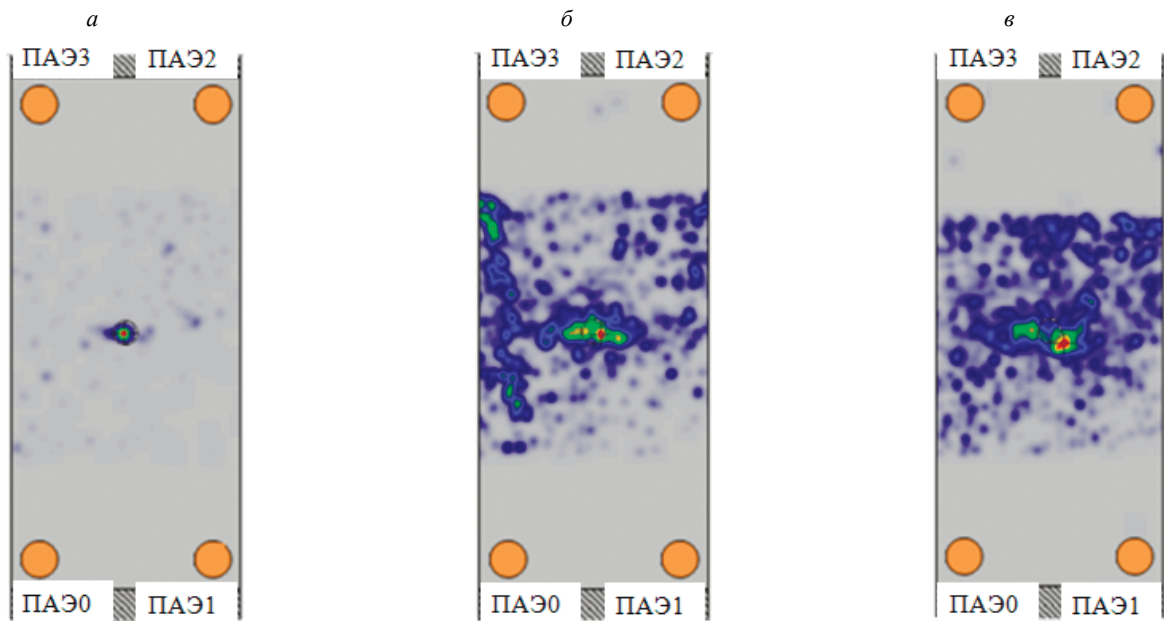


Рис. 5. Локация сигналов АЭ в четвертом образце ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$):
 а — нагрузка до 40 кН; б — нагрузка 50—60 кН; в — нагрузка 60—70 кН.

До нагрузки 30 кН локация активных источников в области концентратора напряжений практически не наблюдалась (рис. 6а). Увеличение нагрузки до 40 кН привело к формированию источника разрушения в области отверстия (рис. 6б), который при нагрузке 60 кН выделялся среди остальных дефектов (рис. 6в). Картина локации сигналов АЭ на рис. 6в свидетельствует о большом количестве сигналов с высокой суммарной амплитудой.

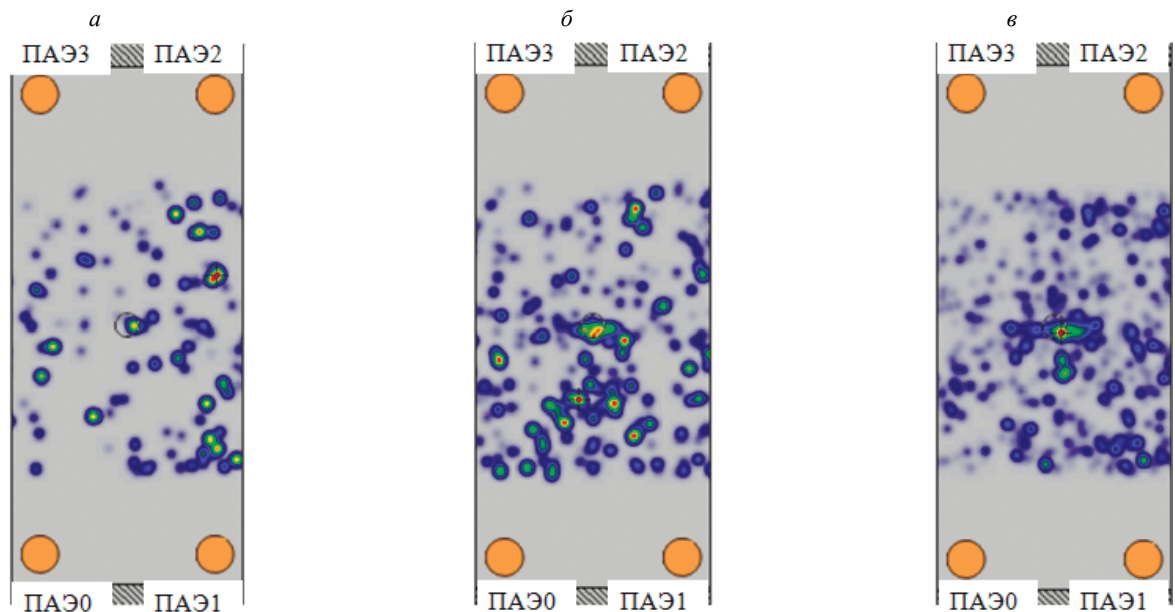


Рис. 6. Локация сигналов АЭ на пятом образце ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$):
 а — нагрузка до 30 кН; б — нагрузка 40 кН; в — нагрузка 60 кН.

При нагрузке 70 кН начиналось распространение дефектов вдоль направления ее приложения (рис. 7а). При этом наблюдались три активных источника, выделенных красным цветом на рис. 7, которые находились в области концентратора напряжений. При выдержке образца под нагрузкой

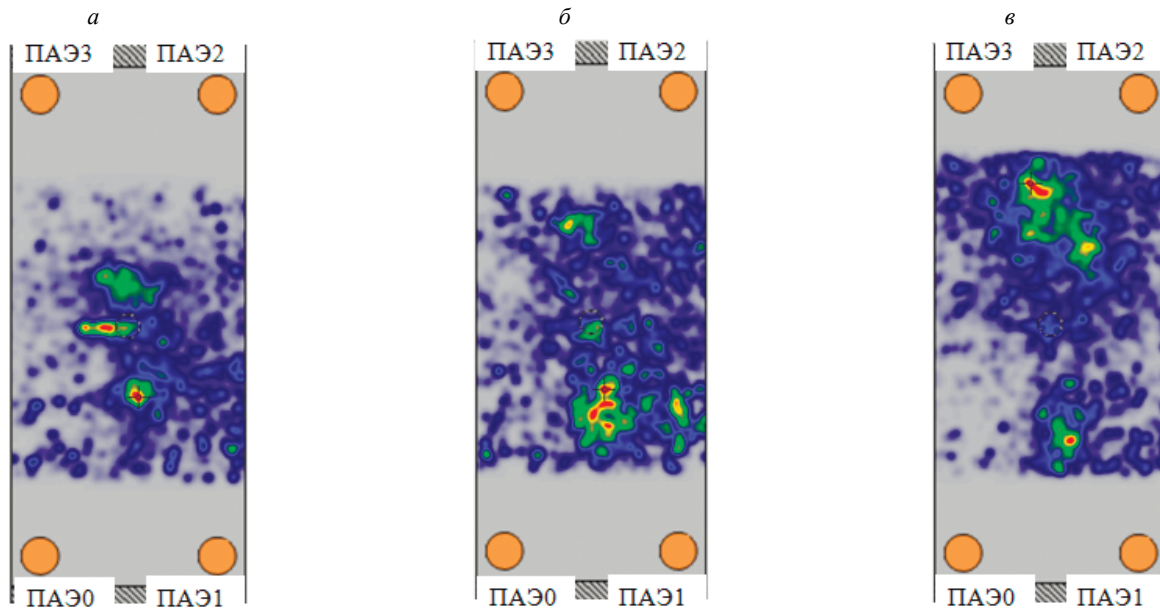


Рис. 7. Локация сигналов АЭ на пятом образце ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) при разрушающей нагрузке 70 кН: *а* — выход на разрушающую нагрузку; *б* — процесс разрушения образца при постоянной нагрузке; *в* — перед окончательным разрушением образца.

70 кН активность локализованных сигналов АЭ в области отверстия снижалась, что соответствовало процессу окончательного разрушения и уменьшению суммарной амплитуды (рис. 7*б*). При этом происходило смещение дефектов в нижнюю часть образца. Непосредственно перед разрушением пятого образца выделялись две области, в которых локализовались активные источники сигналов АЭ (рис. 7*в*).

Таким образом, по локационной картине можно наблюдать значительное изменение характера разрушения образца при его нагреве до температуры $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, обусловленное изменением пластических свойств матрицы углепластика. Это приводило к расслоению образца вдоль направления расположения волокон. Известно, что при нагреве матрица КМ переходит из стеклообразного в высокоэластичное состояние, при котором связь между волокнами становится менее прочной и сопротивление композита воздействию внешних нагрузок снижается.

При выполнении кластеризации сигналов АЭ по цифровой форме для четвертого образца было выделено 117 кластеров, наибольший из которых содержал 103 сигнала, а наименьший — 5 сигналов АЭ. При выполнении кластеризации для пятого образца было выделено 59 кластеров, наибольший кластер содержал 71 сигнал.

Для анализа начального этапа дефектообразования были выбраны только те кластеры, сигналы которых регистрировались до нагрузки 40 кН (рис. 8*а*). На рис. 8*б*, *в* приведены зависимости энергетического параметра *MARSE* от времени, сигналов АЭ для четвертого ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (*б*) и пятого ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) (*в*) образцов. Кластеризация сигналов АЭ проводилась по цифровой форме.

Дальнейший анализ проводился с использованием 20 кластеров, содержащих наибольшее число сигналов АЭ. Для каждого кластера рассматривалась медиана значения основных параметров сигналов АЭ, как наиболее устойчивая из усредняющих статистик. Установлено, что энергетический параметр *MARSE* и частота сигналов обладали информацией, которая позволила выделить три основных типа кластеров, соответствующих различным источникам сигналов АЭ.

Первый тип кластеров характеризовался медианной частотой сигналов АЭ, превышающей 175 кГц, и сравнительно большой величиной энергетического параметра *MARSE*. В кластеры данного типа было распределено наибольшее число сигналов. При увеличении нагрузки до 20 кН отмечался существенный рост энергетического параметра *MARSE* (рис. 8*б*, *в*), а кластеры начинали активно формироваться. Данный тип разрушения идентифицировался как расслоение композита.

В кластеры второго типа были выделены сигналы с меньшими значениями *MARSE* и медианной частотой, не превышающей 170 кГц, а при нагружении без нагрева четвертого образца — с частотой, не превышающей 140 кГц. Суммарное количество сигналов в кластерах этого типа было выше для пятого образца, нагружаемого при температуре $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для данных кластеров характерен меньший рост *MARSE* при увеличении нагрузки, чем для кластеров первого типа.

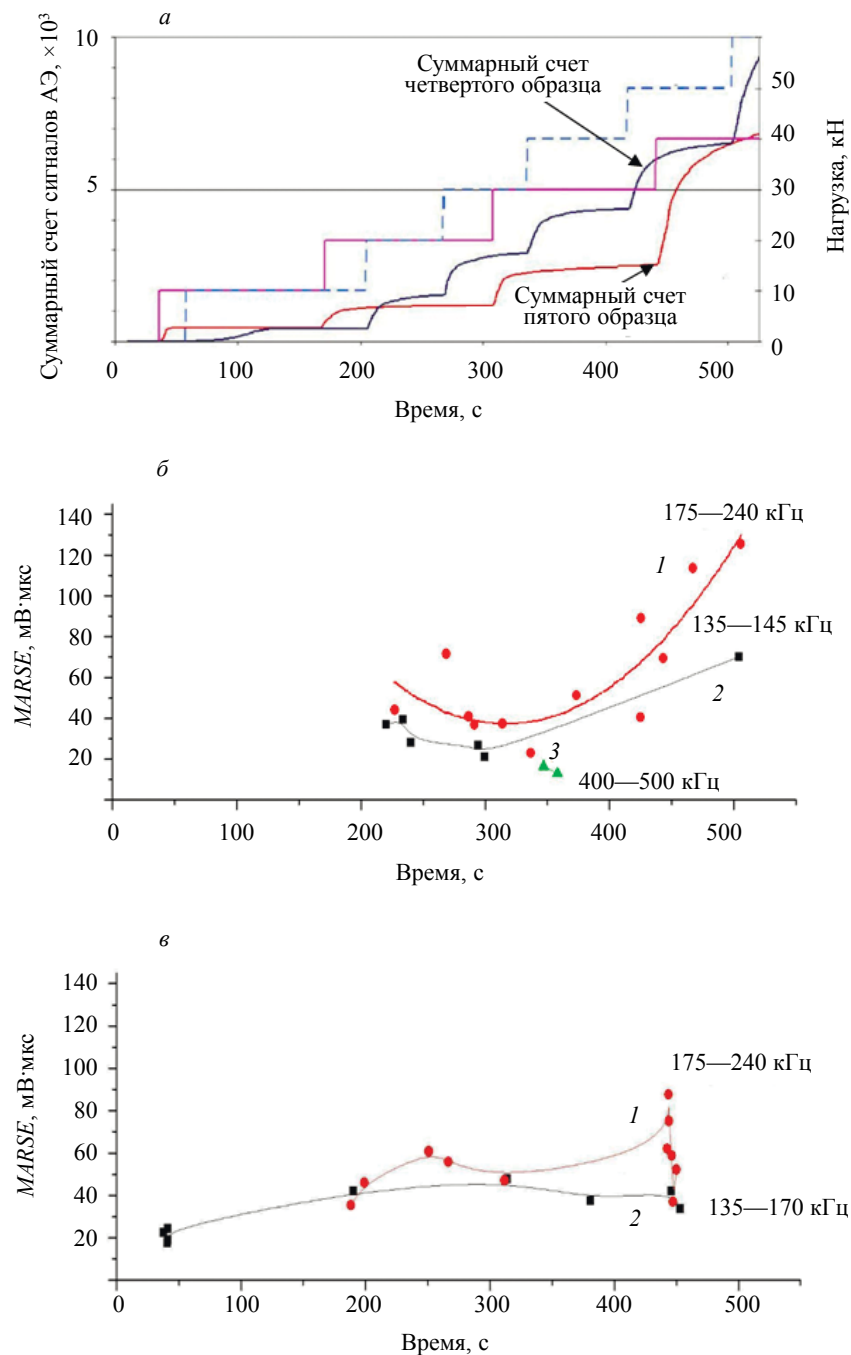


Рис. 8. Исследование основных информативных параметров сигналов АЭ на начальном этапе нагружения: а — зависимость суммарного счета сигналов АЭ от времени; зависимость энергетического параметра $MARSE$ кластеризованных по цифровой форме сигналов АЭ для четвертого ($T = 20^\circ\text{C}$) (б) и пятого ($T = 100^\circ\text{C}$) (в) образцов.

При нагружении пятого образца при температуре $T = 100^\circ\text{C}$ кластеры второго типа начинали активно формироваться уже при нагрузке 10 кН. Малая величина энергии характеризовала сигналы АЭ, регистрируемые в результате отрыва отдельных волокон от матрицы [12, 13]. Ослабление прочностных свойств матрицы в результате нагрева данного образца объясняло раннее появление кластеров второго типа.

Третий тип кластеров сформирован из сигналов АЭ, частота которых превышала 400 кГц, а энергетический параметр $MARSE$ составлял 20 мВ·мкс (рис. 8б). Согласно материалам работы [12], наименьшей амплитудой при разрушении углепластика обладают сигналы АЭ, генерируемые

в процессе растрескивания матрицы. Известно также, что сигналы от растрескивания матрицы могут иметь высокочастотную составляющую спектра [11]. Следовательно, кластеры третьего типа относятся к сигналам, зарегистрированным от растрескивания матрицы.

Кластеры третьего типа не были сформированы в процессе нагружения пятого образца при температуре $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$, так как матрица находилась в высокоэластичном состоянии. Кроме того, для данного образца отмечалось, что на начальных этапах разрушения общее количество зарегистрированных высокочастотных сигналов АЭ уменьшалось более, чем в 30 раз. При этом для четвертого образца, нагружаемого при температуре $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, были сформированы кластеры третьего типа. На рис. 8б показаны два из них.

Для четвертого образца, испытанного при температуре $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, отмечалось, что при нагрузке 10 кН начинали регистрироваться сигналы АЭ с низким уровнем *MARSE*, которые были распределены в первые два кластера. При этом основное количество сигналов, включенных в эти кластеры, регистрировались при нагрузке 20 кН. Установлено, что энергетический параметр *MARSE* в данных кластерах не превышал 40 мВ·мкс (рис. 8б, табл. 4). При выдержке образца на данной ступени нагружения начинали формироваться еще четыре кластера (рис. 8а, б).

Таблица 4

Параметры кластеров при испытании четвертого, шестого и седьмого образца ($T = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

Номер кластера	Число сигналов	Нагрузка, кН	<i>MARSE</i> , мВ·мкс	Частота, кГц	Тип кластера
Образец 4					
1	35	20	44,09	181	1
2	103	30	36,86	177	1
3	27	40	22,99	181	1
4	56	50	69,45	178	1
5	95	60	125,43	175	1
6	83	20	39,52	140	2
7	26	30	26,64	145	2
8	35	60	70,17	134	2
9	27	40	16,36	417	3
10	39	40	12,99	529	3
Образец 6					
1	141	10	15,09	207	1
2	130	40	19,24	220	1
3	91	30	23,19	224	1
4	56	40	30,5	201	1
5	37	50	19,36	226	1
6	13	20	11,8	164	2
7	13	40	26,9	179	2
Образец 7					
1	140	50	25,09	226	1
2	51	40	12,44	207	1
3	50	50	30,91	208	1
4	32	30	12,8	209	1
5	31	30	12,39	216	1
6	28	40	32,01	228	1
7	66	50	26,01	140	2
8	38	50	16,7	147	2

Шестой и седьмой образцы были испытаны при температуре $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$. В процессе их нагружения локация сигналов АЭ начиналась из области отверстия, а также локализовались источники на

краях образцов, что соответствовало расслоению углепластика в данной области. Анализ результатов кластеризации показал, что наибольшее количество сигналов АЭ было распределено в кластеры первого и второго типа (табл. 4). Их параметры (частота и *MARSE*) были близки к параметрам кластеров четвертого образца.

При обработке АЭ-информации сигналы АЭ высокой частоты с небольшим значением *MARSE* регистрировались системой, но при кластеризации не были выделены в отдельные кластеры. Поэтому в табл. 4 третий тип кластеров для шестого и седьмого образцов не приведен.

При анализе АЭ-информации, зарегистрированной при нагружении пятого образца, испытанного при температуре 100 °С, было отмечено, что активное дефектообразование начиналось сразу после приложения нагрузки (табл. 5).

Таблица 5

Параметры кластеров сигналов АЭ для пятого и восьмого образцов ($T = 100^\circ\text{C}$)

Номер кластера	Число сигналов	Нагрузка, кН	<i>MARSE</i> , мВ·мкс	Частота, кГц	Тип кластера
Образец 5					
1	21	20	47,13	205	1
2	20	20	55,78	203	1
3	42	30	47,66	177	1
4	38	40	62,04	208	1
5	40	10	18,94	136	2
6	71	20	42,16	148	2
7	24	30	37,65	169,5	2
8	26	40	42,07	157	2
Образец 8					
1	106	20	12,62	212	1
2	31	20	9	207	1
3	25	40	50,02	199	1
4	23	20	26,14	207	1
5	22	30	30,91	226	1
6	174	30	9,26	166	2
7	72	30	21,13	152	2
8	67	40	21,15	152	2
9	31	30	23,2	164	2

По величине параметра *MARSE* кластеры второго типа, полученные при испытании пятого образца и образующиеся при нагрузке 10 кН, были аналогичны кластерам, рассмотренным для четвертого образца при нагрузке 30 кН (см. табл. 4). Увеличение нагрузки до 20 кН с одновременным тепловым воздействием привело к образованию двух кластеров первого типа с высокой энергией *MARSE* сигналов АЭ. Для четвертого образца подобные кластеры возникали при нагрузке 40 кН.

При испытании восьмого образца осуществлялось статическое нагружение и нагрев центральной зоны, в которой начиналось разрушение. При локации наблюдалось появление источников сигналов не только в области концентратора напряжения, но и по всему образцу, что соответствовало расслоению образца под действием статической и тепловой нагрузки. При кластеризации были выявлены первый и второй типы кластеров, параметры которых были аналогичны параметрам кластеров пятого образца (см. табл. 5).

Таким образом, выполнено сравнение результатов АЭ-контроля при статическом нагружении образцов из углепластика Т800 с концентратором напряжения в виде отверстия при нормальных условиях и при дополнительном тепловом воздействии. Показано, что при температуре $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ процесс дефектообразования начинался с отрыва отдельных волокон от матрицы по всему объему нагружаемого образца, что соответствовало второму типу кластеров. Испытания при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ показали, что дефектообразование в образце начиналось в зоне концентратора напряжений, где формировались дефекты, связанные с растрескиванием матрицы. Это соответствовало третьему типу кластеров.

Установлено однозначное соответствие между типами дефектообразования в углепластике и основными параметрами сигналов АЭ. Показано, что температурное воздействие существенно меняет прочностные характеристики углепластика Т800. В начале процесса дефектообразования при статическом нагружении образца с одновременным температурным воздействием не регистрировались сигналы от дефектов типа «растрескивание матрицы», так как она находилась в высокоэластичном состоянии. Сигналы АЭ характеризовались высокой частотой и малой амплитудой. Следовательно, по регистрируемым сигналам АЭ в процессе нагружения углепластика можно не только определять координаты дефектов, но также их тип и степень опасности. Это важно для решения задач мониторинга конструкций ответственного назначения из углепластика в режиме реального времени, так как позволит исключить их внезапное разрушение.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено сравнение результатов АЭ-контроля при статическом нагружении образцов из углепластика Т700, Т800 с концентраторами напряжения в виде отверстия диаметрами 12 и 14 мм при нормальных условиях и дополнительном тепловом воздействии. При повышении нагрузки процесс дефектообразования осуществлялся за счет активного расслоения углепластика как в зоне концентратора напряжений, так и в формирующихся дополнительных зонах разрушения. При этом расслоение углепластика соответствовало первому типу кластеров сигналов АЭ.

2. Показано, что при температуре $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ процесс дефектообразования начинался с отрыва отдельных волокон от матрицы по всему объему нагружаемого образца, что соответствовало второму типу кластеров. Без температурного воздействия дефектообразование начиналось в зоне концентратора напряжений, где формировались дефекты, связанные с растрескиванием матрицы. Это соответствовало третьему типу кластеров.

3. Установлено однозначное соответствие между типами дефектообразования в углепластике и информативными параметрами сигналов АЭ. Показано, что температурное воздействие существенно изменяет характеристики углепластика Т800. Методом АЭ-контроля установлено, что в начале процесса дефектообразования при статическом нагружении образца с одновременным температурным воздействием не регистрировались сигналы от дефектов типа «растрескивание матрицы», так как она находилась в высокоэластичном состоянии. Сигналы АЭ характеризовались высокой частотой и малой амплитудой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 349—367.
2. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники. (Обзор) // *Конструкции из композиционных материалов*. 2011. № 4. С. 44—59.
3. Дегтярь В.Г., Калашиников С.Т., Кречка Г.А. Углерод-углеродные композиционные материалы для изделий ракетно-космической техники // *Конструкции из композиционных материалов*. 2013. № 2. С. 12—17.
4. Гайдачук В.Е., Коваленко В.А. Уровни дефектов структуры в изделиях из композиционных материалов, возникающих в процессе их производства // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 6 (93). С. 5—12.
5. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Иванов В.И. и др. Акустико-эмиссионная диагностика процесса разрушения структуры композита при растягивающих, сжимающих и циклических нагрузках // *Дефектоскопия*. 2016. № 8. С. 30—46.
6. Постнова М.В., Постнов В.И. Влияние температуры испытаний на усталостные свойства композиционных материалов на углеродной матрице // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16 (2). С. 568—571.

7. Николаев В.П., Мышенкова Е.В., Пичугин В.С. и др. Влияние температуры на механические свойства композиционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 58—61.
8. Madaras E. Underscore the NASA role in the development of the non-destructive testing of the composite / NASA Langley research center, scientific department of non-destructive testing of structures and materials. Gempston. VA23681.
9. Prosser W., Madaras E., Studor G. Acoustic emission detection of impact damage on space shuttle structures // Journal of Acoustic Emission. 2005. V. 23. P. 37—46.
10. Gardoni M., Gianneo A., Gilio M. A low frequency lamb-waves based structural health monitoring of an aeronautical carbon fiber reinforced polymer composite // Journal of Acoustic Emission. 2014. V. 32. P. 1—20.
11. Kanji O. Research and applications of AE on advanced composites // Journal of Acoustic Emission. 2012. V. 30. P. 180—229.
12. Hill E., Foti C., Leung N., Palacios A. Neural network burst pressure prediction in tall graphite-epoxy pressure vessels from acoustic emission data // Journal of Acoustic Emission. 2012. V. 30. P. 167—179.
13. Gorman M. Modal AE analysis of fracture and failure in composite materials, and the quality and life of high pressure composite pressure vessels // Journal of Acoustic Emission. 2011. V. 29. P. 1—28.
14. Степанова Л.Н., Петрова Е.С., Чернова В.В. Прочностные испытания лонжерона из углепластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 24—30.
15. Степанова Л.Н., Батаев В.А., Чернова В.В. Исследование разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием методов акустической эмиссии и фрактографии // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 26—33.
16. Stepanova L.N., Chernova V.V., Petrova E.S. et al. Acoustic-Emission Testing of Failure in Samples of CFRP Exposed to Static and Heat Loads // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 11. P. 748—756. [Степанова Л.Н., Чернова В.В., Петрова Е.С., Рамазанов И.С. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из углепластика при воздействии статических и тепловых нагрузок // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 9—16.]
17. 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.
18. 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.
19. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С. Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации // Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 12—21.