

Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения

© 2021

Брянский Антон Александрович^{*1}, аспирант

Башков Олег Викторович², доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой материаловедения и технологии новых материалов

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

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

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

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7992-0165>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-9797>

Аннотация: Структура полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет добиться высоких показателей механических свойств, но в то же время сильно чувствительна к образованию внутренних дефектов. Поэтому при проектировании, изготовлении изделий и оценке их надежности в условиях эксплуатации большое внимание уделяется методам неразрушающего контроля, среди которых для исследования структурных изменений в материале при внешнем воздействии себя зарекомендовал метод акустической эмиссии (АЭ). Работа посвящена выявлению типовых повреждений в образцах стеклопластика, изготовленного из стеклоткани Т11-ГВС9 и связующего DION 9300 FR, в условиях циклического растяжения с использованием метода АЭ. В работе решалась задача выбора информативных параметров АЭ и использовался метод кластеризации для идентификации природы источников АЭ и кинетики их образования. Кластеризация выполнялась на основе метода самоорганизующейся картой Кохонена (SOM) по спектрам Фурье, рассчитанным для зарегистрированных в процессе циклических испытаний сигналов АЭ. На основании анализа пиковых частот полученных кластеров определялась их природа и рассчитывались периоды критического накопления. При характеристике источников АЭ также использовался анализ пиковых частот вейвлет-спектров, выполненный для различных уровней декомпозиции. Определение стадий накопления повреждений образцов во время испытания выполнялось на основании использования материалов собственных исследований и исследований других авторов. Установлено, что по регистрации сигналов АЭ, идентифицированных как нарушение адгезии, можно выявить начало разрушения материала, а по охарактеризованному локальному образованию микроповреждений матрицы и излому волокон можно спрогнозировать разрушение ПКМ.

Ключевые слова: ПКМ; стеклопластик; циклическое нагружение; АЭ.

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

Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

Для цитирования: Брянский А.А., Башков О.В. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 3. С. 19–27. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-19-27.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ акустической эмиссии (АЭ), генерируемой полимерным композиционным материалом (ПКМ) при его нагружении, зачастую представляет собой нетривиальную задачу. Сложная структура наполнителя и межфазные взаимодействия с матрицей связующего характеризуют образование в материале различных типов повреждений, их последовательности и комбинаций, что оказывает влияние на регистрируемые и расчетные параметры.

Многие модели разрушения слоистых пластиков основываются на статическом растяжении или изгибе и могут быть использованы для определения доминантных типов повреждений и их дальнейшей классификации по параметрам АЭ. Однако, когда заранее сложно оценить процессы разрушения, как в случае усталостного механического нагружения, применение нашли алгоритмы кластеризации параметров АЭ.

Для описания зарегистрированной АЭ наиболее часто применяются такие параметры, как амплитуда, время нарастания и длительность сигнала, энергия, медианная и пиковые частоты [1–3]. В работе [4] показана эффективность идентификации повреждений полимерного композита по пиковой частоте регистрируемых сигналов АЭ, подтверждаемая результатами микроскопических исследований. Однако более эффективен анализ сразу нескольких параметров, что позволяет обойти ограничения каждого параметра, взятого в отдельности. Например, в работе [5] идентификация кластеров повреждений стеклопластика с выделением типов повреждений матрицы связующего выполнена по распределению амплитуд и длительности сигналов АЭ.

В [6] наиболее эффективные параметры сигналов АЭ для анализа выбраны путем применения метода оценки Лапласиана. Высокие значения оценки Лапласиана, указывающие на высокую репрезентативность данных, были получены для пиковой амплитуды, пиковой

и медианной частот. Таким образом, можно сделать вывод, что форма сигналов или их частотное представление выступает набором параметров АЭ, позволяющих с высокой точностью идентифицировать структурные изменения и их особенности [7–9].

Для характеристики сигналов АЭ также могут использоваться параметры уровней вейвлет-декомпозиции [2; 10]. Ранее авторами [11] была апробирована методика анализа на основе вейвлета Добеши 14-го порядка для 7 уровней декомпозиции сигналов АЭ. Методика состояла в том, что каждому уровню декомпозиции в соответствии с его частотным диапазоном сопоставили определенный тип повреждения. Эта классификация была выполнена на основе анализа пиковых частот, характеризующих различные типы повреждений. Данная методика апробирована при анализе сигналов АЭ, зарегистрированных при трехточечном статическом изгибе образцов стеклопластика.

Одним из эффективных методов статистического анализа АЭ является кластеризация данных. В случаях отсутствия характеризующей информации о параметрах применяются методы с обучением без учителя, т. е. без обучающей выборки (unsupervised methods). К ним можно отнести алгоритм *k*-средних (*k*-means) [2] и самоорганизующуюся карту Кохонена (self-organizing map, SOM) [12–14].

В работах [6; 13; 14] для задачи кластеризации успешно были применены методы смешанного анализа амплитуд и частотных составляющих сигналов АЭ. В [15] для кластеризации сигналов авторы использовали параметры энергии и пиковых частот.

Многие исследователи отмечают возможность применения частотного представления сигналов как набора характеристик различных типов повреждений. Однако из частотного представления сигналов выбираются только несколько параметров, такие как пиковая и медианная частоты [16], хотя алгоритмы кластеризации позволяют использовать многопараметрические данные.

Цель исследования – идентификация повреждений, возникающих в структуре ПКМ в процессе циклического нагружения.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись образцы в виде лопаток, вырезанные из плиты стеклопластика, с прямоугольным сечением 10×10 мм. Плита была изготовлена методом вакуумной инфузии с использованием эпоксидно-винилэфирного связующего DION 9300 FR и 46 слоев стеклоткани T11-ГВС9.

Механические испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине методом цикличе-

ского растяжения. Значение нагрузки было выбрано равным половине от разрушающей и составляло 300 МПа.

Регистрация АЭ проводилась на программно-аппаратном комплексе АЕ 2.1 Pro с использованием широкополосного датчика GT301 (50–550 кГц). Обработка зарегистрированных сигналов АЭ выполнялась по схеме, приведенной на рис. 1, в среде MATLAB.

Кластеризация данных была реализована в виде двух этапов: кластеризация самоорганизующейся картой Кохонена и последующая кластеризация полученных центроидов с использованием алгоритма *k*-means. Для зарегистрированных сигналов АЭ рассчитывались спектры Фурье, из которых бралась только информативная часть (24–450 кГц), содержащая характеристическую информацию о процессах разрушения в ПКМ [6; 17; 18], и их последующая нормализация. Ограничение анализируемой части спектра производилось для снижения влияния шумов, характеризующихся очень низкими и очень высокими частотами [12], а нормализация спектров снижает влияние амплитуды сигналов [15]. Полученные спектры подавались на вход самоорганизующейся карты Кохонена. Количество выходных кластеров (100 штук) было подобрано опытным путем при оценке воспроизводимости результатов кластеризации, в том числе и для других типов механических испытаний [19]. Большое количество кластеров позволяет выделить сигналы АЭ от образующихся повреждений смешанной природы в материале и сигналы шума отдельно [12].

Далее кластеры объединялись по схожести их центроидов. Однако малое количество данных (100 центроидов) и большое количество их параметров (1352 точки) приводит к неудовлетворительным результатам кластеризации [7]. Снижение размерности данных, а в данном случае снижение разрешения спектров (центроидов), позволяет повысить эффективность применения *k*-means и других алгоритмов [15]. Разрешение центроидов понижалось до шага в 5 кГц (86 точек). С учетом числа возможных типов повреждений и их комбинаций количество выходных кластеров было принято равным 25. Кластеры объединялись с условием, что центроид наибольшего кластера первого этапа в составе кластера второго этапа принимался характеризующим кластер второго этапа.

Анализ кривых накопления каждого кластера сигналов АЭ проводился по изменению кривой наклона интенсивности их накопления. Наибольшую информационную ценность представляет активное развитие повреждений определенного типа, а не сама констатация его образования. Учитывая, что процесс активного развития дефекта характеризуется циклическостью регистрации



Рис. 1. Схема обработки зарегистрированных сигналов АЭ
Fig. 1. Scheme for the recorded AE signals processing

событий АЭ [20] и нелинейным характером накопления повреждений в материалах с комплексной структурой [21], за порог активности образования определенного типа повреждений было принято значение активности АЭ, равное 2 с^{-1} .

Масштаб образования повреждений в материале (локальных или глобальных) оценивался по разбросу пиковых частот каждого уровня декомпозиции. Если учитывать влияние длины пути распространения акустической волны от повреждения до преобразователя АЭ на пиковую частоту регистрируемого сигнала [2], разброс значений пиковых частот каждого уровня позволяет оценить масштаб (локальный или глобальный) образующихся повреждений в объеме материала. Для анализа были выбраны медианные значения пиковых частот и значения стандартного отклонения. При этом по медианному значению пиковой амплитуды определялся преобладающий тип повреждения ПКМ или его масштаб, а по стандартному отклонению значений оценивался объем образующихся повреждений. Границы стадий брались из анализа накопления кластеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Двухэтапная кластеризация (SOM и k-means)

В результате обработки сигналов АЭ по схеме, приведенной на рис. 1, было получено 18 кластеров. Характеристика кластеров, как соответствующих конкретным типам повреждений, производилась по значениям пиковых частот. В работах [2; 6; 7] установлено, что частоты 30–150 кГц соответствуют микроповреждениям матрицы, частоты 130–220 кГц – образованию расслоений, а частоты 230–310 кГц, 180–290 кГц и выше 380 кГц – отклеиванию, скольжению и излому стекловолокон соответственно. В данном исследовании в диапазоне частот, характеризующем микроповреждения матрицы, можно выделить 4 пика: 25–40, 55–70, 80 и 100–105 кГц.

При испытании образцов из чистого связующего трехточечным изгибом в момент скольжения образца по опорам зарегистрированы сигналы АЭ с пиковой частотой около 68 кГц. При испытании образца на растяжения в момент внедрения зажимов испытательной

машины в поверхность связующего и ее повреждения зарегистрированы сигналы АЭ с пиковыми частотами 27 и 67 кГц. При испытании ПКМ на трехточечный изгиб повреждения матрицы характеризуются диапазоном пиковых частот 24–110 кГц. На основании этих данных было принято, что частоты 30–70 и 80 кГц характеризуют повреждения матрицы масштаба 1 и 2 (микроповреждения сдвига и сжатия), 100 кГц характеризуют повреждения матрицы масштаба 3 (сколы, разрывы), а 130–150 кГц указывают на повреждения матрицы по типу образования расслоений. Соответствие частот типам образующихся повреждений, принятых в данной работе, приведено в таблице 1.

В таблице 2 приведены пиковые частоты полученных кластеров спектров сигналов АЭ. Введение кластера смешанных повреждений позволяет частично решить проблему высокой активности АЭ, приводящей к регистрации различных повреждений в виде одного длительного акустического сигнала [12].

Для решения задачи определения стадийности процесса разрушения важна последовательность и совместность образующихся дефектов. Поэтому для каждого кластера были определены периоды, в которых интенсивность регистрации событий каждого типа повреждений превышает порог активности АЭ, равный 2 с^{-1} . Периоды активного накопления каждого кластера представлены на рис. 2.

В первую очередь выделены периоды повреждения только матрицы масштаба 1 и стекловолокон, которые были приняты границами стадий. В итоге было выделено 5 стадий. Все стадии разрушения материала можно охарактеризовать постоянным образованием комбинированных повреждений матрицы с волокнами и отдельными повреждениями матрицы. Отдельно стоит выделить накопление отдельных повреждений стекловолокон, которое от стадии к стадии становится интенсивнее.

Стадия I. В большей степени характеризуется повреждениями матрицы масштабом не больше 2. Повреждения волокон в самом начале стадии, скорее всего, вызваны повреждением материала в захватах испытательной машины.

Стадия II. Образуются комбинированные повреждения матрицы с волокнами. Иницируется межслоевая

Таблица 1. Характеристика типов повреждений по частотам
Table 1. Characteristics of damage types by frequency

Частоты, кГц	Тип образующегося повреждения
30–70, 80 и 100	Повреждения матрицы масштаба 1, 2 и 3 соответственно
130–150	Критические повреждения матрицы (межслоевые повреждения)
150–220	Образование расслоений
180–260	Скольжение волокон
270–310	Отклеивание волокон
360–400	Излом волокон

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

№	Частоты, кГц	Описание
RC1	35, 100, 380–400 (60, 80)	Совместное повреждение матрицы и волокон
RC2	370–400	Излом стекловолокон
RC3	35–400	Смешанное разрушение различных типов
RC4	35	Повреждения матрицы масштаба 1
RC5	170–260, 300, 360–400 (35–130)	Отклеивание, выскальзывание и излом волокон
RC6	300–310, 360–380 (240–250)	Отклеивание и излом волокон
RC7	30, 80 (60, 100)	Повреждения матрицы с преобладанием масштабов 1 и 2
RC8	30–60 (80–100)	Повреждение матрицы с преобладанием масштаба 1
RC9	100	Повреждения матрицы масштаба 3
RC10	60–80	Повреждение матрицы масштаба 2
RC11	100 (30–80)	Повреждение матрицы с преобладанием масштаба 3
RC12	60–80, 380 (30, 100)	Совместное повреждение матрицы масштаба 2 и волокон
RC13	200–240 (270–300, 360–400)	Образование расслоений, повреждение стекловолокон
RC14	170–180, 360–380	Выскальзывание и излом волокон
RC15	80	Повреждение матрицы масштаба 2
RC16	180 (30–130, 380)	Межслоевое повреждение матрицы (расслоения)
RC17	30, 80–130, 150	Критические повреждения матрицы
RC18	100, 360–380	Совместное повреждение матрицы масштаба 3 и волокон

Примечания. В скобках указаны менее выраженные частоты. RC – переработанные кластеры (reworked clusters)

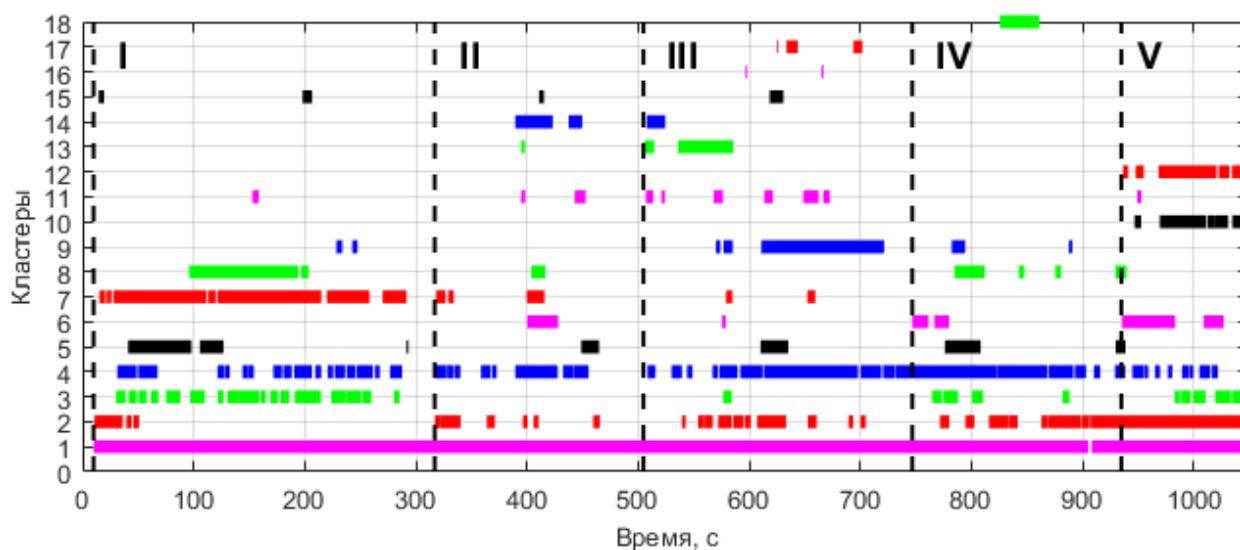


Рис. 2. Превышение порога интенсивности накопления каждого типа кластеров в ходе испытания
Fig. 2. Exceeding the threshold intensity of accumulation of each type clusters during testing

трещина, которая приводит к повреждениям матрицы масштаба 3, а также к более сложному и интенсивному повреждению волокон.

Стадия III. Продолжается образование комбинированных повреждений матрицы и волокон, рост межслоевой трещины в материале. С середины стадии регистрируются периодические критические повреждения матрицы, существенно растет интенсивность образования поврежденных матрицы масштаба 3.

Стадия IV. Процесс образования комбинированных повреждений матрицы и волокон становится более однородным и сопровождается периодической регистрацией смешанных повреждений материала. При этом повреждения матрицы представлены масштабом 1, а механизм повреждения волокон в основном представлен только изломом волокон.

Стадия V. Масштаб повреждений матрицы при комбинированном образовании повреждений с волокнами возрастает до масштаба 2. Образуются смешанные повреждения материала и повреждение матрицы масштабами 1 и 2 с преобладанием масштаба 2.

Вейвлет-декомпозиция

В таблице 3 приведены диапазоны частот, рассчитанные по уровням вейвлет-декомпозиции, с установленным им соответствием типов повреждений. Анализ был выполнен по медианным значениям пиковых частот и значениям стандартного отклонения (рис. 3).

На первой стадии разрушения материала повреждения матрицы масштаба 1 и более крупные повреждения протекают локально с тенденцией снижения масштаба образующихся повреждений. Повреждения, связанные со стекловолокнами, представлены в основном нарушением адгезии к связующему.

Масштаб повреждений матрицы на второй стадии начинает принимать глобальный характер. Интенсивность отклеивания волокон снижается, и начинается их излом в объеме материала.

На третьей стадии повреждения матрицы происходят локально, но с ростом их масштаба (предположительно в центре образца). Излом волокон вновь приоб-

ретает локальный характер, а повреждения по типу нарушения адгезии образуются хаотично.

На четвертой стадии сохраняется рост масштаба повреждений матрицы с их локальным образованием. Происходит активное глобальное отклеивание и скольжение волокон с их последующим изломом.

Пятая стадия характеризуется глобальными критическими повреждениями материала и разрушением образца.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [22] процесс разрушения образца углепластика при статическом растяжении изучен с использованием акустического импульсного микроскопа. Начало разрушения зарегистрировано образованием микроповреждений матрицы вдоль волокон и их отклеиванием. Процесс разрушения продолжается накоплением повреждений внутри слоев с развитием макроскопических повреждений – расслоений, вплоть до разрыва образца. В работе [2] получена схожая характеристика разрушения углепластика при статическом растяжении. Соответственно, сделан вывод, что процесс накопления повреждений при циклическом и статическом растяжении имеет схожую природу и последовательность, что также отмечается в работе [23]. Во многих исследованиях механические испытания проводятся согласно принятым стандартам, в то время как при эксплуатации изделий из ПКМ возможны нагрузки с различными значениями силы и вектора их приложения. Поэтому необходимы дальнейшие исследования ПКМ в условиях циклического нагружения с различными уровнями нагрузки.

Стадийность разрушения, полученная в работе [22], сопоставима с полученной в данной работе, однако выделенная стадия I, предшествующая нарушению адгезии волокон к матрице связующего, позволяет зарегистрировать начало микроскопического разрушения материала. Схожий результат – регистрация повреждений отдельных стекловолокон на начальных этапах нагружения – получен для ПКМ, наполненных короткими волокнами [1]. Таким образом, возможно не только

Таблица 3. Частотные диапазоны уровней декомпозиции
Table 3. Frequency ranges of decomposition levels

Уровень декомпозиции	Диапазон частот, кГц	Типы повреждений
1	1250–2500	–
2	625–1250	–
3	312,5–625	Разрушение стекловолокон
4	156,25–312,5	Нарушение адгезии (расслоение, отклеивание волокон)
5	78,13–156,25	Критические повреждения матрицы
6	39,06–78,13	Крупные повреждения матрицы
7	19,53–39,06	Микроповреждения матрицы

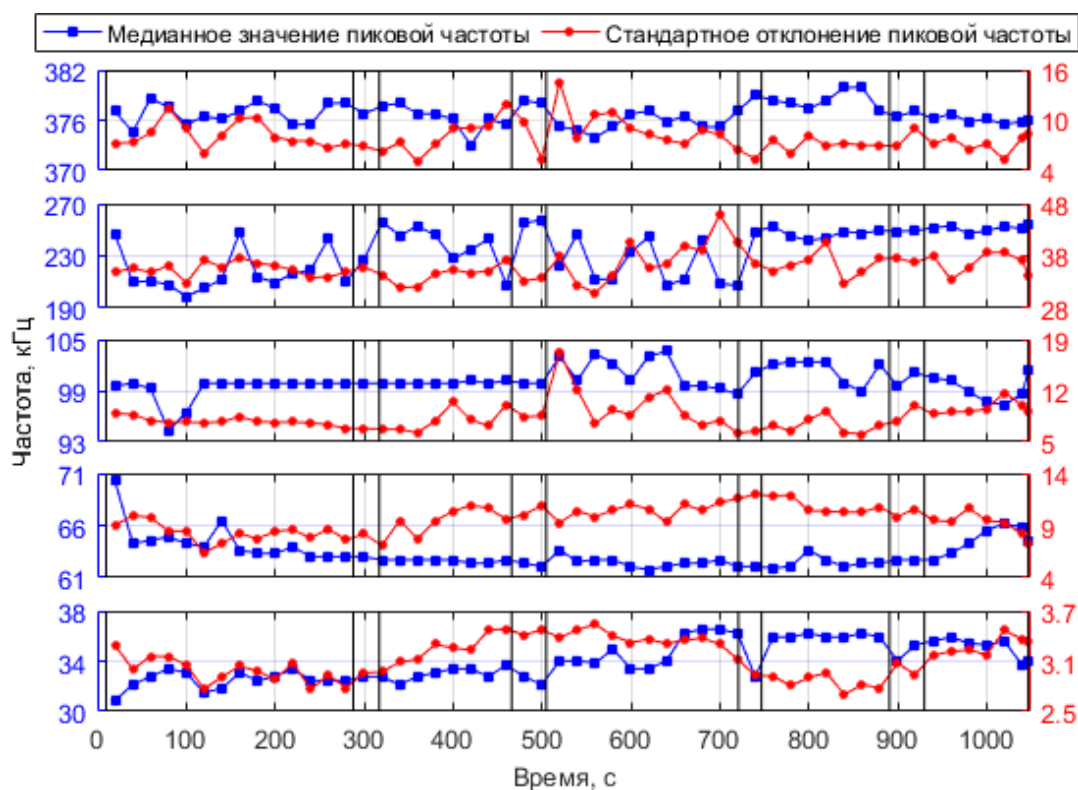


Рис. 3. Изменение медианного значения пиковых частот и их стандартного отклонения для уровней декомпозиции с 3 по 7 (сверху вниз)

Fig. 3. Change in the median value of the peak frequencies and their standard deviation for decomposition levels from 3 to 7 (from top to bottom)

выделить процессы, приводящие к снижению несущей способности ПКМ, но и зарегистрировать предшествующие процессы образования повреждений.

Если сравнивать результаты анализа вейвлет-декомпозиции сигналов АЭ данной работы и результаты зарубежного исследования с использованием аналогичной методики [24], информация о статическом распределении параметров уровней вейвлет-декомпозиции может быть использована для оценки масштаба повреждений и их распределения в объеме материала. Несмотря на полученный результат, данная методика нуждается в дополнительных исследованиях с другими типами ПКМ и способа нагружения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании двух методов анализа данных АЭ выполнена идентификация типов разрушения и выделены стадии накопления повреждений в образцах ПКМ при циклическом нагружении.

Инициация разрушения ПКМ начинается с повреждений матрицы, приводящих к нарушению адгезии как между связующим и наполнителем, так и между слоями ПКМ. Нарушение структуры материала переходит в хаотический процесс, заканчивающийся изломом основной части волокон и крупномасштабными повреждениями матрицы вплоть до излома.

Установлено, что по локальному образованию микроповреждений матрицы и излому части волокон

можно выявить и предупредить разрушение материала, а по регистрации повреждений по типу нарушения адгезии можно фиксировать начало разрушения материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. 525–534.
2. 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.ymssp.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014).
3. Шилова А.И., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С., Лямин Ю.Б. Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2013. № 4. С. 169–179. DOI: [10.15593/perm.mech/2013.4.169-179](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2013.4.169-179).
4. Nikbakht M., Yousefi J., Hosseini-Toudeshky H., Minak G. Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization //

- Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 113. P. 185–196. DOI: [10.1016/j.compositesb.2016.11.047](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.047).
5. Ech-Choudany Y., Assarar M., Scida D., Morain-Nicolier F., Bellach B. Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // *Applied Acoustics*. 2017. Vol. 123. P. 123–132. DOI: [10.1016/j.apacoust.2017.03.008](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.008).
 6. 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. P. 286–299. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.023).
 7. Sause M.G.R. Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites // *Journal of Acoustic Emission*. 2016. Vol. 33. P. 441–450.
 8. Иванов В.И., Белов П.А., Насибуллин Т.С. Дефекты в композиционных материалах как источники акустической эмиссии // *Знание*. 2016. № 3-2. С. 23–29.
 9. De Oliveira R., Marques A.T. Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks // *Computers & structures*. 2008. Vol. 86. № 3-5. P. 367–373. DOI: [10.1016/j.compstruc.2007.02.015](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.02.015).
 10. Qi G., Barhorst A., Hashemi J., Kamala G. Discrete wavelet decomposition of acoustic emission signals from carbon-fiber-reinforced composites // *Composites Science and Technology*. 1997. Vol. 57. № 4. P. 389–403. DOI: [10.1016/S0266-3538\(96\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00157-1).
 11. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Bashkov I.O., Solovlev D.B. PCM bearing capacity prediction criteria development based on registered AE parameters // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. № 6. Article number 062105. DOI: [10.1088/1755-1315/459/6/062105](https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/6/062105).
 12. Hill E.v.K., 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. 167–180.
 13. Li L., Lomov S.V., Yan X. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading // *Composite structures*. 2015. Vol. 123. P. 45–53. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.12.029](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.029).
 14. 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).
 15. 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. 145–150.
 16. Bohmann T., Schlamp M., Ehrlich I. Acoustic emission of material damages in glass fibre-reinforced plastics // *Composites Part B-Engineering*. 2018. Vol. 155. P. 444–451. DOI: [10.1016/j.compositesb.2018.09.018](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.018).
 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. 1–12.
 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. 1–12.
 19. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P., Solovlev D.B. Investigation of the Staging of Damage Accumulation in Polymer Composite Materials during Bending and Tensile Tests // *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887. P. 116–122. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.887.116](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.116).
 20. Chernov D.V., Matyunin V.M., Barat V.A., Marchenkov A.Y., Elizarov S.V. Investigation of acoustic emission in low-carbon steels during development of fatigue cracks // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. Vol. 54. № 9. P. 638–647. DOI: [10.1134/S1061830918090024](https://doi.org/10.1134/S1061830918090024).
 21. Бардаков В.В., Сагайдак А.И., Елизаров С.В. Акустическая эмиссия перестроенных железобетонных балок // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 9. С. 4–12. DOI: [10.14489/td.2019.09.pp.004-012](https://doi.org/10.14489/td.2019.09.pp.004-012).
 22. Петронюк Ю.С., Левин В.М., Мороков Е.С., Рыжова Т.Б., Чернов А.В., Гулевский И.В. Изучение динамики развития микродефектов в углепластиках под воздействием механических нагрузок методами ультразвуковой микроскопии // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2016. Т. 80. № 10. С. 1363–1368. DOI: [10.7868/S0367676516100185](https://doi.org/10.7868/S0367676516100185).
 23. Roundi W., El Mahi A., El Gharad A., Rebiere J.L. Acoustic emission monitoring of damage progression in glass/epoxy composites during static and fatigue tensile tests // *Applied Acoustics*. 2018. Vol. 132. P. 124–134. DOI: [10.1016/j.apacoust.2017.11.017](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.017).
 24. Kumar C.S., Arumugam V., Sajith S., Dhakal H.N., John R. Acoustic emission characterisation of failure modes in hemp/epoxy and glass/epoxy composite laminates // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2015. Vol. 34. № 4. Article number 31. DOI: [10.1007/s10921-015-0306-8](https://doi.org/10.1007/s10921-015-0306-8).

REFERENCES

1. 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. 525–534.
2. 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.ymsp.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.014).
3. Shilova A.I., Vildeman V.E., Lobanov D.S., Lyamin Yu.B. Researching mechanisms of carbon composites fracture based on the mechanical tests monitoring acoustic emission. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2013, no. 4, pp. 169–179. DOI: [10.15593/perm.mech/2013.4.169-179](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2013.4.169-179).
4. Nikbakht M., Yousefi J., Hosseini-Toudeshky H., Minak G. Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization.

- Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 113, pp. 185–196. DOI: [10.1016/j.compositesb.2016.11.047](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.047).
5. Ech-Choudany Y., Assarar M., Scida D., Morain-Nicolier F., Bellach B. Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates. *Applied Acoustics*, 2017, vol. 123, pp. 123–132. DOI: [10.1016/j.apacoust.2017.03.008](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.008).
 6. 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, pp. 286–299. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.023).
 7. Sause M.G.R. Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites. *Journal of Acoustic Emission*, 2016, vol. 33, pp. 441–450.
 8. Ivanov V.I., Belov P.A., Nasibullin T.S. Defects in composite materials as sources of acoustic emission. *Znanie*, 2016, no. 3-2, pp. 23–29.
 9. De Oliveira R., Marques A.T. Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks. *Computers & structures*, 2008, vol. 86, no. 3-5, pp. 367–373. DOI: [10.1016/j.compstruc.2007.02.015](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.02.015).
 10. Qi G., Barhorst A., Hashemi J., Kamala G. Discrete wavelet decomposition of acoustic emission signals from carbon-fiber-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 1997, vol. 57, no. 4, pp. 389–403. DOI: [10.1016/S0266-3538\(96\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00157-1).
 11. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Bashkov I.O., Solovlev D.B. PCM bearing capacity prediction criteria development based on registered AE parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 459, no. 6, article number 062105. DOI: [10.1088/1755-1315/459/6/062105](https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/6/062105).
 12. Hill E.v.K., 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. 167–180.
 13. Li L., Lomov S.V., Yan X. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading. *Composite structures*, 2015, vol. 123, pp. 45–53. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.12.029](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.029).
 14. 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).
 15. 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. 145–150.
 16. Bohmann T., Schlamp M., Ehrlich I. Acoustic emission of material damages in glass fibre-reinforced plastics. *Composites Part B-Engineering*, 2018, vol. 155, pp. 444–451. DOI: [10.1016/j.compositesb.2018.09.018](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.018).
 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. 1–12.
 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. 1–12.
 19. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P., Solovlev D.B. Investigation of the Staging of Damage Accumulation in Polymer Composite Materials during Bending and Tensile Tests. *Key Engineering Materials*, 2021, vol. 887, pp. 116–122. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.887.116](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.116).
 20. Chernov D.V., Matyunin V.M., Barat V.A., Marchenkov A.Y., Elizarov S.V. Investigation of acoustic emission in low-carbon steels during development of fatigue cracks. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 9, pp. 638–647.
 21. Bardakov V.V., Sagaydak A.I., Elizarov S.V. Acoustic emission behaviour of over-reinforced concrete beams. *Kontrol. Diagnostika*, 2019, no. 9, pp. 4–12. DOI: [10.1134/S1061830918090024](https://doi.org/10.1134/S1061830918090024).
 22. Petronyuk Y.S., Levin V.M., Morokov E.S., Ryzhova T.B., Chernov A.V., Gulevsky I.V. Studying the dynamics of microdefect growth in carbon fiber reinforced plastics under mechanical loading by means of ultrasonic microscopy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2016, vol. 80, no. 10, pp. 1224–1228. DOI: [10.7868/S0367676516100185](https://doi.org/10.7868/S0367676516100185).
 23. Roundi W., El Mahi A., El Gharad A., Rebiere J.L. Acoustic emission monitoring of damage progression in glass/epoxy composites during static and fatigue tensile tests. *Applied Acoustics*, 2018, vol. 132, pp. 124–134. DOI: [10.1016/j.apacoust.2017.11.017](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.017).
 24. Kumar C.S., Arumugam V., Sajith S., Dhakal H.N., John R. Acoustic emission characterisation of failure modes in hemp/epoxy and glass/epoxy composite laminates. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015, vol. 34, no. 4, article number 31. DOI: [10.1007/s10921-015-0306-8](https://doi.org/10.1007/s10921-015-0306-8).

Identification of acoustic emission sources in a polymer composite material under the cycle tension loading

© 2021

Anton A. Bryansky*¹, postgraduate studentOleg V. Bashkov², Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Head of Chair of Materials Science and New Material Technology*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur (Russia)**Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok (Russia)**E-mail: bryansky.aa@yandex.ru¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7992-0165>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-9797>

Abstract: The structure of polymer composite materials (PCM) provides high mechanical properties but, at the same time, is highly sensitive to the formation of internal defects. Therefore, when designing, manufacturing products, and assessing their reliability in service, much attention is paid to the methods of non-destructive testing, among which the method of acoustic emission (AE) has proven itself to study structural changes in material under external influence. The paper deals with the identification of typical damages in fiberglass samples made of T11-GVS9 glass fiber cloth and DION 9300 FR binder and tested under cyclic tension using the AE method. In the work, the authors solved the problem of selecting the AE informative parameters and used a clustering method to identify the nature and the formation kinetics of the AE sources. The authors performed clustering using the Kohonen self-organization map (SOM) with the Fourier spectra calculated for the AE signals recorded during cyclic tests. Based on the peak frequencies analysis of the produced clusters, the researchers determined their nature and calculated the periods of critical accumulation. When characterizing the AE sources, the authors used the peak frequencies analysis of the wavelet spectra performed for different levels of decomposition. The authors determined the damage accumulation stages of samples during testing based on own research and research by other authors' results. The study established that registration of AE signals identified as adhesion failure can be used to identify the onset of the material destruction and characterized the local formation of micro-damages in the matrix and fracture of fibers can be used to predict the destruction of PCM.

Keywords: PCM; FGRP; cycle loading; AE.

Acknowledgments: The reported study was funded by Russian science foundation, project number 21-19-00896.

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

For citation: Bryansky A.A., Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources in a polymer composite material under cyclic tension conditions. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 3, pp. 19–27. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-19-27.