

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКА

УДК 620.179.17:539.422.5

Л.Н. Степанова, В.В. Чернова

### Определение связи параметров сигналов акустической эмиссии с процессом разрушения образцов из стеклопластика

В статье приведены результаты исследований образцов из стеклопластика СППС при статическом нагружении. Актуальность проведенных исследований обусловлена необходимостью разработки методик, позволяющих выполнять контроль за состоянием конструкций из композиционных материалов как при их изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Прогнозирование процесса разрушения, а также оценка степени опасности определяемых дефектов осуществлялась с использованием современных методов неразрушающего контроля (акустическая эмиссия (АЭ), тензометрия, визуальный и ультразвуковой методы).

В процессе испытаний выполнялся контроль дефектов в образцах с использованием метода АЭ. Для ослабления сечения образцов в их центральной части симметрично были выполнены пропилы длиной 20 и 25 мм, которые являлись концентраторами напряжений. На один из образцов предварительно был нанесен точечный удар в его центральном сечении.

Получена устойчивая локация сигналов АЭ, регистрируемых в области концентраторов напряжений пьезоантенной, состоящей из четырех преобразователей акустической эмиссии. Локация сигналов АЭ осуществлялась в режиме реального времени и отражала процесс разрушения образцов. Применение для обработки сигналов АЭ двухинтервального метода позволило повысить точность локации дефектов. Проанализировано изменение основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуды, доминантной частоты, времени нарастания переднего фронта и энергетического параметра MARSE) в процессе нагружения образцов. Установлено, что амплитуда сигналов АЭ наиболее полно характеризует процесс разрушения образцов из стеклопластика. С использованием вейвлет-преобразования был определен структурный коэффициент, позволивший установить связь между параметрами сигналов АЭ и типом разрушения исследуемого композиционного материала.

**Ключевые слова:** образец, статические испытания, ударная нагрузка, акустическая эмиссия, стеклопластик, структура сигналов, разрушение.

В настоящее время наблюдается активное использование композиционных материалов (КМ) при проектировании и изготовлении различных конструкций объектов транспорта. К преимуществам таких конструкций можно отнести высокую коррозионную и химическую стойкость, сопротивляемость ветровым нагрузкам, акустическую прочность и устойчивость к землетрясениям, легковесность и возможность использования ручной сборки [1–4]. Эти материалы обладают высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами, являются прозрачными для радиоволн.

В процессе эксплуатации конструкций из КМ в области соединения элементов, являющейся концентратором напряжений, накапливаются повреждения, которые могут вызвать разрушение конструкции. Своевременное обнаружение разрушений материала конструкций является важной задачей неразрушающего контроля (НК).

При контроле конструкций из композитов в режиме реального времени одним из наиболее эффективных является метод акустической эмиссии (АЭ), так как при его использовании осуществляется локация дефектов на начальных стадиях разрушения, автоматизация процесса измерения и определение степени опасности дефектов.

Однако при этом возникают сложности, связанные с особенностями структуры композитов. Анизотропные свойства оказывают существенное влияние на распространение сигналов АЭ в материале. Скорость ультразвуковой волны, ее затухание, а также форма регистрируемых сигналов АЭ зависят от направления и схемы укладки армирующих волокон, типов связующего и волокон, направления прихода волны. В связи с этим испытания, направленные на исследование параметров сигналов АЭ и определение их связи с разрушением в процессе нагружения образцов из стеклопластиков, являются актуальными.

Цель работы – определение связи основных информативных параметров сигналов АЭ с процессом разрушения образцов из стеклопластика.

#### Методика проведения исследований

Исследовано семь образцов из стеклопластика СППС (стеклопластик профильный пултрузионный строительный) размером  $500 \times 75 \times 10$  мм, выполненных из стекловолокна и термореактивного связующего. Технические характеристики исследуемого материала приведены в [5]. Проводилось статическое нагружение образцов на электрогидравлической машине MTS-50. Для исключения преждевременного разрушения образцов в области гидравлических захватов на них были наклеены дюралюминиевые пластины размером  $100 \times 75 \times 1$  мм. В процессе нагружения производилась регистрация сигналов АЭ пьезоантенной, состоящей из четырех преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). Обработка осуществлялась с использованием диагностической АЭ-системы СЦАД-16.10 (свидетельство RU.C.27.007.А № 40707) с плавающими порогами селекции и программно изменяемой частотой дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП) от 1 до 8 МГц. Это позволило в процессе ее работы в автоматическом режиме изменять уровень селекции измерительного канала в зависимости от амплитуды поступающих сигналов и шумов и исключить переход в режим насыщения.

На образец 1 предварительно был нанесен точечный удар, в результате чего был поврежден верхний несущий слой композита. Для сокращения времени нагружения образцов и ослабления сечения в их центральной части были выполнены пропилы, которые являлись концентраторами напряжений. В образце 2 величина пропила составила 20 мм, а в образцах 3–7 пропилы были увеличены до 25 мм.

#### Результаты исследований и их обсуждение

При нагружении образца 1 с предварительно нанесенным точечным ударом нагрузку изменяли ступенчато с интервалом  $\Delta P = 10$  кН. После увеличения нагрузки до  $P = 70$  кН началась регистрация сигналов

АЭ из области нижнего захвата, что было связано с перемещением дюралюминиевых пластин в данной области образца. При этом активность сигналов АЭ увеличилась с 1 до 10 сигн./с. При нагрузке  $P = 80$  кН испытания завершились, так как произошло отслоение дюралюминиевых пластин.

На рис. 1, а показана локация сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца 1. С использованием двухинтервального метода [6, 7] была выполнена локация сигналов АЭ в области концентратора напряжений. При этом применялся двухинтервальный коэффициент  $K(t)$ . Время прихода сигнала АЭ принимается равным моменту достижения им максимального значения [6, 7]:

$$K(t) = \frac{A(t) - A(t - T_{\text{ок}})}{A(t - T_{\text{ок}})}, \quad (1)$$

где  $A(t) = \sum_{i=t/\tau}^{(t+T_{\text{ок}})/\tau} |U_i|$  – параметр структуры сигнала АЭ;  $U_i$  – значения отсчетов оцифрованной формы сигнала АЭ;  $\tau$  – интервал дискретизации АЦП;  $T_{\text{ок}}$  – размер «окна» двухинтервального коэффициента.

Сигналы, зарегистрированные в области ударного воздействия (см. рис. 1, б), находятся в области 1, а сигналы, зарегистрированные области нижнего захвата, – в области 2. В процессе нагружения образца 1 в области ударного воздействия было локализовано около 200 сигналов АЭ. Время прихода сигналов АЭ находилось из формулы (1) при достижении двухинтервальным коэффициентом максимального значения. Амплитуда сигналов, зарегистрированных при испытании образца 1, была равна (0,1–0,25) В и в процессе нагружения значительно не изменялась.

При испытании образца 2 с пропилами 20 мм нагрузку изменяли постепенно через  $\Delta P = 5$  кН. Нагружение образца 2 было остановлено при нагрузке  $P = 75$  кН после отслоения дюралюминиевых пластин. Для продолжения испытаний образцов 3–7 величина пропилов была увеличена до 25 мм. В режиме реального времени были локализованы сигналы АЭ, которые соответствовали процессу разрушения данных образцов.

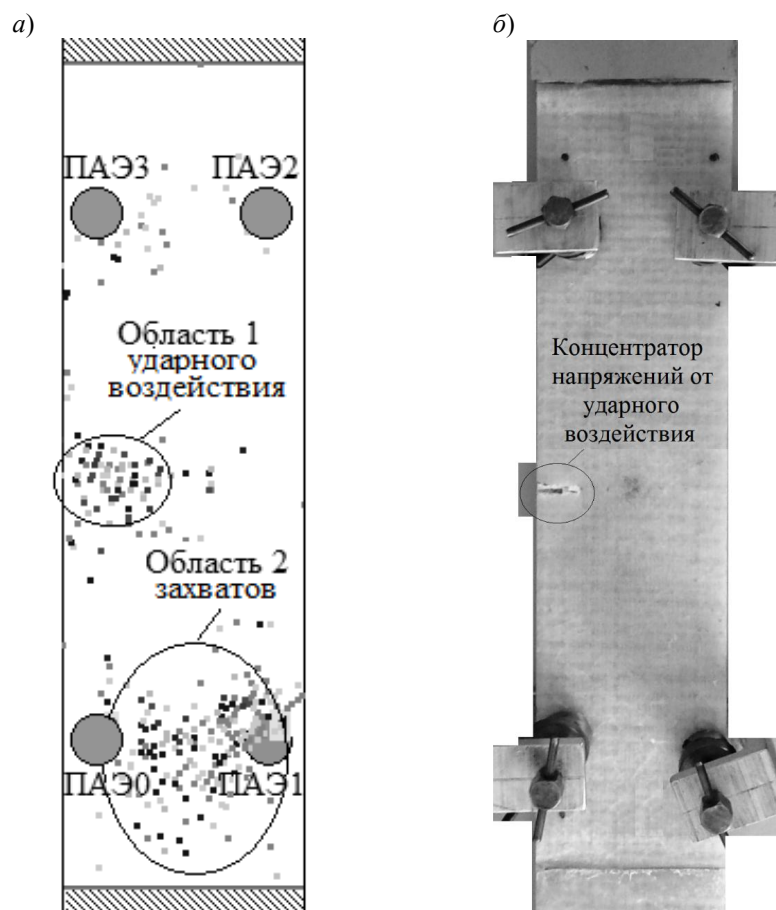


Рис. 1. Образец 1 из стеклопластика: а – локация сигналов АЭ; б – внешний вид

В качестве примера на рис. 2 показана локация сигналов АЭ, полученная при нагружении образца 7. В процессе испытаний происходило сначала разрушение несущих монослоев (область 1 на рис. 2, а). В процессе его выдержки на последней ступени нагружения при нагрузке  $P = 75$  кН произошла потеря устойчивости материала образца 7 и началось вытягивание армирующих стекловолокон (область 2 на рис. 2, б, в). Данному процессу соответствовало начало локации сигналов в области 2 (см. рис. 2, б). При этом суммарная амплитуда сигналов АЭ была значительно меньше, чем амплитуда сигналов из области пропилов. Перед полным разрушением образца 7 происходило только вытягивание волокна и была получена локация сигналов АЭ из области 2, отражающая данный процесс (см. рис. 2, в).

Для исследования связи основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуды, доминантной частоты, вре-

мени нарастания переднего фронта и энергетического параметра MARSE) с разрушениями были проанализированы результаты испытаний образцов 2–7 с пропилами. Получено, что амплитуда сигналов АЭ в наибольшей степени характеризует процесс разрушения исследуемых образцов. На рис. 3 показана зависимость медианы амплитуды сигналов АЭ от времени для образцов 2–7. Для данных образцов было характерно увеличение амплитуды в начале нагружения и затем постепенное ее уменьшение. Перед разрушением несущих монослоев амплитуда сигналов АЭ снова увеличивалась. В образце 2 несущие слои не разрушились, поэтому увеличения амплитуды сигналов в конце нагружения не наблюдалось.

Для образца 7 выполнен анализ связи изменения амплитуды сигналов АЭ с нагрузкой и временем. Образец нагружался ступенчато до нагрузки  $P = 75$  кН. Затем выдерживался при данной нагрузке

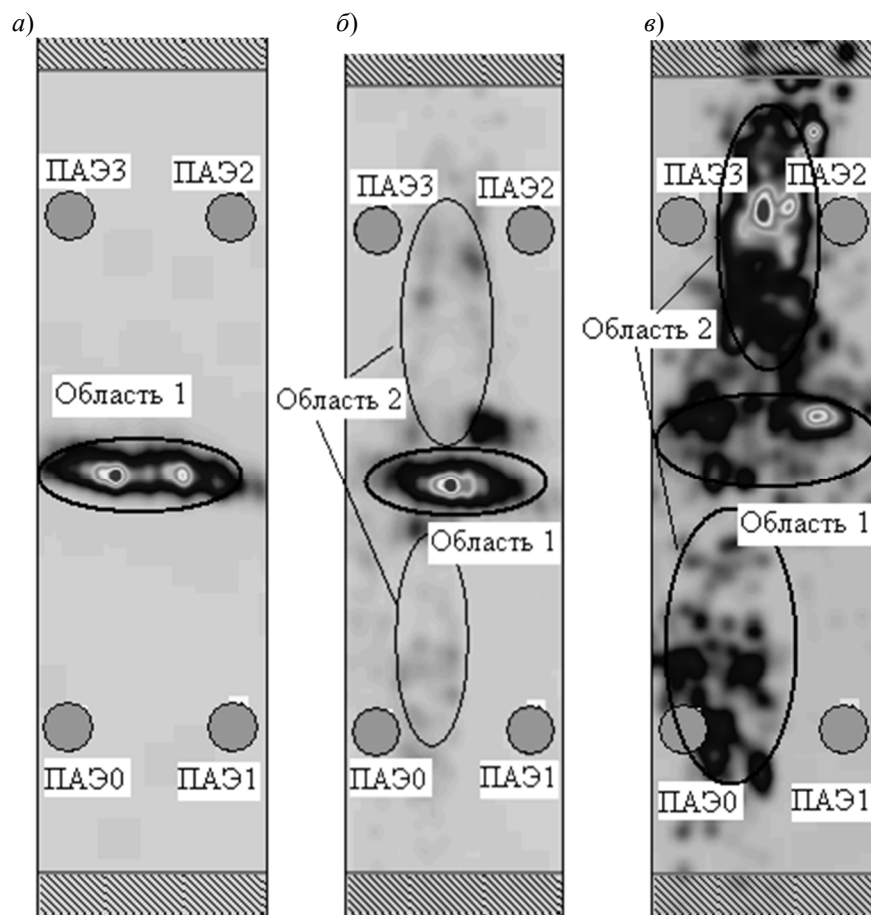


Рис. 2. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных с начала нагружения до нагрузки  $P = 55$  кН (а), в момент потери устойчивости образца при нагрузке  $P = 75$  кН (б) и перед полным разрушением (в)

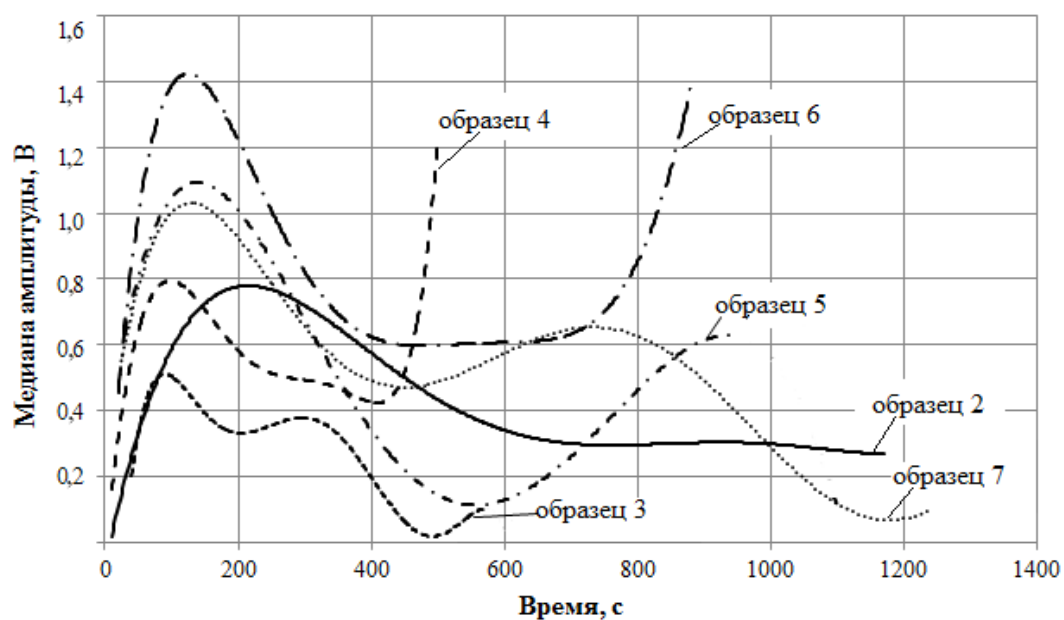


Рис. 3. Зависимость изменения медианы амплитуды сигналов АЭ от времени при испытании образцов 2–7 с пропилами

в течение промежутка времени  $\Delta t = 480$  с до его полного разрушения. На рис. 4 показаны зависимости изменения медианы амплитуды сигналов АЭ и нагрузки от

времени. В начале нагружения регистрировались сигналы АЭ с максимальными значениями амплитуды, далее наблюдалось ее снижение до момента времени, ког-

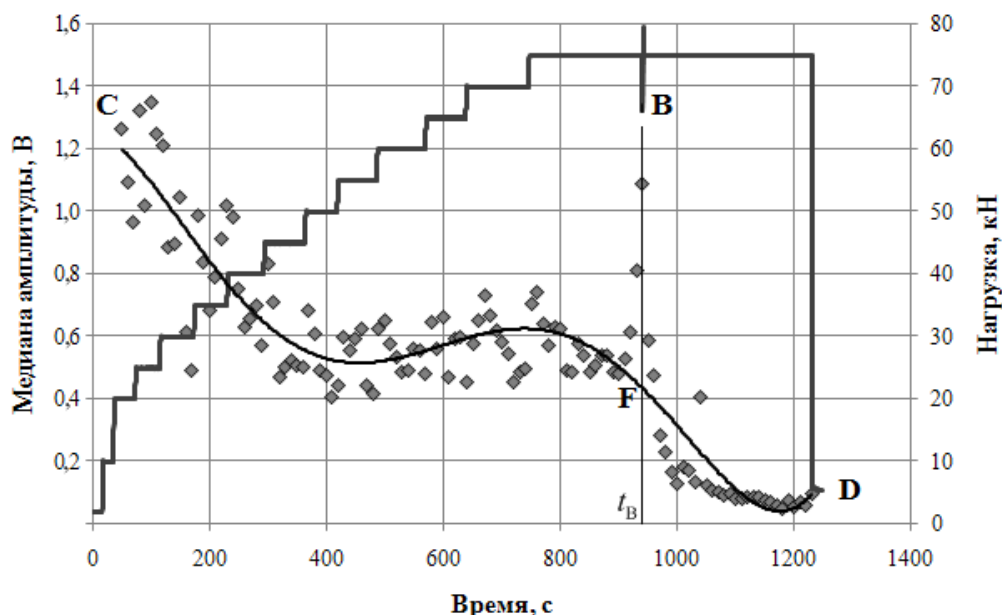


Рис. 4. Зависимость медианы амплитуды и нагрузки от времени при испытании образца 7

да нагрузка становится равной  $P = 40$  кН. При последующем нагружении и при выдержке образца 7 на последней ступени под нагрузкой  $P = 75$  кН в течение первых  $\Delta t = 160$  с амплитуда сигналов АЭ находилась в интервале (0,4–0,8) В. В момент времени  $t_B = 940$  с (см. рис. 4) был слышен треск при разрушении образца и произошло резкое снижение нагрузки до  $P = 69$  кН (точка В на рис. 4). Это свидетельствовало о потере устойчивости образца и начале его разрушения. В момент потери устойчивости образца  $t_B$  амплитуда сигналов АЭ стала равной 1,1 В, а затем до конца испытаний она не превышала 0,2 В.

Таким образом, изменение амплитуды сигналов АЭ характеризует процесс разрушения образцов из стеклопластика. Процессу вытягивания волокон соответствуют сигналы с амплитудой (0,1–0,2) В (отрезок FD на рис. 4), что в два раза меньше, чем при разрушении несущих монослоев (отрезок CF на рис. 4).

При анализе сигналов АЭ, обладающих сложной частотно-временной структурой, использовали вейвлет-преобразования [8, 9]. В отличие от преобразования Фурье в качестве функции, по которой выполняется разложение исходного сигнала (материнский вейвлет), выбиралась непериодическая, локализованная в пространстве функция, имеющая один или два

близко расположенных экстремума и быстро затухающая [4, 8].

Для обработки зарегистрированных сигналов АЭ был выбран вейвлет Добеши четвертого порядка. После разложения исходный сигнал в соответствии с алгоритмом Мала преобразовывался в набор четырех вейвлет-коэффициентов ( $D_1, D_2, D_3, D_4$ ) [9]. Коэффициент  $D_1$  соответствовал первому уровню вейвлет-детализации, которая относилась к высокочастотной области, не представленной в спектре сигналов АЭ. Поэтому для анализа были выбраны наборы коэффициентов  $D_2$  и  $D_3$ , характеризующие второй и третий уровни вейвлет-разложения. После разложения сигналов был рассчитан структурный коэффициент по формуле [4]:

$$P_D(f) = \frac{D_3}{D_2}, \quad (2)$$

где  $D_2$  и  $D_3$  – наборы коэффициентов вейвлет-разложения второго и третьего уровней, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала, равной  $f = 2$  МГц.

Был выполнен расчет значения структурного коэффициента по формуле (2) для сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца 7. В момент времени

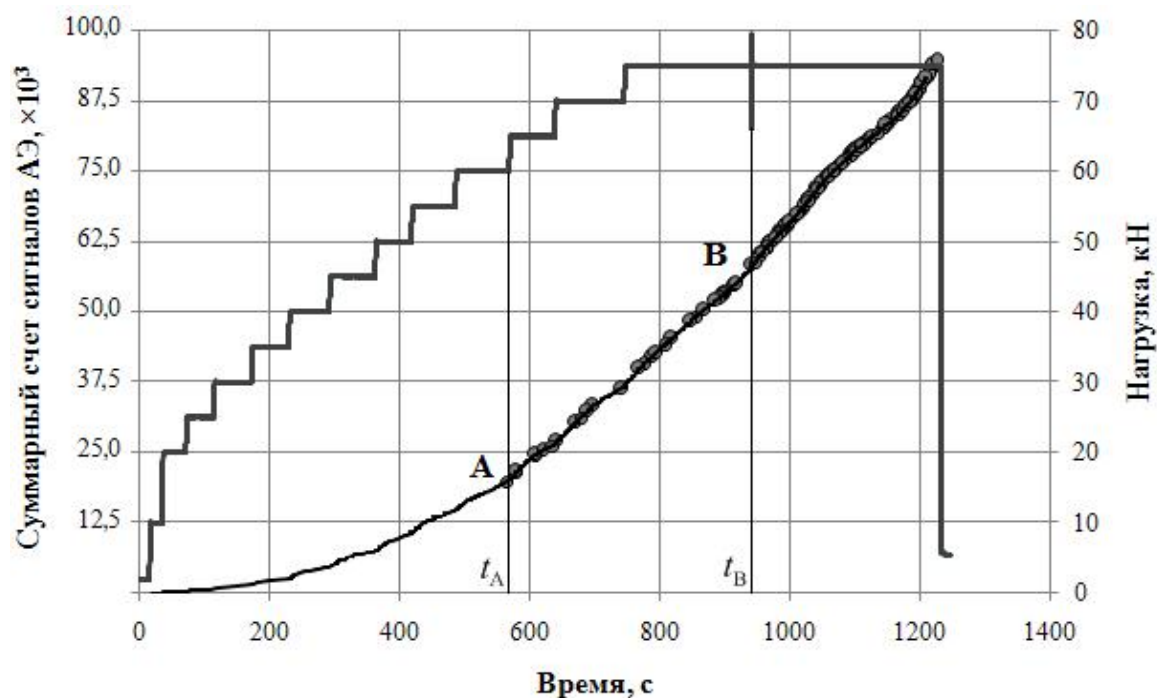


Рис. 5. Зависимость суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени при испытании образца 7: точками обозначены сигналы со значением структурного коэффициента более 60

$t_A = 570$  с (точка А на рис. 5) при увеличении нагрузки до  $P = 65$  кН был слышен треск, вызванный разрушением образца. Однако при визуальном осмотре видимых разрушений обнаружено не было. При анализе сигналов АЭ с использованием структурного коэффициента было установлено, что при данной нагрузке были зарегистрированы первые сигналы АЭ со значением структурного коэффициента  $P_D(f) \geq 60$ . Это свидетельствовало о том, что максимальная энергия сигнала АЭ сместилась в область низких частот, которой соответствует коэффициент  $D_3$ . Активная регистрация данных сигналов наблюдалась после потери устойчивости образца при  $t_B = 940$  с (точка В на рис. 5). Таким образом, процессу вытягивания волокон соответствовали сигналы АЭ со значением структурного коэффициента более 60.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Проведены статические испытания образцов из стеклопластика СППС. Для наблюдения за процессом разрушения образцов выполнялась регистрация сигналов АЭ. При нагружении в режиме реального

времени была получена устойчивая локация из области концентратора напряжений, которая отражала разрушение образца.

2. Проанализированы информативные параметры сигналов АЭ. Установлено, что амплитуда сигналов АЭ наиболее полно характеризует процесс разрушения образцов из стеклопластика. Получено, что в начале нагружения данный параметр имел максимальные значения, а затем наблюдалось его уменьшение. Процессу разрыва несущих слоев соответствовало увеличение амплитуды. Таким образом, была определена связь изменения амплитуды сигналов АЭ с процессами разрушения.

3. Анализ изменения структуры сигналов АЭ был выполнен с использованием вейвлет-преобразования. Получено, что в процессе вытягивания волокон были зарегистрированы сигналы со значением структурного коэффициента  $P_D(f) \geq 60$ . Это означает, что максимальная энергия сигналов АЭ сместилась в низкочастотную область. Сигналы АЭ, соответствующие вытягиванию волокон, по структуре отличаются от сигналов, зарегистрированных при разрушении монослоев.

### Библиографический список

1. Мостовые конструкции из композитов / А.Е. Ушаков, Ю.Г. Кленин, Т.Г. Сороина и др. // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 25–37.
2. Кавун Н.С., Давыдова И.Ф., Гребнева Т.В. Влияние прошивки стеклянного и углеродного армирующих волокон на остаточную прочность композиционных материалов после удара // Композиты и наноструктуры. 2013. № 1. С. 57–63.
3. СТО 39790001.03–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов. Технические требования, методы испытаний и контроля. М., 2007.
4. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В. Вейвлет-анализ структуры сигналов акустической эмиссии при прочностных испытаниях образцов из углепластика // Контроль. Диагностика. 2015. № 7. С. 54–62.
5. Использование метода конечных элементов, тензометрии и акустической эмиссии для определения механизма разрушения образцов из углепластика при прочностных испытаниях / Л.Н. Степанова, Н.А. Коваленко, Е.С. Огнянова, В.В. Чернова и др. // Контроль. Диагностика. 2015. № 4. С. 29–36.
6. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. М., 2004. 368 с.
7. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Применение методики обработки сигналов для повышения точности локализации сигналов АЭ // Дефектоскопия. 2002. № 8. С. 53–65.
8. Переберин А.В. О систематизации вейвлет-преобразований // Вычислительные методы и программирование. М., 2001. Т. 2. С. 15–40.
9. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов и др. М., 2008. 440 с.

*L.N. Stepanova, V.V. Chernova*

### The Identifying of the Connection Between the Parameters of Acoustic Emission Signals and the Process of Destruction of Fiberglass Samples

**Abstract.** The paper suggests the results of investigation of the of SPPS fiberglass samples under the static loading. The relevance of the research is determined by the need to develop the monitoring methods of the state of composite structures both in their manufacturing and in service. Forecasting of the destruction process, as well as the assessment of the degree of the determined defects danger was carried out with the use of modern methods of nondestructive testing (acoustic emission – AE, strain measurement, visual and ultrasound method). The research was aimed at the inspection of the samples defects using the AE method. In order to weaken the section of the samples, the cuts of 20 and 25 mm length were symmetrically made in their central parts as the stress concentrators. A localized strike to the central section of one of the samples was previously made. The stable location of the AE signals was recorded in the area of stress concentrators by piezo antenna consisting of four acoustic emission transducers (AE). The location of the AE signals was identified in real-time and it reflected the process of the samples destruction. The application of double timeslot method for the AE signals processing allows to improve the accuracy of defects location. The alteration of the basic informative parameters of the AE signals (amplitude, dominant frequency, build up time of the front edge and energy MARSE parameter) in the process of samples loading was analyzed. It was found that the amplitude of the AE signals can best characterize the process of destruction of the fiberglass samples. The application of the wavelet transformation allowed to determine the structural coefficient which contributed to the establishment of the connection between the parameters of the AE signals and the type of destruction of the tested composite material.

**Key words:** *sample; static tests; impact load; acoustic emission; fiberglass; signal structure; destruction.*

**Степанова Людмила Николаевна** – профессор, доктор технических наук, завкафедрой «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС. E-mail: [stepanova@stu.ru](mailto:stepanova@stu.ru)

**Чернова Валентина Викторовна** – аспирант кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС. E-mail: [chernova.vv@yandex.ru](mailto:chernova.vv@yandex.ru)