

Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии

© 2022

Брянский Антон Александрович^{*1,2,3}, заведующий лабораторией, младший научный сотрудник
Башков Олег Викторович^{1,2,4}, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой материаловедения и технологии новых материалов, ведущий научный сотрудник
Белова Инна Валерьевна^{1,5}, кандидат технических наук,
доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов
Башкова Татьяна Игоревна^{1,6}, кандидат технических наук,
доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре (Россия)

²Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток (Россия)

*E-mail: bryansky.aa@yandex.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7992-0165>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-9797>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0560-2855>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7070-5821>

Поступила в редакцию 25.03.2022

Принята к публикации 08.06.2022

Аннотация: Полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные стеклянными волокнами, востребованы во многих отраслях промышленности благодаря комплексу уникальных свойств (высокой удельной прочности и хемостойкости) при экономической эффективности применения. Вместе с тем использование стеклотканей в роли армирующих элементов обеспечивает высокую технологичность производства. Однако, в отличие от кристаллических материалов, ПКМ подвержены сложному процессу разрушения, требующего применения неразрушающих методов контроля для получения информации о природе образующихся повреждений и кинетики их накопления. Работа посвящена исследованию повреждений, развивающихся в образцах стеклопластика, формованного с использованием стеклоткани Т-11-ГВС-9 и связующего DION 9300 FR, в условиях статической деформации изгибом в сопровождении метода акустической эмиссии (АЭ). В работе решалась задача идентификации природы повреждений в стеклопластике по спектрам Фурье регистрируемых сигналов АЭ. Для оценки кинетики образования и развития повреждений использовался метод кластеризации. Кластеризация выполнялась на основе алгоритма самоорганизующейся карты Кохонена (SOM) с использованием значений пиковых частот спектров Фурье, рассчитанных для зарегистрированных сигналов АЭ при статической деформации изгибом образца стеклопластика до разрушения. Для обеспечения разделимости образующихся повреждений по параметрам АЭ использовалась скорость нагружения в 10 раз ниже определяемой по государственному стандарту. Установлено, что использование частотного представления сигналов АЭ, регистрируемых при разрушении стеклопластика, эффективно при решении задачи идентификации природы образующихся повреждений. Установлено, что процесс образования расслоений при изгибе многослойных слоистых пластиков выступает критическим механизмом разрушения, приводящим к существенной потере прочностных свойств полимерного композита.

Ключевые слова: ПКМ; стеклопластик; разрушение; акустическая эмиссия; кластеризация; оптическая микроскопия.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00896.

Для цитирования: Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. С. 7–16. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) представляют собой структуру, образуемую как минимум двумя фазами – матрицей связующего и армирующим материалом. Функциональное взаимодействие компонентов полимерных композитов позволяет добиться высоких показателей механических и других свойств. Однако данные особенности обуславливают процессы разрушения, отличающиеся от процессов, характерных

для разрушения традиционно используемых металлических материалов.

Для обеспечения оценки качества и надежности при эксплуатации изделий и конструкций из ПКМ необходимо развивать методы неразрушающего контроля и методики обработки регистрируемых данных. Акустическая эмиссия (АЭ) зарекомендовала себя как информативный метод анализа процессов, происходящих в материалах в условиях внешнего воздействия. Разработка методик обработки и анализа данных АЭ позволяет

решить задачи идентификации повреждений в материалах и оценки особенностей их накопления и развития.

Такие параметры сигналов АЭ, как их представление в частотном диапазоне, позволяют с высокой точностью идентифицировать природу событий АЭ [1]. В работе [2] для разделения событий АЭ на группы в соответствии с природой разрушения использовано распределение энергии и медианных частот сигналов АЭ. Анализ частотного представления сигналов, приведенный в [3], показывает эффективность подобного подхода для исследования природы образующихся повреждений даже в условиях высокого уровня шумов.

В зарубежных работах [4; 5] для анализа сигналов АЭ, зарегистрированных при разрушении углепластиков, применялась методика вейвлет-преобразования. Однако в качестве характеристического параметра оценки сигналов выбирались только значения пиковой частоты и диапазон ее значений, что можно объяснить визуальным более простым анализом распределений одно- или двумерных данных. В работах [6; 7] также использован одно- и двухпараметрический анализ данных АЭ, информативность которого повышена применением методов фрактографии и тензометрии.

Одним из решений в анализе многопараметрических данных АЭ является свертка данных методом главных компонент [8] или применением алгоритмов кластеризации, позволяющих представить многомерные данные в двумерной плоскости. Широкое распространение получил алгоритм *k*-средних [9; 10]. Высокую результативность разделения данных на кластеры демонстрируют искусственные нейронные сети, эффективно решающие задачи классификации сигналов [11], кластеризации [12], прогнозирования [13] и диагностики [14].

Использование ПКМ в ответственных узлах транспортных систем, ветряных электростанций, изделий авиа- и машиностроения ставит задачу обеспечения надежности конструкций, решение которой заключается в разработке и совершенствовании систем мониторинга и диагностики с использованием методов неразрушающего контроля [15]. Однако большинство исследований, связанных с анализом регистрируемых сигналов АЭ, проводятся для традиционно используемых металлических материалов, из-за чего возникает необходимость апробации уже разработанных методик и развития новых методов исследования процессов разрушения ПКМ.

Цель исследования – идентификация повреждений в стеклопластике, возникающих в условиях воздействия статической нагрузки, с использованием метода АЭ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образец стеклопластика был изготовлен методом вакуумной инфузии с использованием связующего DION 9300 FR и стеклоткани Т-11-ГВС-9. При выкладке пакета для последующей пропитки и формования было использовано 46 слоев стеклоткани. Из полученной плиты абразивной пилой вырезаны образцы прямоугольной формы длиной 250 мм и поперечным сечением 10×10 мм.

Механические испытания проводились трехточечным статическим изгибом согласно ГОСТ Р 56810-2015 на универсальной испытательной машине Instron 3382.

Повышение скорости деформирования испытываемого материала приводит к повышению интенсивности накопления повреждений. Увеличение частоты образования повреждений, в свою очередь, приводит к перекрытию сигналов АЭ, регистрируемых от нескольких источников, и усложнению процесса разделения сигналов по типам источников. Поэтому скорость перемещения нагружающего наконечника была выбрана в 10 раз меньше рассчитанной по стандарту.

Сигналы АЭ регистрировались с помощью программно-аппаратного комплекса AE 2.1 Pro с использованием широкополосного датчика Globaltest GT301 с диапазоном рабочих частот 50–550 кГц. Детальное описание аппаратной и программной реализации приведено в [16].

Первичная оценка повреждений, образующихся в условиях изгибного деформирования ПКМ, проведена по результатам микроскопических исследований на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N.

Обработка данных АЭ проводилась в ПО Matlab. Общая схема используемой методики двухстадийной кластеризации с использованием самоорганизующейся карты Кохонена (Self-organizing map, SOM) приведена на рис. 1.

Зарегистрированные в ходе механического испытания сигналы АЭ предварительно обрабатывались для последующего анализа. Для зарегистрированных сигналов АЭ рассчитывались спектры Фурье, частотный диапазон которых ограничивался до значений 20–450 кГц. Сигналы – шум от испытательной машины лежат в диапазоне частот до 20 кГц [17; 18]. Диапазон информативных частот сигналов АЭ при разрушении стеклопластика ограничивается значением 600 кГц [19]. Таким образом, ограничение анализируемого диапазона частот позволяет повысить информативность и, соответственно, качество данных [20]. Нормализация спектров снижает влияние значений амплитуд сигналов АЭ, характеризующих масштаб повреждений [21].

Предварительно обработанные данные использовались для обучения SOM. Количество выходных кластеров было установлено равным 10×10, т. е. 100 штук. Предварительные исследования показали, что такое количество кластеров обеспечивает удовлетворительную воспроизводимость результатов. Кластеры, в которые попало менее 1 % от всего количества зарегистрированных сигналов АЭ, принимались как шумовые и исключались из анализа.

Обученная SOM использовалась на первом этапе кластеризации. Центроиды, представляющие собой усредненные спектры всех данных в каждом полученном кластере, усреднялись с шагом 5 кГц для уменьшения размерности данных. Обработанные центроиды с использованием алгоритма *k-means* на втором этапе кластеризации объединялись до количества кластеров, характеризующих возможные структурные повреждения в ПКМ. Для работы алгоритма *k*-средних использовалась Евклидова метрика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Микроскопия

Испытанный образец был распилен по разметке согласно рис. 2 для учета распределения повреждений структуры ПКМ и оценки поврежденности волокон

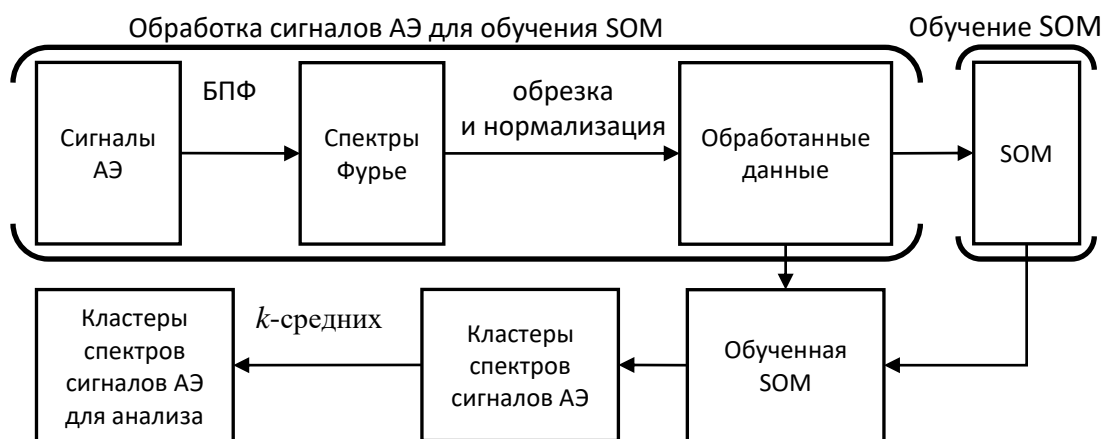


Рис. 1. Схематическое изображение методики двухстадийной кластеризации
 Fig. 1. The schematic illustration of the two-stage clustering technique

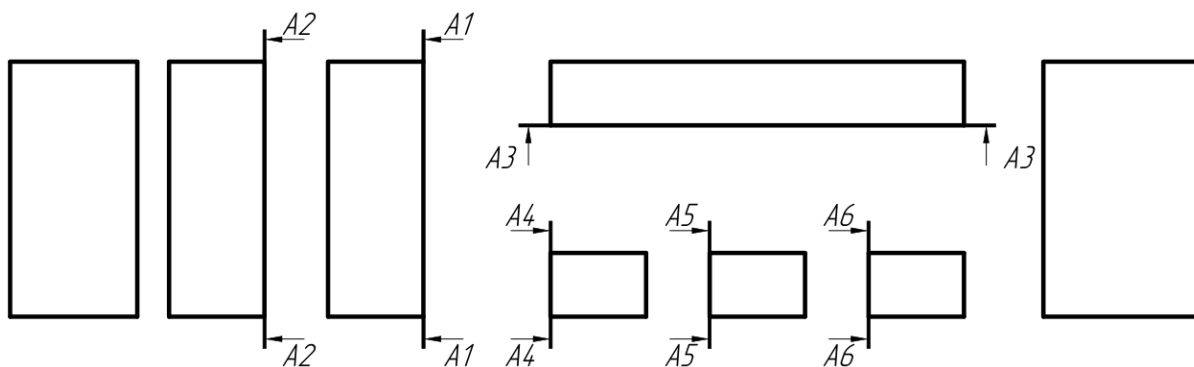


Рис. 2. Плоскости испытанного образца стеклопластика, исследуемые на наличие структурных повреждений в материале
 Fig. 2. The planes of a tested fiberglass plastic specimen examined for the presence of structural damages in the material

утка и основы ткани. Область разрушения образца находится между плоскостями A1 и A4. На рис. 3 и рис. 4 представлены полученные снимки микроструктуры испытанного образца.

Процесс разрушения при изгибном деформировании многослойных пластиков представляется сжимающими деформациями верхних слоев, располагающихся со стороны нагружающего наконечника испытательной машины, деформациями растяжения нижних слоев и чистым изгибом центральных слоев. При этом во всем сечении материала сохраняются множественные напряжения сдвига. Матрица связующего обеспечивает распределение нагрузки по армирующим волокнам, поэтому необходимо учитывать распределение образующихся повреждений по объему материала [22; 23].

Ближе к месту разрушения образца наблюдаются множественные повреждения матрицы от сжатия, приводящие к нарушению адгезии волокон основы ткани к матрице, их можно охарактеризовать как внутрислойные повреждения (рис. 3 а, 3 б). При удалении от места разрушения повреждения слоев приобретают более

распределенный характер, а их общее число становится меньше (рис. 3 с, 3 д). При рассмотрении плоскости A3 вблизи места разрушения обнаружены «кинки» (рис. 3 е). Сравнивая повреждения на границе пучков волокон и матрицы (рис. 3 ф), образованные сдвиговыми напряжениями, и внутрислойные повреждения вблизи точки изгиба (рис. 3 е) можно сделать вывод об эволюции структурных повреждений из-за нарушения адгезии на границе фаз «матрица/волокно» до нарушения структуры пучков волокон и их последующего излома.

В нижних слоях образца стеклопластика вблизи зоны изгиба также присутствуют расслоения (рис. 4 а) и отклеивание отдельных волокон от матрицы. Растягивающая нагрузка в нижних слоях стеклопластика привела к утонению волокон и их отклеиванию от матрицы связующего (рис. 4 б). При удалении от места изгиба наблюдается уменьшение доли отклеившихся волокон, а сам характер отклеивания похож на образование трещины (рис. 4 с, 4 д). Повреждение пучков волокон утка стеклоткани носит сдвиговый характер (рис. 4 е, 4 ф).

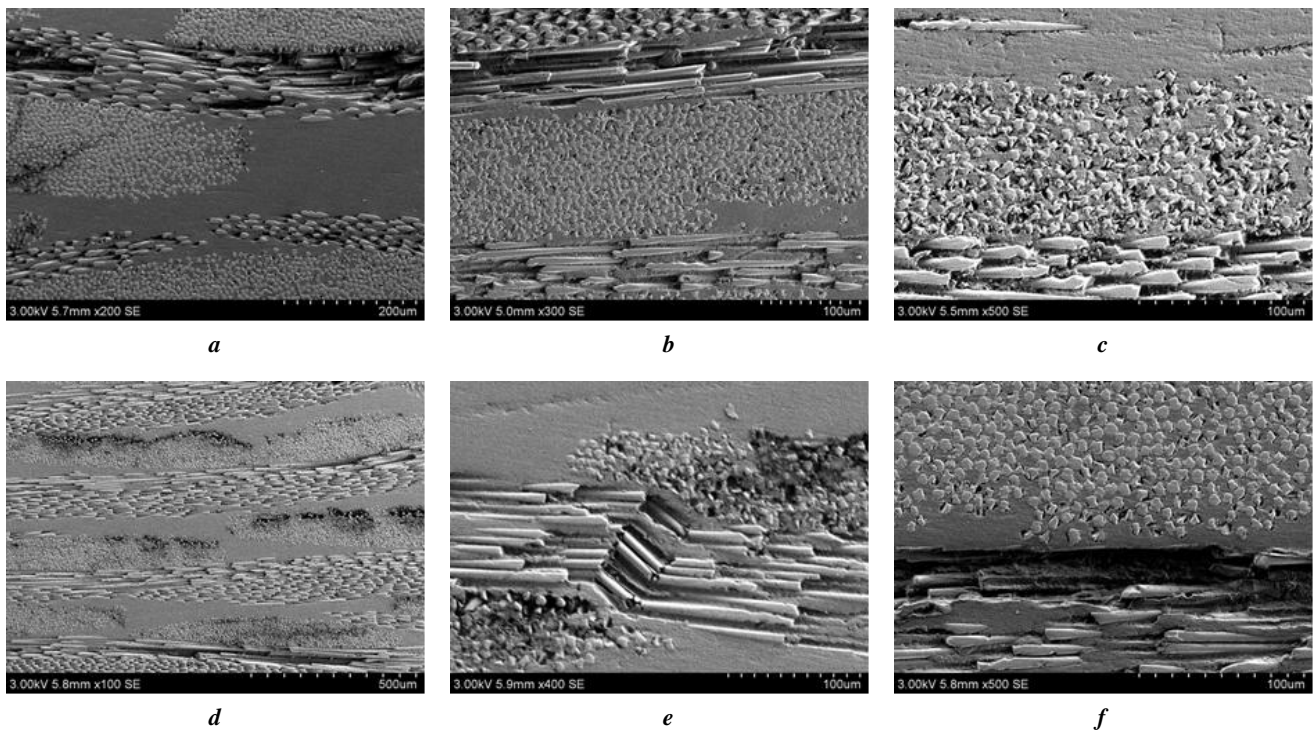


Рис. 3. Повреждения верхних слоев стеклопластика:
a – плоскость A4; *b* – плоскость A1; *c, d* – плоскость A6;
e, f – плоскость A3, движение от места излома
Fig. 3. The defects of the upper layers of a fiberglass plastic specimen:
a – A4 plane; *b* – A1 plane; *c, d* – A6 plane;
e, f – A3 plane, moving away from the fracture point

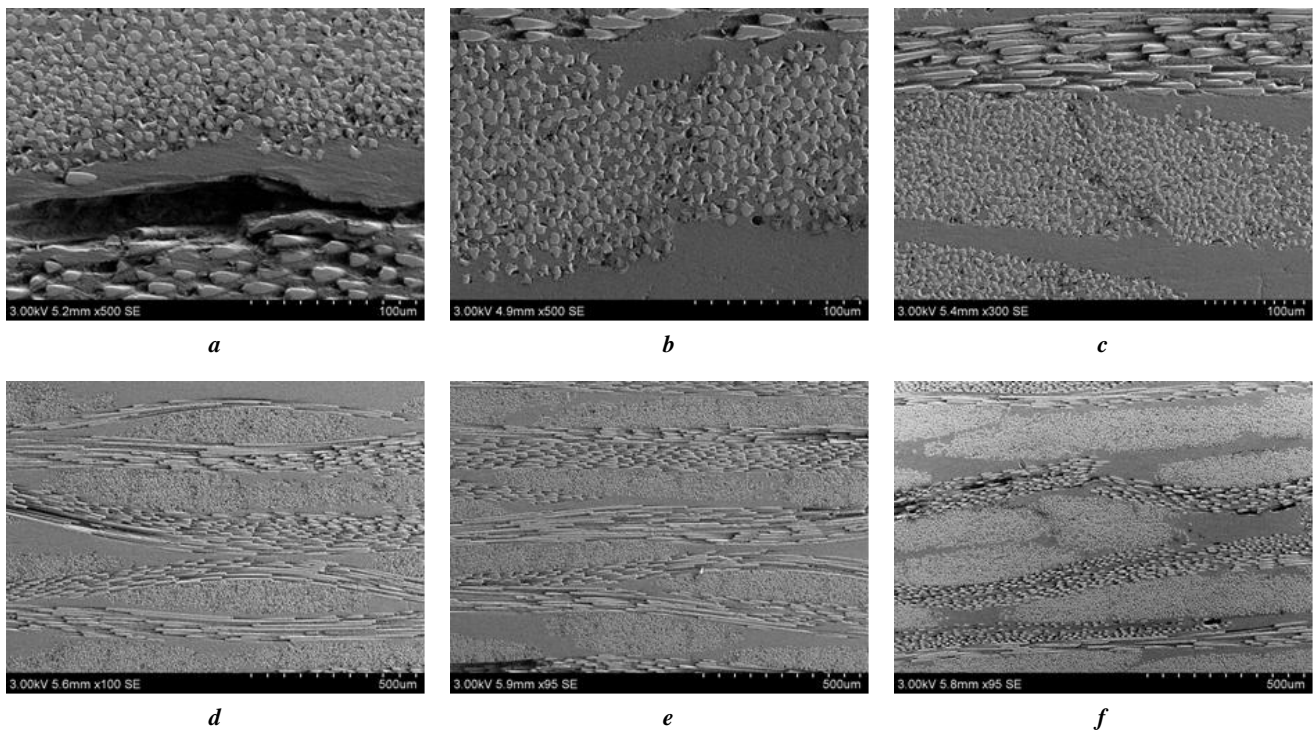


Рис. 4. Повреждения нижних слоев стеклопластика:
a – плоскость A4; *b* – плоскость A1; *c* – плоскость A5; *d* – плоскость A6;
e, f – плоскость A3, движение от места излома
Fig. 4. Defects of the lower layers of a fiberglass plastic specimen:
a – A4 plane; *b* – A1 plane; *c* – A5 plane; *d* – A6 plane;
e, f – A3 plane, moving away from the fracture point

Анализ АЭ

В результате кластеризации спектров сигналов зарегистрированной АЭ для всех испытаний были получены типовые спектры-центроиды, представленные на рис. 5.

Характеристика кластеров, соответствующих каким-либо типам повреждений, производилась по значениям пиковых частот. В работах [9; 24; 25] показано, что частоты 30–150 кГц соответствуют микроповреждениям матрицы, частоты 130–220 кГц – образованию расслоений, а частоты 230–310 кГц, 180–290 кГц и свыше 380 кГц – отклеиванию, скольжению и излому стекловолокон соответственно. Анализ данных, полученных при проведении исследований, показал, что в диапазоне частот, соответствующем микроповреждениям матрицы, можно выделить 3 пика: 25–40 кГц, 50–80 кГц и 90–

130 кГц. На этом основании было предложено охарактеризовать диапазоны пиковых частот зарегистрированных сигналов АЭ, как показано в таблице 1.

С учетом значений пиковых частот (рис. 5) и принятых частотных диапазонов (таблица 1) была получена характеристика кластеров (таблица 2). Графики накопления кластеров в процессе нагружения образца стеклопластика представлены на рис. 6.

При анализе диаграммы накопления кластеров была получена следующая характеристика процесса разрушения ПКМ, приведенная на примере одного из испытаний, которое можно считать типовым для заданных условий эксперимента.

1. В период с 720 до 760 с зарегистрировано незначительное накопление кластеров С1 и С5, характеризующих микроповреждения матрицы и повреждения по типу

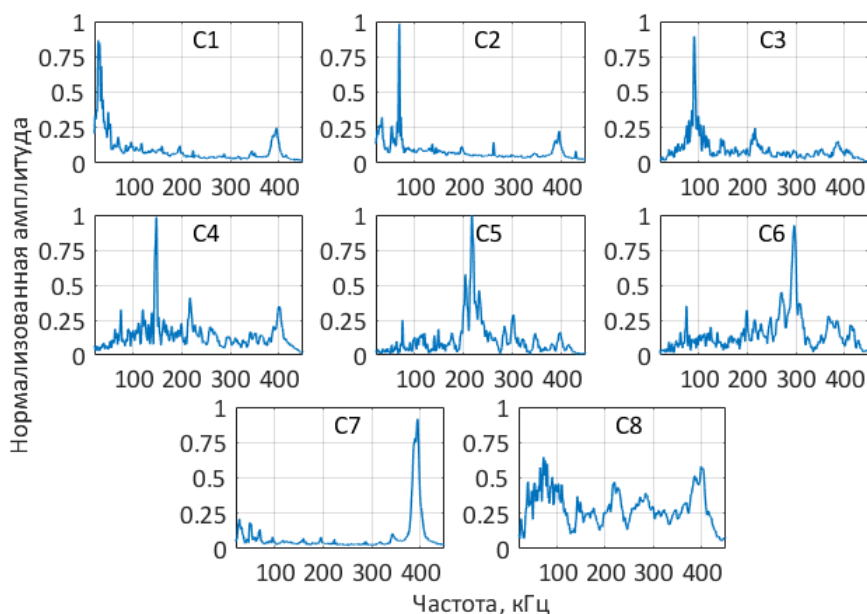


Рис. 5. Типовые спектры центроидов

Fig. 5. Typical spectra of centroids

Таблица 1. Соответствие типов повреждений диапазонам пиковых частот сигналов АЭ

Table 1. Correspondence of damage types to the ranges of AE signal peak frequency

Частоты, кГц	Тип повреждений
25–40	Микроповреждения матрицы
50–80	Повреждения матрицы промежуточного (среднего) масштаба
90–130	Макроповреждения матрицы, образование и рост трещин
140–220	Выскальзывание волокон
180–240	Образование расслоений
260–300	Отклеивание стекловолокон от матрицы
360–400	Разрушение стекловолокон

Таблица 2. Характеристика полученных кластеров
Table 2. Characteristics of the obtained clusters

Кластер, частоты, кГц	Описание кластера
C1, 24–38	Микроповреждения матрицы масштаба
C2, 50–78	Повреждения матрицы среднего масштаба
C3, 80–130	Крупные критические повреждения матрицы, такие как образование и рост трещины
C4, 145–155	Выскальзывание волокон
C5, 160–240	Образование расслоений
C6, 260–300	Отклеивание стекловолокон от матрицы
C7, 380–400	Разрушение стекловолокон
C8, 24–400	Повреждения смешанной природы

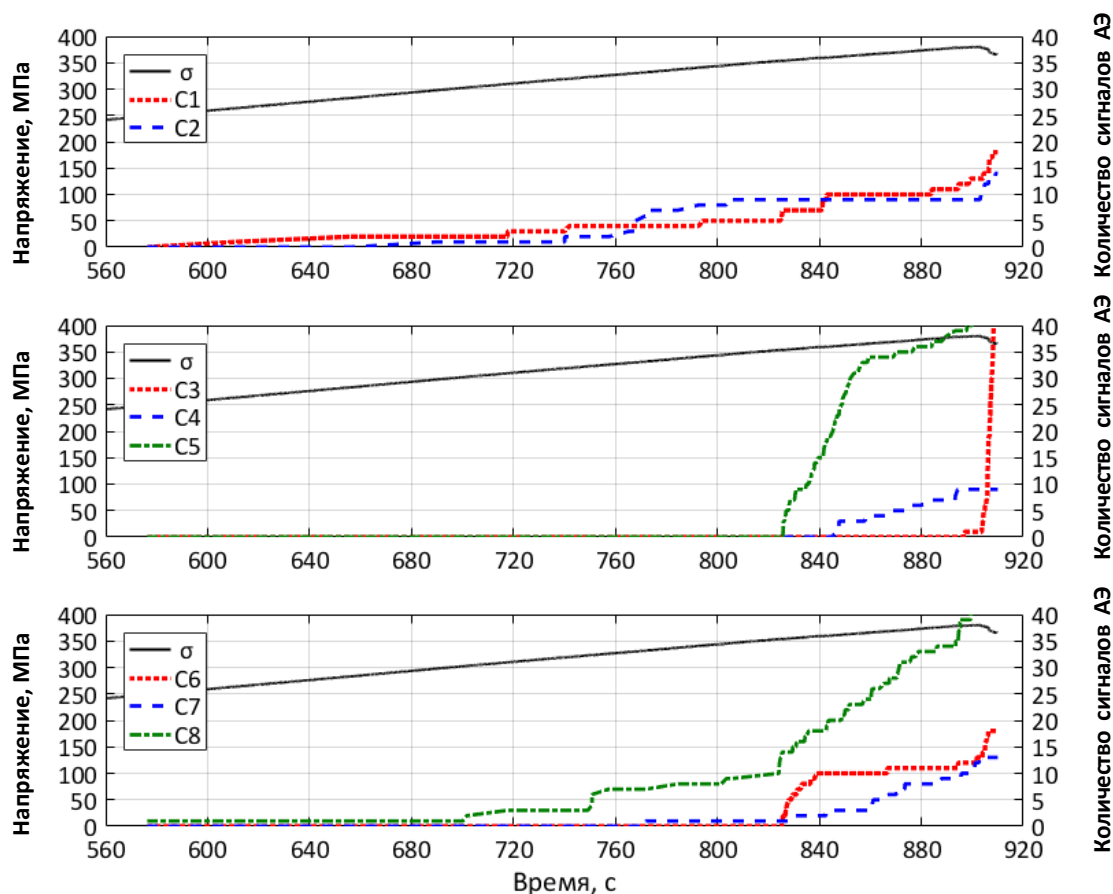


Рис. 6. Диаграмма накопления кластеров типовых повреждений в ходе механического испытания
Fig. 6. Diagram of the typical damage clusters accumulation during the mechanical test

образования расслоений. Учитывая результаты микроскопического исследования структурных повреждений, можно связать регистрируемые повреждения с повреждениями матрицы, приводящими к нарушению адгезии волокон к матрице.

2. В период с 760 до 820 с начинается рост накопления кластера C2, характеризующего повреждения мат-

рицы среднего масштаба. Регистрируется рост повреждений матрицы, связанный с увеличением сжимающей деформации верхних слоев образца.

3. В период с 820 до 840 с накапливаются кластеры C6 и C8, указывающие на начало образования повреждений смешанной природы и отклеивание волокон. Матрица накопила достаточные повреждения для потери

функции эффективного распределения поля внутренних напряжений, начинается активное разрушение волокон.

4. В период с 840 до 900 с накапливаются кластеры С4 и С7, характеризующие выскальзывание и разрушение волокон. Происходит активное разрушение материала: волокна продолжают отклеиваться, выскальзывать и изламываться в объеме материала. Характеристика разрушения на данной стадии указывает на существенные повреждения нижних слоев образца, испытывающих растягивающие деформации.

5. В период с 900 с и до разрушения регистрируются повреждения кластера С3, крупные повреждения матрицы, образование и рост трещин, разрушение образца.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [26] исследована прочность на межслоевой сдвиг стеклопластиков на основе связующего DION FR 9300, используемого в данной работе, и установлена склонность к образованию межслоевых повреждений стеклопластиков на базе этого связующего. При анализе накопления кластеров различных типов повреждений (рис. 6) была зарегистрирована активность образования межслоевых повреждений от изгибной деформации на первой стадии процесса накопления повреждений, что коррелирует с результатами исследования [26].

Описанный процесс разрушения с 1-й по 3-ю стадии можно кратко охарактеризовать зарождением повреждений на границе фаз, их развитием и накоплением в фазе связующего. В работе [27] разрушение стеклопластиков в условиях сдвиговых нагрузок характеризуется образованием микроповреждений на границе контакта матрицы с волокнами и, учитывая относительно хрупкую матрицу, их дальнейшим развитием в матрице связующего с увеличением масштаба.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Сходимость характеристики процесса разрушения стеклопластика в условиях статической деформации трехточечным изгибом с результатами исследований по оценке прочности на межслоевой сдвиг указывает на необходимость регистрации и распознавания класса повреждений, вызываемых сдвиговыми деформациями, для прогнозирования разрушения стеклопластиков и изделий из них. Исходя из полученных результатов, сделаны следующие выводы.

1. Разрушению стеклопластика предшествует образование повреждений на границе фаз матрицы и стекловолокон, их дальнейшее развитие в виде повреждений матрицы в межслоевом пространстве, что в итоге приводит к нарушению комплексности слоистой структуры композита.

2. Критерием, характеризующим начало наступления начального процесса нарушения структуры стеклопластика, выступает регистрация межслоевых повреждений. Для межслоевых повреждений матрицы был установлен диапазон частот регистрируемых сигналов АЭ 160–240 кГц.

3. Изменение масштаба повреждений матрицы, характеризующее процесс образования микроповреждений на границе фаз матрицы и волокон и их дальнейшее развитие до разрушения матрицы в межслоевом

пространстве, регистрируется изменением значений диапазона пиковых частот регистрируемых сигналов АЭ с 24–38 до 50–78 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zarif Karimi N., Minak G., Kianfar P. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission // *Composite Structures*. 2015. Vol. 131. P. 107–114. DOI: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.04.025](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.025).
- Мерсон Д.Л., Дементьев С.И., Миронов М.А., Куценко М.М., Виноградов А.Ю. Применение метода акустической эмиссии для контроля деструкционных процессов цементных бетонов // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2012. № 2. С. 41–45.
- Селезнев М.Н., Виноградов А.Ю. Применение метода акустической эмиссии для мониторинга ультразвуковых усталостных испытаний // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2021. № 2. С. 47–56. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-2-47-56](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-2-47-56).
- Hao W., Yuan Z., Tang C., Zhang L., Zhao G., Luo Y. Acoustic emission monitoring of damage progression in 3D braiding composite shafts during torsional tests // *Composite Structures*. 2019. Vol. 208. P. 141–149. DOI: [10.1016/j.compstruct.2018.10.011](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.011).
- Marec A., Thomas J.H., El Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data // *Mechanical systems and signal processing*. 2008. Vol. 22. № 6. P. 1441–1464. DOI: [10.1016/j.ymsp.2007.11.029](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.11.029).
- 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.
- Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Лазненко А.С., Кабанов С.И., Кожемякин В.Л., Чернова В.В. Статические испытания кессона композиционного крыла самолета с использованием акустической эмиссии и тензометрии // *Дефектоскопия*. 2020. № 8. С. 12–21. DOI: [10.31857/S0130308220080023](https://doi.org/10.31857/S0130308220080023).
- Xu D., Liu P.F., Chen Z.P., Leng J.X., Jiao L. Achieving robust damage mode identification of adhesive composite joints for wind turbine blade using acoustic emission and machine learning // *Composite Structures*. 2020. Vol. 236. Article number 111840. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.111840](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111840).
- Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // *Mechanical systems and signal processing*. 2011. Vol. 25. № 4. P. 1393–1407. DOI: [10.1016/j.ymsp.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.014).
- Линдеров М.Л., Зегель К., Виноградов А.Ю., Вайднер А., Бирман Х. Особенности деформации ТРИП/ТВИП сталей при различных температурах по данным акустической эмиссии // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2013. № 3. С. 208–212.

11. Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С., Шатагин Д.А. Исследование хладостойкости металлов индентированием с регистрацией сигнала акустической эмиссии // Вестник машиностроения. 2020. № 8. С. 61–64. DOI: [10.36652/0042-4633-2020-8-61-64](https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-8-61-64).
12. Аверин П.И. Интеллектуальная обработка цифровых осциллографических данных импульсов акустической эмиссии при пластической деформации металлов // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 2. С. 43–49.
13. Аверин П.И., Мельников Б.Ф. Вариант решения задачи прогнозирования признаков разрушения металлов с помощью нейронных сетей на основе данных вейвлет-анализа импульсов акустической эмиссии // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2011. № 7. С. 789–794.
14. Кабалдин Ю.Г., Лаптева И.Л., Шатагина Д.А., Аносова М.С., Зотова В.О. Разрушение конструкций при работе в условиях пониженных температур и диагностика устойчивости структурного состояния материала // Вестник машиностроения. 2016. № 1. С. 60–64.
15. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю. Автоматизированный комплекс интеллектуального мониторинга ветровых электростанций // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 1. С. 4–10.
16. Bashkov O.V., Parfenov E.E., Bashkova T.I. A soft and hardware complex for recording and processing of acoustic emission signals and for location and identification of their sources // Instruments and Experimental Techniques. 2010. Vol. 53. № 5. P. 682–687. DOI: [10.1134/S0020441210050106](https://doi.org/10.1134/S0020441210050106).
17. Hamam Z., Godin N., Fusco C., Monnier T. Modelling of fiber break as Acoustic Emission Source in Single Fiber Fragmentation Test: comparison with experimental results // Journal of Acoustic Emission. 2018. Vol. 35. P. S442–S455.
18. Sause M.G.R. On Use of Signal Features For Acoustic Emission Source Identification in Fibre-Reinforced Composites // Journal of Acoustic Emission. 2018. Vol. 35. P. S125–S136.
19. Li L., Lomov S.V., Yan X., Carvelli V. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites // Composite Structures. 2014. Vol. 116. № 1. P. 286–299. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.023).
20. Hill E.V., Foti C.J., Leung N.Y., Palacios A.E. Neural network burst pressure prediction in tall graphite-epoxy pressure vessels from acoustic emission data // Journal of Acoustic Emission. 2012. Vol. 30. P. 167–179.
21. Enoki M., Muto Y., Shiraiwa T. Evaluation of deformation behavior in LPSO-magnesium alloys by AE clustering and inverse analysis // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S71–S76.
22. Morioka K., Tomita Y. Effect of lay-up sequences on mechanical properties and fracture behavior of CFRP laminate composites // Materials Characterization. 2000. Vol. 45. № 2. P. 125–136. DOI: [10.1016/S1044-5803\(00\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00065-6).
23. Klasztorny M., Nycz D., Labuda R. Modelling, simulation and experimental validation of bend tests on GFRP laminate beam and plate specimens // Composite Structures. 2018. Vol. 184. P. 604–612. DOI: [10.1016/j.compstruct.2017.10.046](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.046).
24. Willems F., Benz J., Bonten C. Detecting the critical strain of fiber reinforced plastics by means of acoustic emission analysis // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S261–S270.
25. Sause M.G.R. Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S223–S232.
26. Лавров А.В., Баранов В.М. Метод оценки прочности полимерных композиционных материалов при межслойном сдвиге // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2015. № 86. С. 275–284.
27. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 4. С. 104–112. DOI: [10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12).

REFERENCES

1. Zarif Karimi N., Minak G., Kianfar P. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission. *Composite Structures*, 2015, vol. 131, pp. 107–114. DOI: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.04.025](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.04.025).
2. Merson D.L., Dementev S.I., Mironov M.A., Kutsenko M.M., Vinogradov A.Yu. Application of acoustic emission technique for monitoring of damage in concrete. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 2, pp. 41–45.
3. Seleznev M.N., Vinogradov A.Yu. The application of acoustic emission method for ultrasonic fatigue testing monitoring. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 2, pp. 47–56. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-2-47-56](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-2-47-56).
4. Hao W., Yuan Z., Tang C., Zhang L., Zhao G., Luo Y. Acoustic emission monitoring of damage progression in 3D braiding composite shafts during torsional tests. *Composite Structures*, 2019, vol. 208, pp. 141–149. DOI: [10.1016/j.compstruct.2018.10.011](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.011).
5. Marec A., Thomas J.H., El Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data. *Mechanical systems and signal processing*, 2008, vol. 22, no. 6, pp. 1441–1464. DOI: [10.1016/j.ymsp.2007.11.029](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.11.029).
6. Stepanova L.N., Bataev V.A., Chernova V.V. Studying the failure of a cfrp sample under static loading by the acoustic-emission and fractography methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 422–429.
7. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Laznenko A.S., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Chernova V.V. Static tests of wing box of composite aircraft wing using acoustic emission and strain gaging. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, vol. 56, no. 8, pp. 611–619. DOI: [10.31857/S0130308220080023](https://doi.org/10.31857/S0130308220080023).
8. Xu D., Liu P.F., Chen Z.P., Leng J.X., Jiao L. Achieving robust damage mode identification of adhesive composite joints for wind turbine blade using acoustic emission and machine learning. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, article number 111840. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.111840](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111840).

9. Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. *Mechanical systems and signal processing*, 2011, vol. 25, no. 4, pp. 1393–1407. DOI: [10.1016/j.ymssp.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014).
10. Linderov M.L., Zegel K., Vinogradov A.Yu., Vaydner A., Birman Kh. Effect of temperature on microstructure evolution in TRIP/TWIP steels during tensile deformation by acoustic emission data. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 208–212.
11. Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S., Shatagin D.A. Research of the cold resistance of metals by indentation with registration of an acoustic emission signal. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 8, pp. 61–64. DOI: [10.36652/0042-4633-2020-8-61-64](https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-8-61-64).
12. Averin P.I. Intellectual processing of ae pulses digital oscillographic data under plastic deformation of metals. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2013, no. 2, pp. 43–49.
13. Averin P.I., Melnikov B.F. Solution of the problem of forecasting sings of fracture of metals with the help of neural networks based on wavelet analysis of acoustic emission pulses. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*, 2011, no. 7, pp. 789–794.
14. Kabaldin Yu.G., Lapteva I.L., Shatagina D.A., Anosova M.S., Zotova V.O. Failure of structures at operating in conditions of low temperatures and diagnostics of structural state stability of material. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, no. 1, pp. 60–64.
15. Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Yu. Automated complex of intelligent monitoring of wind power plants. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*, 2022, no. 1, pp. 4–10.
16. Bashkov O.V., Parfenov E.E., Bashkova T.I. A soft and hardware complex for recording and processing of acoustic emission signals and for location and identification of their sources. *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 682–687. DOI: [10.1134/S0020441210050106](https://doi.org/10.1134/S0020441210050106).
17. Hamam Z., Godin N., Fusco C., Monnier T. Modelling of fiber break as Acoustic Emission Source in Single Fiber Fragmentation Test: comparison with experimental results. *Journal of Acoustic Emission*, 2018, vol. 35, pp. S442–S455.
18. Sause M.G.R. On Use of Signal Features For Acoustic Emission Source Identification in Fibre-Reinforced Composites. *Journal of Acoustic Emission*, 2018, vol. 35, pp. S125–S136.
19. Li L., Lomov S.V., Yan X., Carvelli V. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 2014, vol. 116, no. 1, pp. 286–299. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.023).
20. Hill E.V., Foti C.J., Leung N.Y., Palacios A.E. Neural network burst pressure prediction in tall graphite-epoxy pressure vessels from acoustic emission data. *Journal of Acoustic Emission*, 2012, vol. 30, pp. 167–179.
21. Enoki M., Muto Y., Shiraiwa T. Evaluation of deformation behavior in LPSO-magnesium alloys by AE clustering and inverse analysis. *Journal of Acoustic Emission*, 2016, vol. 33, pp. S71–S76.
22. Morioka K., Tomita Y. Effect of lay-up sequences on mechanical properties and fracture behavior of CFRP laminate composites. *Materials Characterization*, 2000, vol. 45, no. 2, pp. 125–136. DOI: [10.1016/S1044-5803\(00\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00065-6).
23. Klasztorny M., Nycz D., Labuda R. Modelling, simulation and experimental validation of bend tests on GFRP laminate beam and plate specimens. *Composite Structures*, 2018, vol. 184, pp. 604–612. DOI: [10.1016/j.compstruct.2017.10.046](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.046).
24. Willems F., Benz J., Bonten C. Detecting the critical strain of fiber reinforced plastics by means of acoustic emission analysis. *Journal of Acoustic Emission*, 2016, vol. 33, pp. S261–S270.
25. Sause M.G.R. Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites. *Journal of Acoustic Emission*, 2016, vol. 33, pp. S223–S232.
26. Lavrov A.V., Baranov V.M. The assessment of interlaminar shear strength for polymer composite materials. *Trudy Tsentralnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. Akademika A.N. Krylova*, 2015, no. 86, pp. 275–284.
27. Yakovlev N.O., Gulyaev A.I., Lashov O.A. Fracture toughness of laminated polymer composites (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 4, pp. 104–112. DOI: [10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12).

Investigation of damages formed in polymer composite materials under bending loading and their identification by the acoustic emission technique

© 2022

Anton A. Bryansky^{1,2,3}, Head of the Laboratory, junior researcher
Oleg V. Bashkov^{1,2,4}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,
 Head of Chair of Materials Science and New Material Technology, leading researcher

Inna V. Belova^{1,5}, PhD (Engineering),
 assistant professor of Chair of Materials Science and New Material Technology

Tatyana I. Bashkova^{1,6}, PhD (Engineering),
 assistant professor of Chair of Materials Science and New Material Technology

¹Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur (Russia)²Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok (Russia)*E-mail: bryansky.aa@yandex.ru³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7992-0165>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-9797>⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0560-2855>⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7070-5821>

Received 25.03.2022

Accepted 08.06.2022

Abstract: Polymer composite materials (PCM) reinforced with glass fibers are very important in many industries due to their unique properties (high chemical resistance and specific strength) with the economic efficiency of use. At the same time, the application of glass fabrics as reinforcing elements ensures high manufacturability. However, unlike crystalline materials, polymer composite materials are subject to the complex process of destruction, which requires the application of non-destructive control methods to get information about the nature of the resulting damage and the kinetics of their accumulation. The paper studies the deteriorations formed in the fiberglass samples molded using T-11-GVS-9 glass fabric and DION 9300 FR binder within static bending deformation accompanied by the acoustic emission (AE) method. In this work, the authors solved the problem of identifying the nature of damages in fiberglass using the Fourier spectra of the recorded AE signals. The authors used the clustering method to estimate their formation and development kinetics. Clustering was performed based on the Kohonen self-organizing map (SOM) algorithm using the values of peak frequencies of the Fourier spectra calculated for the recorded AE signals under static bending deformation of a fiberglass sample up to failure. To ensure the separability of the resulting damages according to the AE parameters, the authors used the loading rate that was ten times lower than that calculated according to the state standard. The study established that the application of frequency representation of AE signals recorded during the fiberglass destruction is effective when solving the task of identifying the nature of the resulting damages. As a result of the study, the authors found that the process of delamination formation during the bending of multilayer laminated plastics acts as a critical mechanism of destruction leading to a significant loss of the polymer composite strength properties.

Keywords: PCM; fiberglass; destruction; acoustic emission; clustering; optical microscopy.

Acknowledgements: The research is carried out under the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 21-19-00896.

For citation: Bryansky A.A., Bashkov O.V., Belova I.V., Bashkova T.I. Investigation of damages formed in polymer composite materials under bending loading and their identification by the acoustic emission technique. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 7–16. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.