

УДК 620.17

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-4-539-551

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ
И НАРУЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИМЕРНОГО
СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА***

© 2025 г.

Чеботарева Е.А., Лобанов Д.С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация*

cem.chebotareva@mail.ru

Поступила в редакцию 10.07.2025

Проведено комплексное исследование влияния эксплуатационных дефектов на механические характеристики полимерных слоистых композиционных материалов. Отработана методика по нанесению дефектов, имитирующих внешние эксплуатационные нагрузки, с различной степенью поврежденности. При экспериментальных исследованиях производилась регистрация сигналов акустической эмиссии как при нанесении дефектов, так и при последующих квазистатических испытаниях на растяжение. По полученным результатам проведен анализ взаимосвязи параметров акустической эмиссии и процессов разрушения материала при механическом нагружении. Методика исследования основана на сочетании экспериментальных методов механических испытаний с современными подходами неразрушающего контроля. Реализован системный подход к оценке повреждений, включающий в себя количественный анализ сигналов акустической эмиссии и их корреляцию с макроскопическими характеристиками материала. Изучена методика по интерпретации акустико-эмиссионных величин, позволяющая дифференцировать различные механизмы разрушения композиционной структуры. Анализ сигналов акустической эмиссии дает возможность интерпретировать отдельные параметры сигналов и выявлять взаимосвязи между этими параметрами. Поскольку анализ отдельных параметров акустической эмиссии не дает полной картины повреждений, разработан комплексный подход. Он сочетает исследование временных и частотных характеристик сигналов, позволяя получить более точную оценку состояния материала. В результате выявлено качественное влияние эксплуатационных дефектов разной величины на механические свойства композиционного материала. Полученные результаты могут использоваться для развития методов диагностики композиционных материалов, применяемых в ответственных конструкциях. Разработанная методология может быть использована для оценки остаточного ресурса и прогнозирования работоспособности композитных элементов в условиях эксплуатационного воздействия.

Ключевые слова: экспериментальная механика, акустическая эмиссия, параметрический анализ, композиционные материалы.

* Выполнено за счет гранта РНФ № 25-29-00188, <https://rscf.ru/project/25-29-00188/>.

Введение

Полимерные слоистые композиционные материалы широко применяются в аэрокосмической, строительной и транспортной отраслях благодаря своей высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и возможности проектирования свойств под конкретные эксплуатационные условия [1–4]. Однако их механическое поведение существенно зависит от наличия эксплуатационных дефектов, таких как вмятины, царапины и расслоения, которые могут возникать в процессе производства или эксплуатации [5–8]. Эти повреждения способны инициировать процессы разрушения, снижая несущую способность материала и сокращая срок его службы [9–11].

Акустическая эмиссия (АЭ) является одним из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля, позволяющих регистрировать динамику накопления повреждений в материалах в реальном времени [12–15]. Анализ параметров сигналов АЭ, таких как энергия, частота и угол нарастания, предоставляет ценную информацию о механизмах разрушения, включая растрескивание матрицы, расслоение и разрыв волокон [16–19]. В частности, зависимость RA–AF (скорость нарастания сигнала и его средняя частота) позволяет различать типы повреждений, что делает этот метод перспективным для диагностики состояния композитов [20–22].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных влиянию дефектов на механические свойства полимерных композитов, вопросы, связанные с корреляцией параметров АЭ и стадий разрушения при различных типах повреждений, остаются актуальными [23–25]. В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования влияния эксплуатационных дефектов (вмятин и царапин) на механическое поведение стеклопластика. Для анализа деформирования и разрушения используется метод акустической эмиссии.

Целью исследования является оценка влияния предварительно нанесенных дефектов на механические характеристики материала и идентификация типов повреждений на основе анализа сигналов АЭ. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методик неразрушающего контроля и прогнозирования остаточного ресурса композиционных конструкций.

Методика проведения исследования

Была разработана и реализована программа экспериментальных исследований на образцах стеклопластика в виде полосок с размерами 150×20×6 мм, разработаны и успешно применены методики нанесения поверхностных повреждений при контролируемых параметрах нагружения (сила, перемещение). Суть методики нанесения дефекта в виде вмятины заключалась в приложении нагрузки в испытательной системе Instron 5982 (100 кН) к образцу стеклопластика в поперечном направлении через стальной вал с полусферическим наконечником диаметром 10 мм (рис. 1).

В ходе предварительных испытаний по нанесению имитационных дефектов поверхности были установлены диапазоны значений нагрузки вдавливания стального вала с полусферическим наконечником, которые либо совсем не приводили к повреждениям образца, либо полученные повреждения не оказывали влияния на несущую способность стеклопластика. Также были установлены диапазоны значений нагрузок, которые в процессе вдавливания приводили к появлению видимых макродефектов (сквозные трещины, разрыв поверхностных слоев и т.д.) (рис. 2). Таким образом, методика нанесения вмятины была реализована при различных уровнях

нагрузки (10–22 кН с шагом 2–3 кН) вдавливания стального вала в образец стеклопластика, которые наносили умеренные повреждения материалу.

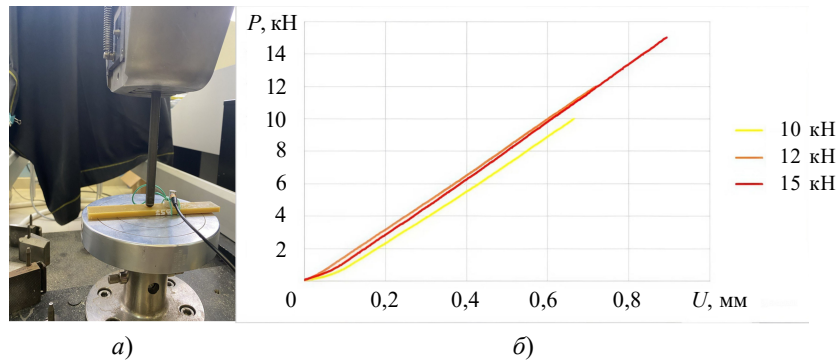


Рис. 1. Нанесение вмятины (а), диаграммы нанесения дефекта вмятины нагрузкой до 10, 12 и 15 кН (б)

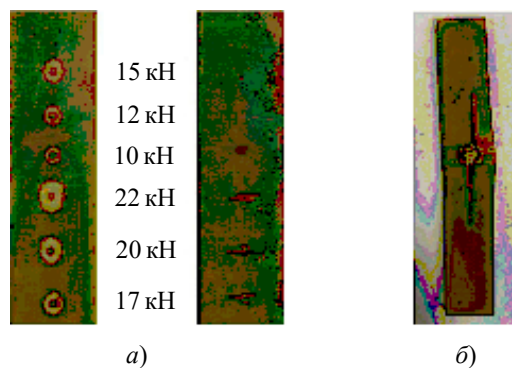


Рис. 2. Соответствие прилагаемой нагрузки видимым повреждениям поверхности образцов стеклопластика (а); критическая нагрузка 22 кН, приводящая к разрушению образца (б)

Методика нанесения дефекта царапина реализована аналогичным способом, только вместо стального вала со сферическим наконечником повреждение образцов стеклопластика наносилось стальным лезвием шириной 10 мм до нагрузки 1 кН и перемещения захвата машины на 1 мм. Предварительные испытания по нанесению повреждений проводились совместно с системой регистрации сигналов акустической эмиссии для анализа поврежденности образцов.

Были проведены серии квазистатических испытаний на растяжение образцов стеклопластика, вырезанных вдоль основы. Испытаны образцы без нанесения дефектов, образцы с дефектом вмятина, нанесенным нагрузкой от 10 до 22 кН, и образцы с нанесением поперечных царапин шириной 10 мм (нагрузка 1 кН). Испытания проводились на испытательной системе Instron 5982 (100 кН) совместно с системой регистрации сигналов акустической эмиссии Vallen AMSY-6 (рис. 3).

Сигналы акустической эмиссии регистрировались системой Vallen AMSY-6. Для регистрации сигналов использовался один широкополосный датчик AE144A с диапазоном частот 100–500 кГц и предусилитель с коэффициентом усиления 34 дБ. Датчик крепился к образцу с помощью крепежной системы, частота дискретизации данных 10 МГц, пороговое значение регистрации сигналов АЭ 40 дБ. В качестве информативных параметров использовались энергетический параметр, длительность

сигналов АЭ и частота спектрального максимума (характеристика быстрого преобразования Фурье). Энергетический параметр сигналов АЭ рассчитывался с помощью специальной программной опции в единицах энергии (eu), $1 \text{ eu} = 10^{-14} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$.



Рис. 3. Образец стеклопластика в процессе испытания на растяжение

Результаты исследования

При нанесении предварительных дефектов производилась регистрация сигналов акустической эмиссии. По полученным данным были построены зависимости энергетического параметра E от времени (рис. 4).

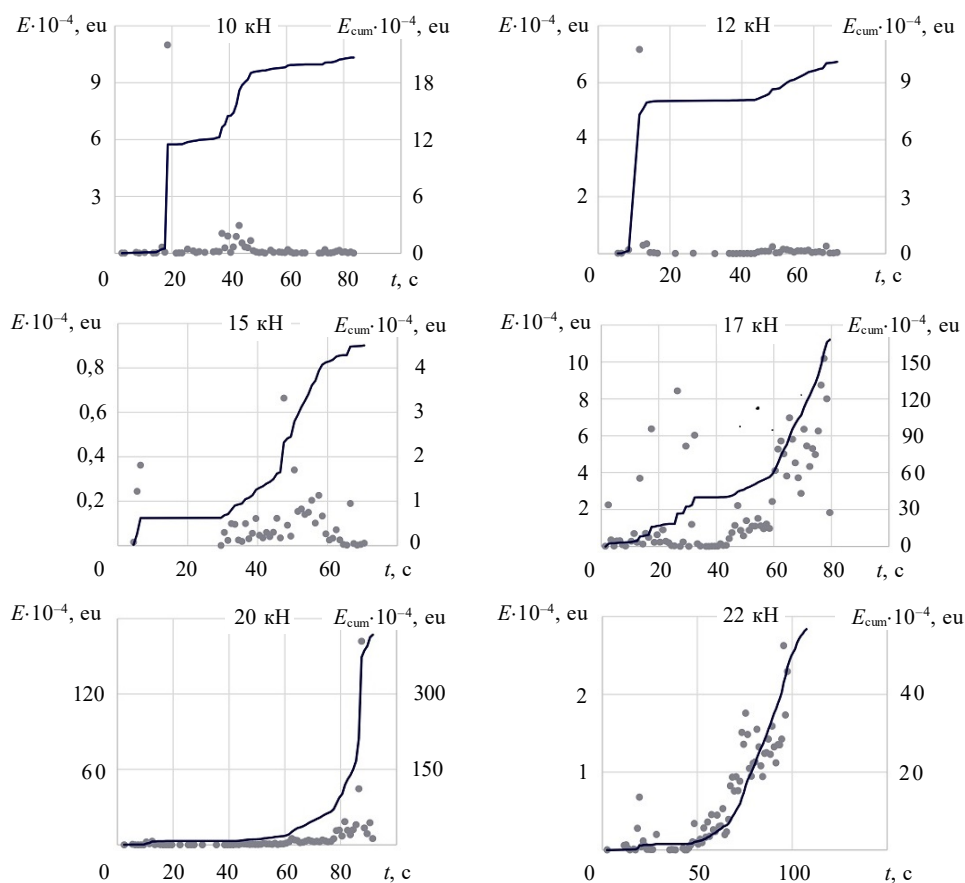


Рис. 4. Зависимость энергетического параметра сигналов АЭ от времени при нанесении предварительных повреждений

Образование и распространение микротрещин – это основные причины разрушения образцов, а также источники акустических сигналов. Характеристики зависимости угла нарастания RA и средней частоты AF акустических сигналов позволяют определять тип разрушения в образцах. Угол нарастания RA определяется как отношение времени нарастания к максимальной амплитуде, средняя частота – отношение количества отсчетов в одном сигнале к длительности этого сигнала (рис. 5).



Рис. 5. Графическое представление формы сигнала акустической эмиссии

На рис. 6 показаны характеристики RA–AF-распределения для образцов при нанесении предварительных дефектов типа вмятина.

Были построены зависимости пиковых частот сигналов АЭ от времени, которые получены с применением быстрого преобразования Фурье. На диаграммах (рис. 7) можно выделить три диапазона частот: низкочастотный – от 50 до 120 кГц, среднечастотный – от 180 до 350 кГц и высокочастотный – от 400 до 600 кГц.

После нанесения предварительных дефектов были проведены испытания на квазистатическое растяжение образцов. На рис. 8 представлены диаграммы нагружения (а) и соответствующие им зависимости кумулятивной энергии сигналов от времени (б).

Также были построены зависимости пиковых частот от времени для испытаний на квазистатическое растяжение (рис. 9). Методика и датчики соответствовали тем, которые использовались в исследовании при нанесении дефектов.

Примененная методика для зависимости RA–AF-распределения была использована при квазистатическом растяжении (рис. 10).

Обсуждение результатов

Нанесение предварительных дефектов. По значениям кумулятивной энергии сигналов можно судить о процессе накопления повреждений в материале. Из диаграмм (см. рис. 4) следует, что при надавливании с нагрузкой 10 и 12 кН сигналы имеют невысокую энергию, при этом зафиксированы отдельные сигналы с энергией в 8–10 раз выше среднего значения, из-за чего диаграмма кумулятивной энергии имеет резкие всплески. При увеличении значений нагрузки вдавливания энергия сигналов возрастает более равномерно, при нагрузке в 22 кН отдельные всплески энергии лежат в окрестностях кривой кумулятивной энергии.

На диаграммах зависимости RA–AF (см. рис. 6) можно видеть, что средняя частота находится в диапазоне 100–500 кГц. При нанесении дефектов с нагрузкой

10–12 кН в материале преимущественно происходит растрескивание матрицы, при этом сигналы АЭ распределены вдоль оси АФ. При увеличении нагрузок до 17, 20 и 22 кН в материале было отмечено расслоение, при этом значения RA увеличиваются. Стоит отметить, что значения параметра RA возрастают в диапазоне 200–400 кГц средней частоты сигналов.

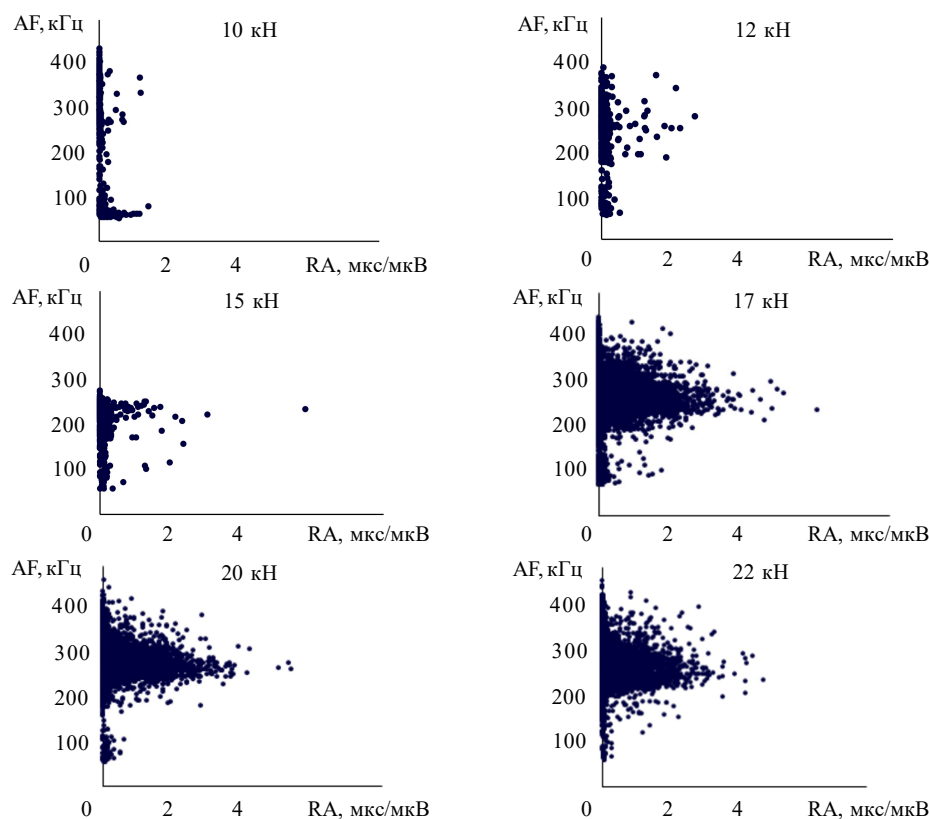


Рис. 6. RA–AF-зависимости сигналов АЭ при нанесении предварительных повреждений

На диаграммах пиковых частот сигналов (см. рис. 7) видно, что при низких значениях нагрузки сигналы зафиксированы преимущественно в низкочастотном диапазоне, при увеличении нагрузки появляются сигналы в среднем диапазоне, и при критических нагрузках, вызывающих разрушение образца, присутствуют сигналы в высокочастотном диапазоне. Выделенные диапазоны частот соответствуют растрескиванию матрицы (низкие частоты), расслоению (средние частоты) и разрыву волокон (высокие частоты).

Исходя из анализа параметров сигналов АЭ при контролируемом нанесении дефектов, можно сделать выводы о соответствии изменения характеристик сигналов и деформациях, происходящих в материале.

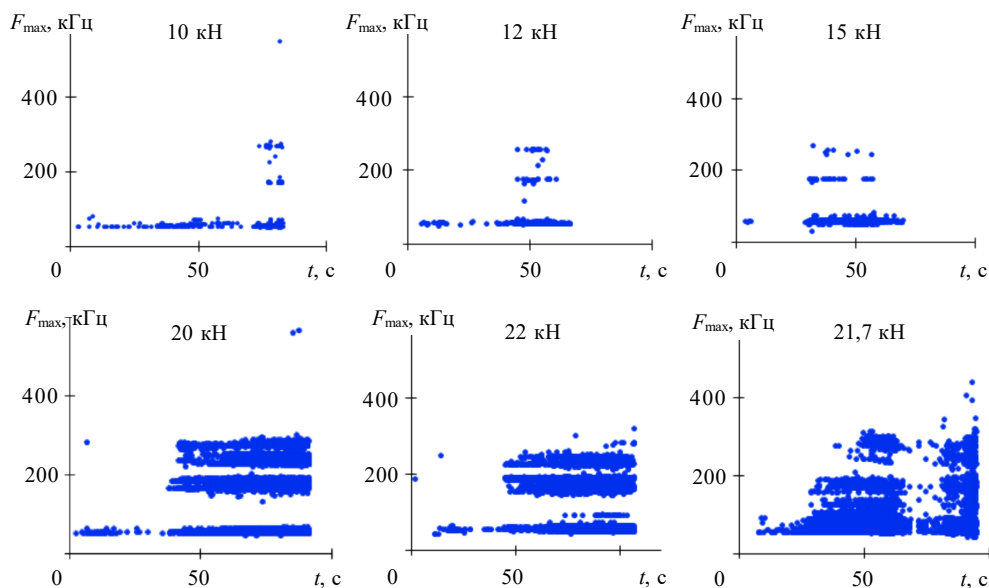


Рис. 7. Зависимость пиковых частот сигналов АЭ от времени при нанесении предварительных повреждений

Испытания на квазистатическое растяжение. На основе данных АЭ, полученных при контролируемом деформировании образцов, был проведен анализ сигналов в испытаниях на квазистатическое растяжение. В испытаниях на квазистатическое растяжение уровень максимальной нагрузки, после которой образец разрушается, уменьшается при увеличении значений предварительных дефектов, однако у кумулятивной энергии образцов не прослеживается подобная прямая зависимость (см. рис. 8). Минимальное значение кумулятивной энергии зафиксировано у образцов с наибольшими предварительными нагрузками, что говорит о разрушении материала до проведения испытаний на растяжение.

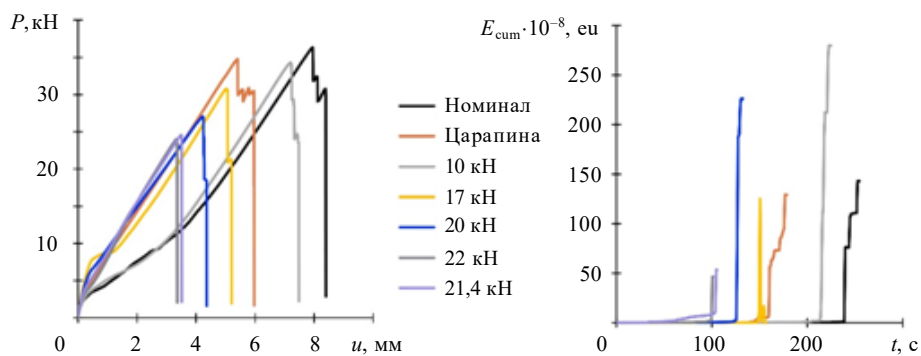


Рис. 8. Диаграммы нагружения (а) и кумулятивной энергии сигналов АЭ (б) при испытаниях на растяжение образцов с предварительно нанесенными дефектами

При анализе пиковых частот сигналов (см. рис. 9) количество сигналов зафиксировано гораздо выше, чем при предварительно нанесенных дефектах, а диапазоны имеют менее четкие границы. Сигналы, соответствующие разрыву волокон, появляются при разрушении у образцов с меньшим уровнем предварительной нагрузки.

У образцов с дефектами от 17 кН сигналы в высокочастотном диапазоне зафиксированы значительно раньше и прослеживаются на протяжении всего испытания.

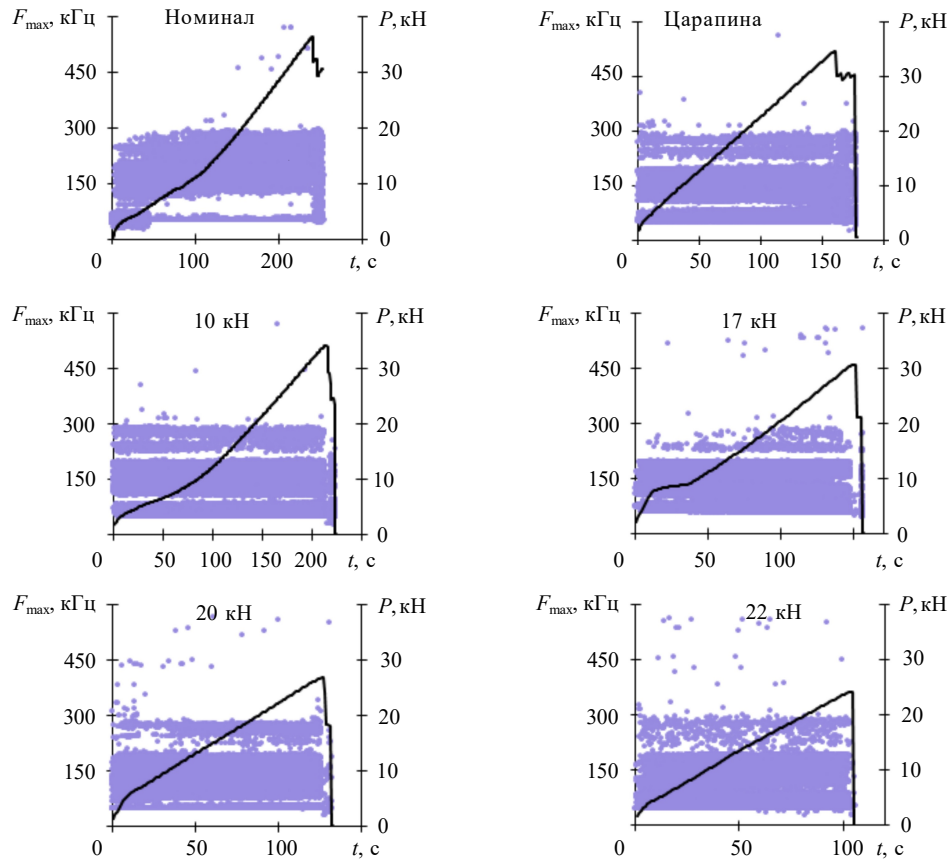


Рис. 9. Зависимость пиковых частот сигналов АЭ от времени, совмещенные с диаграммами нагружения, при испытаниях на растяжение образцов с предварительно нанесенными дефектами

Полученные зависимости RA–AF при квазистатическом растяжении (см. рис. 10) менее разнообразны, чем при нанесении дефектов. Однако при увеличении предварительной нагрузки можно наблюдать смещение основной массы сигналов в более высокие значения параметров RA и AF, что может свидетельствовать об увеличении числа микротрещин на границе волокно/матрица и о более интенсивном растрескивании матрицы. «Вытягивание» очага сигналов по линии RA говорит о более интенсивном накоплении повреждений в материале из-за более высоких предварительных нагрузок.

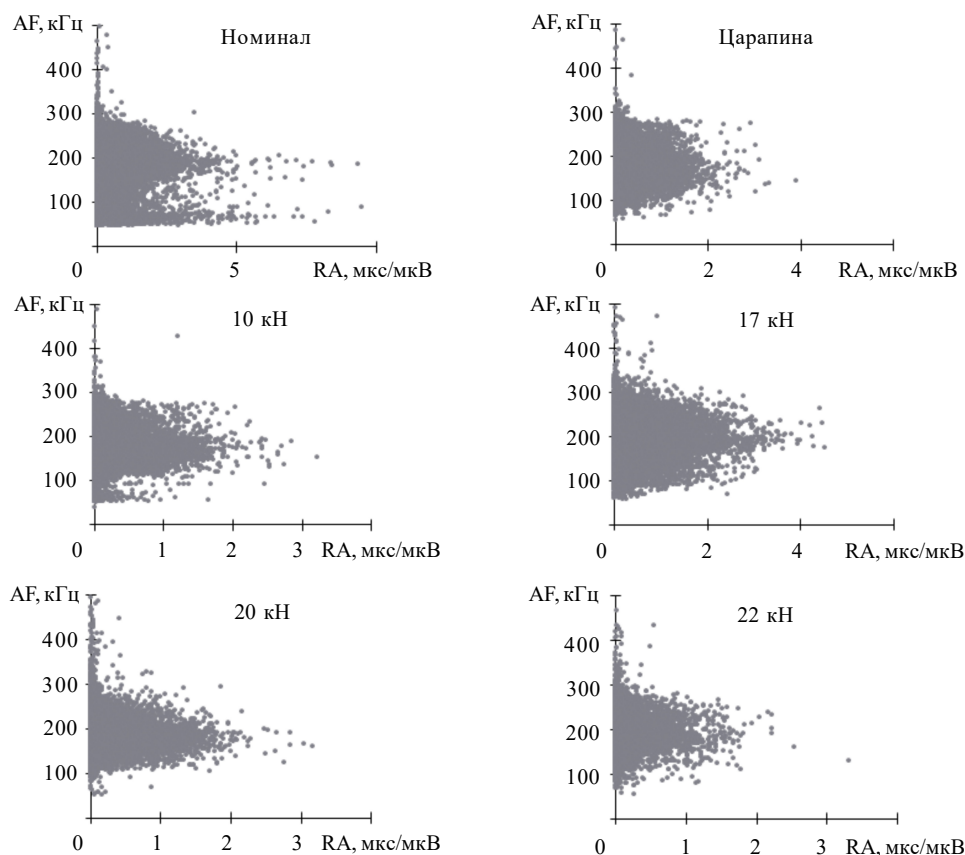


Рис. 10. Зависимость RA–AF сигналов АЭ при испытаниях на растяжение образцов с предварительно нанесенными дефектами

Выводы

Испытания образцов с нанесением дефектов и последующим квазистатическим растяжением показали связь параметрического анализа пиковых частот сигналов АЭ и RA–AF-распределения с механическим поведением полимерного материала под нагрузкой. В частности, зафиксировано изменение времени нарастания сигналов и, соответственно, угла нарастания и средней частоты сигналов при смене механизмов разрушения. При рассмотрении механизмов разрушения в материале анализ одного параметра не является показательным и требует подтверждения в виде построения зависимостей других параметров. Зависимость RA–AF возможно использовать как вспомогательный метод при изучении процесса накопления повреждений и разрушения материала. Также указанный метод имеет преимущество за счет того, что использует исходные данные параметров сигнала и не требует сложных преобразований для анализа.

Исследование было проведено, методически и качественно отработано на модельном материале. Несмотря на то, что метод АЭ позволяет отследить изменения в структуре материала при нагрузке, с его помощью невозможно количественно оценить степень поврежденности материала. Для этого зачастую рекомендуется использовать дополнительные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой

метод, термографию или методом корреляции цифровых изображений. При совместном использовании нескольких методов возможно косвенно дать количественную оценку снижения прочности материала при наличии тех или иных дефектов.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете с использованием уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях <http://ckp-rf.ru/usu/501309/>».

Список литературы

1. Barile C., Casavola C., Pappaletta G. Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data. *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 178. Article No 107469. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107469>.
2. Didenko A., Astapov A. Advances in the carbon-ceramic composites oxidation and ablation resistance: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2025. Vol. 8. Iss. 1. P. 87–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.07.007>.
3. Karpat Y., Bahtiyar O. Energy based investigation of process parameters while drilling carbon fiber reinforced polymers. *Procedia CIR*. 2016. Vol. 46. P. 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.185>.
4. Madotto R., Van Engelen N.C., Das S., Russo G., Pauletta M. Shear and flexural strengthening of RC beams using BFRP fabrics. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 229. Article No 111606. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111606>.
5. Диков И.А., Яковлева С.И., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Классификация дефектов в 2D-армированных полимерных композиционных материалах (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023. Вып. 3. №121. С. 67–83. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-67-83.
6. Saeedifar M., Fotouhi M., Ahmadi Najafabadi M. Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites using acoustic emission. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 85. P. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.037>.
7. Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С., Чеботарева Е.А. Экспериментальное изучение предельных деформаций и разрушение стеклопластиков с концентраторами напряжений. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2024. №4. С. 98–112. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2024.4.09>.
8. Liu Y., Sun X., Li Y. Quantitative assessment of impact damage in CFRP using high-frequency acoustic emission. *Composite Science and Technology*. 2023. Vol. 231. Article No 109813.
9. Feng B., Ribeiro A.L., Ramos H.G. A novel acoustic emission-based method for damage localization in composite laminates. *NDT & E International*. 2022. Vol. 126. Article No 102592.
10. Chebotareva E.A., Lunegova E.M., Lobanov D.S., Melnikova V.A. Effect of a preliminary impact on the mechanical properties of a structural carbon fiber reinforced polymer during interlaminar shear. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. Vol. 2024. No 5. P. 1158–1165. <https://doi.org/10.1134/S0036029524702161>.
11. Li H., Zhang Z., Chen X. Real-time monitoring of fatigue damage in carbon fiber composites using acoustic emission and infrared thermography. *Materials & Design*. 2022. Vol. 215. Article No 110475.
12. ASTM E976-21. *Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response*. ASTM International, 2021.
13. ISO 19477:2022. *Non-destructive testing – Acoustic emission testing – General principles*. ISO, 2022. 60 p.
14. Lobanov D., Yankin A., Mullahmetov M., Chebotareva E., Melnikova V. The analysis of stress raisers affecting the gfrp strength at quasi-static and cyclic loads by the theory of critical distances, digital image correlation, and acoustic emission. *Polymers*. 2023. Vol. 15. Iss. 9. Article No 2087. <https://doi.org/10.3390/polym15092087>.

15. Zhang X., Li L., Wang Y. Recent advances in acoustic emission techniques for monitoring polymer composites. *Journal of Materials Science*. 2022. Vol. 57. P. 12345–12368.
16. Sikdar S., Li D., Kundu A. Acoustic emission data based deep learning approach for classification and detection of damage-sources in a composite panel. *Composites Part B Engineering*. 2020. Vol. 228. Article No 109450. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109450>.
17. Gómez-de Gabriel J.M., López-Castro J.L., Fernández-López A. Machine learning for damage detection in composite materials using acoustic emission: A review. *Polymers*. 2021. Vol. 13. Iss. 23. Article No 4116.
18. Du J., Zeng J., Wang H., Ding H., Wang H., Bi Y. Using acoustic emission technique for structural health monitoring of laminate composite: A novel CNN-LSTM framework. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024. Vol. 309. Article No 110447. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110447>.
19. Wang J., Qiu J., Bao H. Machine learning-assisted acoustic emission analysis for failure prediction in composite pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023. Vol. 201. Article No 104876.
20. Zang Z., Li Z., Niu Y., Yin S., Kong X. Energy evolution and constitutive model of flawed coal failure based on acoustic emission and electric potential characterization. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025. Vol. 136. Article No 104832. DOI: 10.1016/j.tafmec.2024.104832.
21. Li H., Zhou Y., Zhang N., Shi W., Chen J., Karimirad M. Characterization of the shear cracking process in epoxy keyed joints using acoustic emission. *Structures*. 2025. Vol. 73. Article No 108438. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108438>.
22. Chen Z., Zhang G., He R., Tian Z., Fu C., Jin X. Acoustic emission analysis of crack type identification of corroded concrete columns under eccentric loading: A comparative analysis of RA-AF method and Gaussian mixture model. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Article No e02021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02021>.
23. Du J., Zeng J., Wang H., Ding H., Wang H., Bi Y. Using acoustic emission technique for structural health monitoring of laminate composite: A novel CNN-LSTM framework. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 309. Article No 110447. DOI:10.1016/j.engfracmech.2024.110447.
24. Wildemann V., Strungar E., Lobanov D., Mugatarov A., Chebotareva E. Experimental study of postcritical deformation stage realization in layered composites during tension using digital image correlation and acoustic emission. *Acta Mechanica Sinica*. 2025. Vol. 41. Article No 423468. <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23468-x>.
25. Лобанов Д.С., Струнгарь Е.М., Староверов О.А., Чеботарева Е.А. Влияние повышенных температур и предварительных ударных воздействий на остаточную межслоевую прочность углепластика. *Проблемы прочности и пластичности*. 2024. Т. 86. №4. С. 484–497. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2024-86-4-484-497>.

References

1. Barile C., Casavola C., Pappaletta G. Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data. *Compos. B: Eng.* 2019. Vol. 178. Article No 107469. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107469>.
2. Didenko A., Astapov A. Advances in the carbon-ceramic composites oxidation and ablation resistance: A review. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.* 2025. Vol. 8. Iss. 1. P. 87–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.07.007>.
3. Karpat Y., Bahtiyar O. Energy based investigation of process parameters while drilling carbon fiber reinforced polymers. *Procedia CIR*. 2016. Vol. 46. P. 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.185>.
4. Madotto R., Van Engelen N.C., Das S., Russo G., Pauletta M. Shear and flexural strengthening of RC beams using BFRP fabrics. *Eng. Struct.* 2021. Vol. 229. Article No 111606. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111606>.
5. Dikov I.A., Yakovleva S.I., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu. Klassifikatsiya defektov v 2D-armirovannykh polimernykh kompozitsionnykh materialakh (obzor) [Defect classification

for 2D fiber-reinforced composites (review)]. *Trudy Vserossiyskogo instituta aviatsionnykh materialov [Proceedings of VIAM]*. 2023. Iss. 3. №121. P. 67–83 (In Russian).

6. Saeedifar M., Fotouhi M., Ahmadi Najafabadi M. Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites using acoustic emission. *Compos. B. Eng.* 2016. Vol. 85. P. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.037>.

7. Strungar E.M., Lobanov D.S., Chebotareva E.A. Eksperimentalnoe izuchenie predelnykh deformatsiy i razrusheniye stekloplastikov s kontsentratorami napryazheniy [Experimental study of ultimate deformation and fracture of FRP with stress concentrators]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2024. No 4. P. 98–112 (In Russian).

8. Liu Y., Sun X., Li Y. Quantitative assessment of impact damage in CFRP using high-frequency acoustic emission. *Compos. Sci. Technol.* 2023. Vol. 231. Article No 109813.

9. Feng B., Ribeiro A.L., Ramos H.G. A novel acoustic emission-based method for damage localization in composite laminates. *NDT & E International*. 2022. Vol. 126. Article No 102592.

10. Chebotareva E.A., Lunegova E.M., Lobanov D.S., Melnikova V.A. Effect of a preliminary impact on the mechanical properties of a structural carbon fiber reinforced polymer during interlaminar shear. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. Vol. 2024. No 5. P. 1158–1165. <https://doi.org/10.1134/S0036029524702161>.

11. Li H., Zhang Z., Chen X. Real-time monitoring of fatigue damage in carbon fiber composites using acoustic emission and infrared thermography. *Mater. Des.* 2022. Vol. 215. Article No 110475.

12. *ASTM E976-21. Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response*. ASTM International. 2021.

13. *ISO 19477:2022. Non-destructive testing – Acoustic emission testing – General principles*. ISO. 2022. 60 p.

14. Lobanov D., Yankin A., Mullahmetov M., Chebotareva E., Melnikova V. The analysis of stress raisers affecting the grfp strength at quasi-static and cyclic loads by the theory of critical distances, digital image correlation, and acoustic emission. *Polymers*. 2023. Vol. 15. Iss. 9. Article No 2087. <https://doi.org/10.3390/polym15092087>.

15. Zhang X., Li L., Wang Y. Recent advances in acoustic emission techniques for monitoring polymer composites. *J. Mater. Sci.* 2022. Vol. 57. P. 12345–12368.

16. Sikdar S., Li D., Kundu A. Acoustic emission data based deep learning approach for classification and detection of damage-sources in a composite panel. *Composites Part B Engineering*. 2020. Vol. 228. Article No 109450. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109450>.

17. Gómez-de Gabriel J.M., López-Castro J.L., Fernández-López A. Machine learning for damage detection in composite materials using acoustic emission: A review. *Polymers*. 2021. Vol. 13. Iss. 23. Article No 4116.

18. Du J., Zeng J., Wang H., Ding H., Wang H., Bi Y. Using acoustic emission technique for structural health monitoring of laminate composite: A novel CNN-LSTM framework. *Eng. Fract. Mech.* 2024. Vol. 309. Article No 110447. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110447>.

19. Wang J., Qiu J., Bao H. Machine learning-assisted acoustic emission analysis for failure prediction in composite pressure vessels. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 2023. Vol. 201. Article No 104876.

20. Zang Z., Li Z., Niu Y., Yin S., Kong X. Energy evolution and constitutive model of flawed coal failure based on acoustic emission and electric potential characterization. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2025. Vol. 136. Article No 104832. DOI: 10.1016/j.tafmec.2024.104832.

21. Li H., Zhou Y., Zhang N., Shi W., Chen J., Karimirad M. Characterization of the shear cracking process in epoxy keyed joints using acoustic emission. *Structures*. 2025. Vol. 73. Article No 108438. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108438>.

22. Chen Z., Zhang G., He R., Tian Z., Fu C., Jin X. Acoustic emission analysis of crack type identification of corroded concrete columns under eccentric loading: A comparative analysis of RA-AF method and Gaussian mixture model. *Case Stud. Constr. Mater.* 2023. Vol. 18. Article No e02021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02021>.

23. Du J., Zeng J., Wang H., Ding H., Wang H., Bi Y. Using acoustic emission technique

for structural health monitoring of laminate composite: A novel CNN-LSTM framework. *Eng. Fract. Mech.* 2022. Vol. 309. Article No 110447. DOI:10.1016/j.engfracmech.2024.110447.

24. Wildemann V., Strungar E., Lobanov D., Mugatarov A., Chebotareva E. Experimental study of postcritical deformation stage realization in layered composites during tension using digital image correlation and acoustic emission. *Acta Mech. Sinica*. 2025. Vol. 41. Article No 423468. <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23468-x>.

25. Lobanov D.S., Strungar E.M., Staroverov O.A., Chebotareva E.A. Vliyanie povyshennykh temperatur i predvaritelnykh udarnykh vozdeystviy na ostatochnuyu mezhslouevuyu prochnost ugleplastika [Effect of elevated temperatures and pre-impact on residual interlayer strength of carbon fiber reinforced plastic]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2024. Vol. 86. No 4. P. 484–497 (In Russian).

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL DEFECTS AND EXTERNAL DAMAGE ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF POLYMER LAMINATED COMPOSITE MATERIAL*

Chebotareva E.A., Lobanov D.S.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

cem.chebotareva@mail.ru

Received by the Editor 2025/07/10

This study presents a comprehensive investigation of the influence of operational defects on the mechanical properties of polymer laminated composite materials. A methodology was developed for introducing defects simulating external operational loads with varying degrees of damage severity. During experimental studies, acoustic emission signals were recorded both during defect formation and subsequent quasi-static tensile tests. The obtained data were used to analyze the correlation between acoustic emission parameters and material failure processes under mechanical loading. The research methodology combines experimental mechanical testing with advanced non-destructive evaluation techniques. A systematic approach to damage assessment was implemented, incorporating quantitative analysis of acoustic emission signals and their correlation with macroscopic material characteristics. The study examined methods for interpreting acoustic emission data to differentiate between various failure mechanisms in the composite structure. Acoustic emission signal analysis employed two principal approaches: interpretation of individual signal parameters and investigation of interparameter relationships. Recognizing that analysis of single acoustic emission parameters provides incomplete damage characterization, the study developed an integrated approach combining temporal and frequency-domain signal analysis, enabling more accurate material condition assessment. The results demonstrate the qualitative influence of operational defects of different magnitudes on the mechanical properties of the composite material. These findings can contribute to the development of diagnostic methods for composite materials used in critical structures. The proposed methodology may be applied for residual life assessment and performance prediction of composite components under operational conditions.

Keywords: experimental mechanics, acoustic emission, parametric analysis, composite materials.

* The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation, grant No 25-29-00188, <https://rscf.ru/project/25-29-00188/>.