

УДК 620.179.17

Ю.Г. МАТВИЕНКО, д-р техн. наук, проф.

заведующий отделом¹

E-mail: ygmatvienko@gmail.com

Т.Д. БАЛАНДИН

младший научный сотрудник¹

E-mail: timofey.balandin@mail.ru

Д.В. ЧЕРНОВ, канд. техн. наук, доц.

старший научный сотрудник¹

E-mail: chernovdv@inbox.ru

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 19.09.2025.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Работа посвящена исследованию кинетики накопления повреждений в изделиях из полимерных композиционных материалов с использованием метода акустической эмиссии (АЭ). Для решения поставленной задачи предложен алгоритм обработки потоковых АЭ-параметров, основанный на совместном применении методов статистической обработки экспериментальных данных и моделей регрессионного анализа. В качестве наиболее информативных параметров, используемых при оценке степени поврежденности композитных образцов, были выбраны значения высокоуровневых квантилей $p = 0,9$ эмпирических функций распределения энергии переднего фронта $[E_\phi]_{p=0,9}$ и усредненной частоты выбросов $[N_i/t_i]_{p=0,9}$ импульсов АЭ. Расчет эмпирических функций распределения для выбранных АЭ-параметров осуществлялся с помощью метода оконных функций. Реализация предложенного алгоритма состоит в расчете весового содержания потоковых АЭ-параметров в сегментах I, II и III критериальной плоскости $[E_\phi]_{p=0,9} - [N_i/t_i]_{p=0,9}$, сформированных на стадиях рассеянного трещинообразования в матрице (I), локального разрушения волокон (II) и интенсивного накопления повреждений в зоне концентрации напряжений (III) композитного образца. По динамике изменения весового содержания потоковых параметров в сегменте I (W_I) проведен синтез регрессионной модели, позволяющей оценить степень поврежденности контролируемых изделий по результатам АЭ-мониторинга. В качестве регрессионной модели использована дробно-рациональная функция первого порядка, коэффициенты которой были рассчитаны с помощью метода наименьших квадратов. Максимальное значение приведенной погрешности для предложенной эмпирической модели для исследуемого композитного материала не превышала $\gamma = 3,6\%$, а высокая степень корреляции модельных и экспериментальных данных подтверждается значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,94$.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, степень поврежденности, композитные материалы, статистический анализ, регрессионная модель

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-52-57>

Введение. Одной из наиболее актуальных задач технической диагностики является оценка фактического состояния изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Широкое применение композитных материалов обусловлено их высокой удельной прочностью и жесткостью, что позволяет в значительной степени уменьшить вес конструкций [1, 2]. Особенностью современных конструкционных ПКМ является их сложная

многослойная структура, для которой свойственны специфические типы дефектов, такие как расслоения, растрескивание матрицы и разрывы волокон [3]. Возникновение перечисленных выше дефектов может привести к деградации механических свойств изделий из ПКМ, а значит, к сокращению срока их эксплуатации.

Для проведения диагностики повреждений и разрушений изделий из ПКМ используют си-

стемы непрерывного мониторинга, основанные на применении методов неразрушающего контроля, например, метода акустической эмиссии, который основан на явлении генерации упругих волн при образовании и развитии дефектов в материале контролируемого изделия [4]. По результатам обработки импульсов АЭ осуществляется оценка степени опасности источников акустических сигналов и построение координатной локализации развивающихся повреждений [5, 6].

Для определения степени поврежденности изделий из ПКМ могут быть использованы первичные и комплексные АЭ-параметры, такие как амплитуда, максимум амплитудно-частотных характеристик, энергия, усредненная частота выбросов и другие [7–15]. По результатам динамики изменения энергетических [8, 11] и спектральных [12–15] характеристик потока импульсов АЭ возможна качественная оценка интенсивности процессов накопления повреждений в структуре композитных материалов на микро-, мезо- и макромасштабном уровне. Необходимо отметить, что в качестве численной оценки степени поврежденности контролируемых изделий могут быть использованы значения весового содержания потоковых АЭ-параметров.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию динамики изменения потоковых АЭ-параметров, рассчитанных с помощью методов статистического анализа и цифровой обработки сигналов. По результатам расчета весового содержания импульсов АЭ проведен синтез регрессионной модели, используемой для численной оценки степени поврежденности композитных образцов.

Материалы и методы исследования. Для решения поставленной задачи проведена серия экспериментальных исследований по квазистатическому растяжению плоских образцов до разрушения. Нагружение образцов осуществлялось на испытательной машине Instron 5982 с электромеханическим приводом с постоянной скоростью движения верхнего подвижного захвата, равной 1 мм/мин. Для регистрации импульсов АЭ использовали пару пьезоэлектрических преобразователей VS150-RIC, подключенных к системе регистрации Vallen AMSY-6. Схема проведения экспериментальных исследований представлена на рисунке 1.

На начальном этапе проведения экспериментальных исследований определяли оптимальные параметры измерительной аппаратуры. Порог дискриминации импульсов АЭ был рассчитан из условия $u_{th} \geq u_n + 6$ дБ (u_{th} — порог дискриминации импульсов АЭ; u_n — максимальная амплитуда шумовых сигналов) и составил $u_{th} = 40$ дБ. Для снижения влияния шумовых сигналов на результаты АЭ-диагностики полоса пропускания цифровых фильтров измерительной системы Δf_p была выбрана равной 95–850 кГц. Регистрация

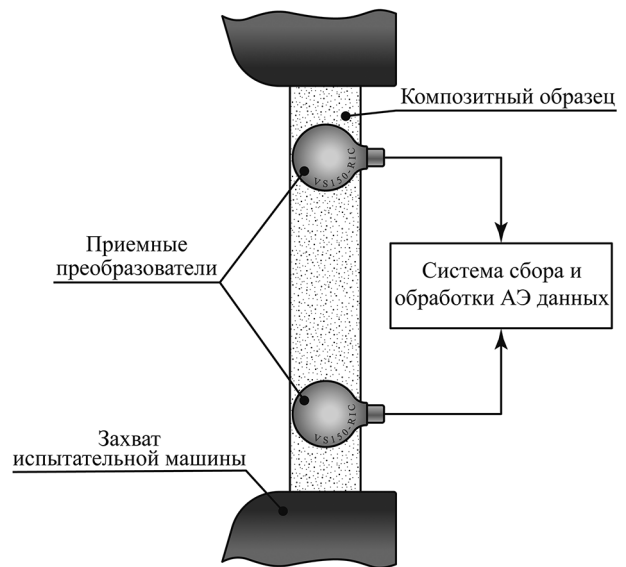


Рисунок 1 — Схема проведения экспериментальных исследований

Figure 1 — Scheme of conducting experimental research

импульсов АЭ осуществлялась с помощью квазирезонансных преобразователей VS150-RIC со встроенным предусилителем с коэффициентом усиления 34 дБ и максимальной чувствительностью на частоте 150 кГц.

Обработка результатов экспериментальных исследований. На начальном этапе обработки экспериментальных данных проведена оценка изменения амплитуды u_m и длительности t_i импульсов АЭ в зависимости от уровня приложенной нагрузки (рисунок 2).

На начальном этапе нагружения (цикл треугольной формы с максимальным уровнем нагрузки $P = 3$ кН) амплитуда и длительность импульсов АЭ достигали $u_m = 70,5$ дБ и $t_i = 2130$ мкс соответственно. На втором цикле нагружения (от 50 до 7 кН) отмечается повышение максимальной амплитуды и длительности импульсов АЭ до $u_m = 75,4$ дБ и $t_i = 3317$ мкс. Во временном интервале τ от 208 до 380 с рассмотренные параметры достигали значений $u_m = 77,2$ дБ и $t_i = 3504$ мкс, а характеристики потока акустических сигналов коррелировали с результатами АЭ-мониторинга, зарегистрированными на предыдущих этапах нагружения. В момент времени $\tau = 380$ с зарегистрировано локальное снижение приложенной нагрузки P с 9,13 до 8,86 кН и резкое повышение максимальной амплитуды и длительности импульсов АЭ до значений $u_m = 100$ дБ и $t_i = 16\,211$ мкс. При этом в момент разрушения композитного образца перечисленные выше параметры достигали значений $u_m = 82,9$ дБ и $t_i = 11\,276$ мкс.

Для численной оценки степени поврежденности композитных образцов по результатам АЭ-мониторинга использован метод анализа потоковых параметров. В качестве потоковых АЭ-параметров были выбраны значения квантилей на уровне $p = 0,9$

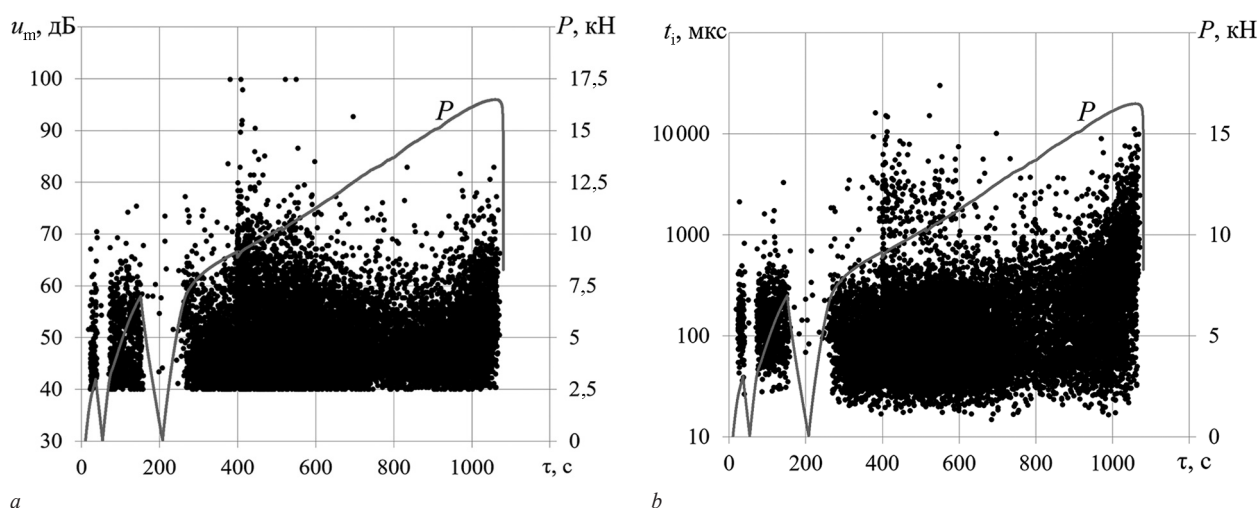


Рисунок 2 — Временные зависимости амплитуды u_m (a) и длительности t_i (b) импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе нагружения композитного образца растяжением
Figure 2 — Time dependences of the amplitude u_m (a) and duration t_i (b) of AE pulses recorded during stretching loading of the composite sample

эмпирических функций распределения (ЭФР) энергии переднего фронта ($E_\phi = 20\log_{10}(u_m \cdot t_\phi)$) и усредненной частоты выбросов N_i/t_i импульсов АЭ, где t_ϕ — время нарастание; N_i — количество выбросов, t_i — длительность. Построение ЭФР осуществлялось с применением скользящего окна размером $F = 200$ импульсов с шагом сканирования $S = 50$ импульсов. Для расчета степени поврежденности было предложено использовать соотношение $j = \varepsilon_1/\varepsilon_B$, где $\varepsilon_1 = (\Delta l/l_0) \cdot 100\%$ — относительное удлинение образца в процессе нагружения; l_0 — начальная длина образца; ε_B — предельный уровень относительного удлинения, соответствующий разрушению образца; $j = 0$ — неповрежденное состояние; $j = 1$ — предельное состояние.

Динамика изменения потоковых АЭ-параметров представлена на рисунке 3.

Как показано на рисунке 3 а, б, на начальном этапе нагружения ($j \leq 0,35$) композитного образца потоковые АЭ-параметры не превышают значе-

ний $[E_\phi]_{p=0,9} = 90,5$ дБ и $[N_i/t_i]_{p=0,9} = 164,2$ кГц. При дальнейшем повышении приложенной нагрузки на участке $0,35 < j \leq 0,45$ зарегистрировано резкое увеличение критериальных параметров до значений $[E_\phi]_{p=0,9} = 99,2$ дБ и $[N_i/t_i]_{p=0,9} = 216,4$ кГц. Резкое повышение значений потоковых АЭ-параметров может быть связано с переходом от рассеянного трещинообразования в матрице композитного образца к локализованному разрыву волокон, что подтверждается резким локальным снижением нагрузки P с 9,13 до 8,86 кН. Дальнейшее повышение нагрузки привело к значительным изменениям АЭ-параметров, а в момент разрушения их значения достигли $[E_\phi]_{p=0,9} = 119,1$ дБ и $[N_i/t_i]_{p=0,9} = 130,2$ кГц. Для численной оценки степени поврежденности композитных образцов по результатам АЭ-мониторинга проведен расчет весового содержания потоковых параметров в сегментах I, II и III:

$$W_I = N_I/N_\Sigma, W_{II} = N_{II}/N_\Sigma, W_{III} = N_{III}/N_\Sigma,$$

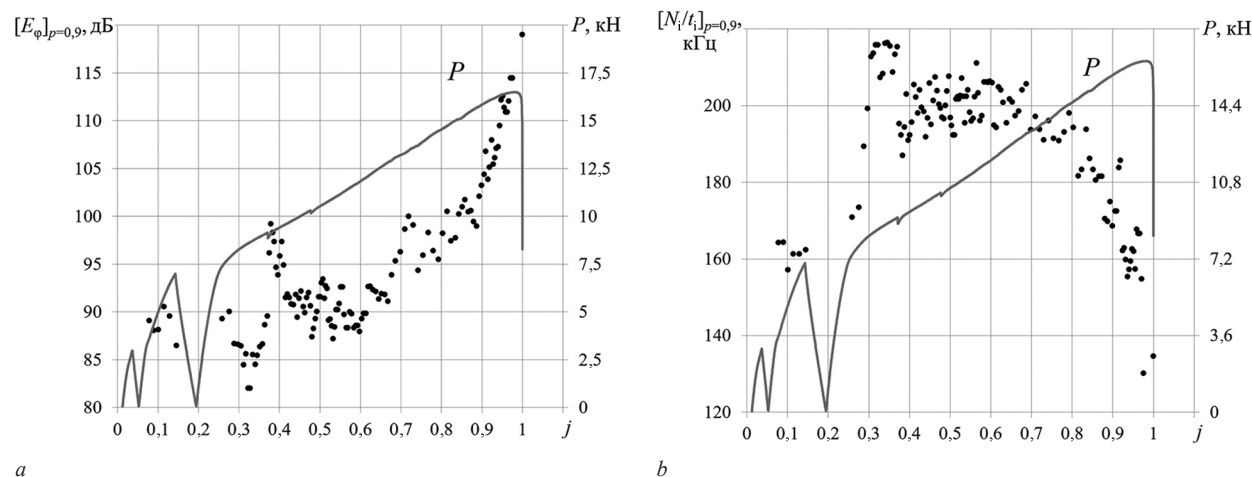


Рисунок 3 — Динамика изменения значений квантиля уровня $p = 0,9$ функций распределения параметров $[E_\phi]_{p=0,9}$ (a) и $[N_i/t_i]_{p=0,9}$ (b) от степени поврежденности композитного образца j
Figure 3 — Dynamics of changes in the quantile values of the level $p = 0,9$ of the parameter distribution functions $[E_\phi]_{p=0,9}$ (a) and $[N_i/t_i]_{p=0,9}$ (b) of the degree of damage to the composite sample j

где N_I , N_{II} , N_{III} — количество потоковых АЭ-параметров, зарегистрированных в сегментах I, II, III; $N_{\Sigma} = N_I + N_{II} + N_{III}$ — общее количество зарегистрированных потоковых АЭ-параметров. Результаты сегментации потоковых АЭ-параметров и расчета их весового содержания представлены на рисунке 4.

Выбор границ сегментов, представленных на рисунке 4 а, осуществлялся по характерным изменениям функций $[E_{\phi}]_{p=0,9}(j)$ и $[N_i/t_i]_{p=0,9}(j)$, представленных на рисунке 3. Исходя из закономерностей изменения весового содержания потоковых АЭ-параметров (см. рисунок 4 б), предложена эмпирическая модель расчета степени поврежденности композитного образца. Для реализации предложенного алгоритма методом наименьших квадратов проведен расчет коэффициентов дробно-рациональной функции первого порядка, используемой для оценки степени поврежденности композитного образца:

$$j_m(W_I) = \frac{0,28 \cdot W_I + 0,02}{W_I - 0,03}.$$

В качестве примера на рисунке 5 представлен результат расчета степени поврежденности для одного из испытанных образцов.

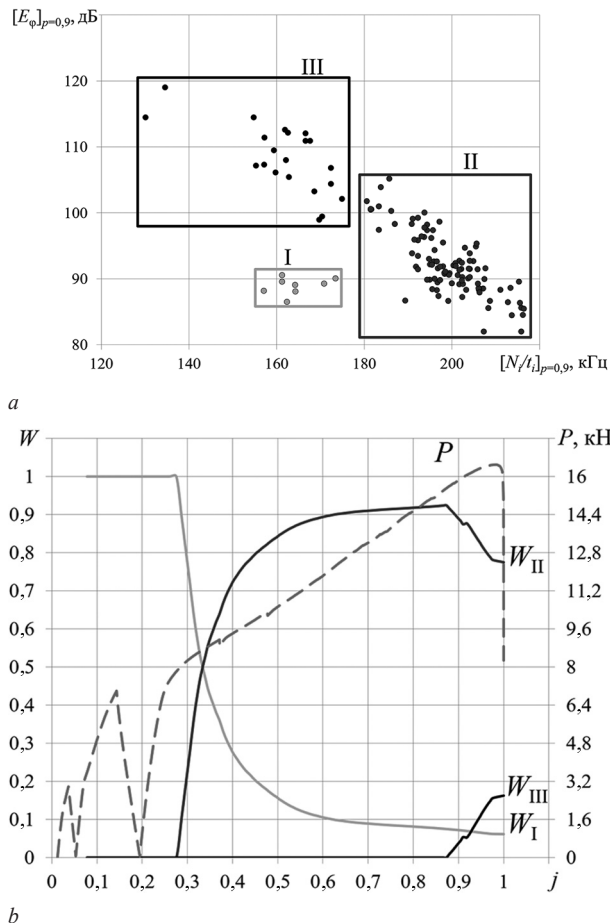


Рисунок 4 — Результаты сегментации (а) и расчета весового содержания (б) потоковых АЭ-параметров
Figure 4 — Results of segmentation (a) and calculation of the weight content (b) of streaming AE parameters

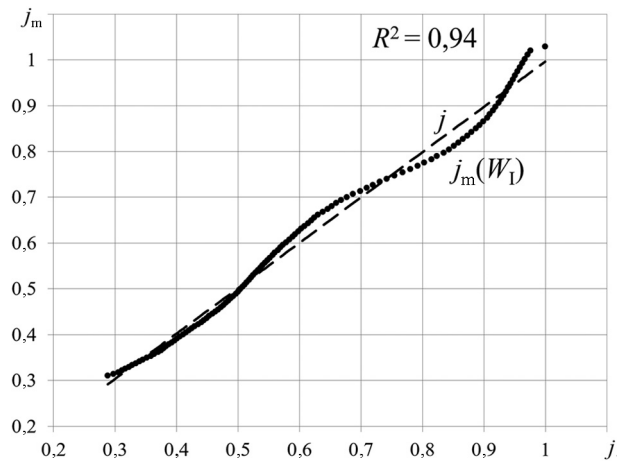


Рисунок 5 — Результаты сопоставления экспериментальных j и модельных j_m значений степени поврежденности композитного образца
Figure 5 — Results of comparing the experimental j and model j_m values of the degree of damage to the composite sample

Как следует из рисунка 5, результаты применения эмпирической модели (1) с высокой точностью коррелируют с экспериментальными данными. Высокая степень корреляции модельных и экспериментальных данных подтверждается значением коэффициента корреляции $R^2 = 0,94$. Максимальная приведенная погрешность оценки степени поврежденности композитного образца была зарегистрирована при $j = 0,86$ и составила

$$\gamma = \left(\frac{|j - j_m|}{\max(j)} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{|0,864 - 0,828|}{1} \right) \cdot 100\% = 3,6\%.$$

Заключение. На начальном этапе экспериментальных исследований проведен анализ изменения первичных АЭ-параметров в зависимости от уровня приложенной нагрузки. Установлено, что динамика изменения максимальных значений амплитуды и длительности импульсов АЭ не коррелирует с кинетикой накопления повреждений в контролируемых образцах. Исходя из результатов обработки первичных и комплексных АЭ-параметров, предложена методика оценки степени поврежденности композитного образца, состоящая в расчете эмпирических функций распределения энергии переднего фронта E_{ϕ} и усредненной частоты выбросов N_i/t_i импульсов АЭ. В результате разделения критериальной плоскости $[E_{\phi}]_{p=0,9} - [N_i/t_i]_{p=0,9}$ на три характерных сегмента проведен расчет весового содержания потоковых АЭ-параметров W_I , W_{II} и W_{III} в сегментах I, II и III соответственно. По значениям параметра W_I предложена регрессионная модель расчета степени поврежденности композитных образцов, а приведенная погрешность разработанной модели γ не превышала 3,6 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-19-00117).

Список литературы

1. Deo, R.B. Low-cost composite materials and structures for aircraft applications / R.B. Deo, J.H. Starnes, R.C. Holzwarth // RTO AVT specialist meeting on Low Cost Composite Structures, Loen, May 7–11, 2001. — Neuilly-sur-Seine: NATO RTO, 2003.
2. Wu, Y. Application of carbon fiber composite materials in aircraft / Y. Wu // Applied and Computational Engineering. — 2024. — Vol. 61. — P. 245–248. — DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/61/20240969>.
3. Smith, R.A. Composite defects and their detection / R.A. Smith // Materials science and engineering: in 3 volumes / EOLSS Publishers Co.; ed. R.D. Rawlings. — EOLSS Publishers Co., 2009. — Vol. 3 / ed. R.D. Rawlings. — 2009. — P. 103–143.
4. Иванов, В.И. Акустико-эмиссионная диагностика / В.И. Иванов, В.А. Барат. — М.: Спектр, 2017. — 362 с.
5. Application of acoustic emission method for the evaluation of the micromechanics of destruction of fiberglass materials under static load / M. Urbaha, K. Stefański, M. Banov, V. Shestakov // Aviation. — 2020. — Vol. 24, no. 4. — P. 169–176. — DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2020.12661>.
6. Степанова, Л.Н. Исследование процесса разрушения образцов из композиционных материалов методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2014. — № 3(663). — С. 118–124.
7. Ghadarah, N.S. A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites / N.S. Ghadarah, D. Ayre // Sensors. — 2023. — Vol. 23, iss. 15. — DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156945>.
8. Rupture tests of reinforcing fibers and a unidirectional laminate using acoustic emissions / N.A. Makhutov, Yu.G. Matvienko, V.I. Ivanov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2022. — Vol. 65, iss. 2. — P. 305–313. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441222020014>.
9. Acoustic emission-based methodology to evaluate delamination crack growth under quasi-static and fatigue loading conditions / M. Saeedifar, M.A. Najafabadi, K. Mohammadi [et al.] // Journal of Nondestructive Evaluation. — 2018. — Vol. 37, iss. 7. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0454-0>.
10. Acoustic emission monitoring for damage diagnosis in composite laminates based on deep learning with attention mechanism / J. Du, J. Zeng, C. Chen [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2025. — Vol. 222. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111770>.
11. Multi-variant damage assessment in composite materials using acoustic emission / M. Gee, S. Roshanmanesh, F. Hayati, M. Pappalias // Sensors. — 2025. — Vol. 25, iss. 12. — DOI: <https://doi.org/10.3390/s25123795>.
12. Time-frequency analysis of acoustic emission signals in composite materials under repeated impact conditions / J. Du, Y. Bao, W. Wang [et al.] // Polymer Composites. — 2025. — Vol. 46, iss. 13. — P. 12407–12420. — DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.29752>.
13. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission / M. Saeedifar, M.A. Najafabadi, D. Zarouchas [et al.] // Composites Part B: Engineering. — 2018. — Vol. 144. — P. 206–219. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.028>.
14. Flexural damage and failure behavior of 3D printed continuous fiber composites by complementary nondestructive testing technology / Z. Pan, W. Zhou, K. Zhang [et al.] // Polymer Composites. — 2022. — Vol. 43, iss. 5. — P. 2864–2877. — DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.26582>.
15. Ли, В. Кластерный анализ данных акустической эмиссии слоистых композитных материалов с различной ориентацией межфазных волокон на основе модели гауссовой смеси / В. Ли, Ц. Чэн, П. Цзян, И. Лю // Дефектоскопия. — 2023. — № 3. — С. 14–30. — DOI: <https://doi.org/10.31857/S0130308223030028>.

MATVIENKO Yuri G., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department¹

E-mail: ygmattvienko@gmail.com

BALANDIN Timofey D.

Junior Researcher¹

E-mail: timofey.balandin@mail.ru

CHERNOV Dmitry V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Senior Researcher¹

E-mail: chernovdv@inbox.ru

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received September 19, 2025.

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS STATISTICAL ANALYSIS METHODS TO ASSESS THE COMPOSITE SAMPLES DAMAGE DEGREE

The work is devoted to the study of damage accumulation kinetics in products made of polymer composite materials using the acoustic emission (AE) method. To solve the problem, an algorithm for processing streaming AE parameters is proposed, based on the combined use of statistical processing methods for experimental data and regression analysis models. The values of high-level quantiles $p = 0.9$ of the empirical functions of the leading edge energy distribution $[E_\phi]_{p=0.9}$ and the average frequency of emissions $[N_i/t_i]_{p=0.9}$ of AE pulses were selected as the most informative parameters used in assessing the degree of damage to composite samples. The calculation of the empirical distribution functions for the selected AE parameters was carried out using the window function method. The implementation of the proposed algorithm consists

in calculating the weight content of the streaming AE parameters in segments I, II and III of the criterial plane $[E_\phi]_{p=0.9} - [N_i/t_i]_{p=0.9}$, formed at the stages of scattered crack formation in the matrix (I), local fiber failure (II) and intensive damage accumulation in the stress concentration zone (III) of the composite sample. Based on the dynamics of change in the weight content of the streaming parameters in segment I (W_I), a regression model was synthesized that allows estimating the degree of damage to the monitored products based on the AE monitoring results. A fractional rational function of the first order was used as a regression model, the coefficients of which were calculated using the least squares method. The maximum value of the reduced error for the proposed empirical model for the studied composite material did not exceed $\gamma = 3.6\%$, and the high degree of correlation between the model and experimental data is confirmed by the value of the correlation coefficient $R^2 = 0.94$.

Keywords: acoustic emission, degree of damage, composite materials, statistical analysis, regression model

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-52-57>

References

1. Deo R.B., Starnes J.H., Holzwarth R.C. Low-cost composite materials and structures for aircraft applications. *Proc. RTO AVT specialists' meeting on "Low cost composite structures"*. Loen, 2001.
2. Wu Y. Application of carbon fiber composite materials in aircraft. *Applied and computational engineering*, 2024, vol. 61, pp. 245–248. DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/61/20240969>.
3. Smith R.A. Composite defects and their detection. *Encyclopedia of life support systems. Materials science and engineering*, 2009, vol. 3, pp. 103–143.
4. Ivanov V.I., Barat V.A. *Akustiko-emissionnaya diagnostika* [Acoustic emission diagnostics]. Moscow, Spektr Publ., 2017. 362 p. (in Russ.).
5. Urbaha M., Stefański K., Banov M., Shestakov V. Application of acoustic emission method for the evaluation of the micromechanics of destruction of fiberglass materials under static load. *Aviation*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 169–176. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2020.12661>.
6. Stepanova L.N., Chernova V.V. Issledovanie protsessy razrusheniya obraztsov iz kompozitsionnykh materialov metodom akusticheskoy emissii [Investigation of the destruction process of composite material samples using the acoustic emission method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*, 2014, no. 3(663), pp. 118–124 (in Russ.).
7. Ghadarah N.S., Ayre D. A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites. *Sensors*, 2023, vol. 23, iss. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156945>.
8. Makhutov N.A., et al. Rupture tests of reinforcing fibers and a unidirectional laminate using acoustic emissions. *Instruments and experimental techniques*, 2022, vol. 65, iss. 2, pp. 305–313. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441222020014>.
9. Saeedifar M., et al. Acoustic emission-based methodology to evaluate delamination crack growth under quasi-static and fatigue loading conditions. *Journal of nondestructive evaluation*, 2018, vol. 37, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0454-0>.
10. Du J., et al. Acoustic emission monitoring for damage diagnosis in composite laminates based on deep learning with attention mechanism. *Mechanical systems and signal processing*, 2025, vol. 222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111770>.
11. Gee M., Roshanmanesh S., Hayati F., Papaelias M. Multi-variant damage assessment in composite materials using acoustic emission. *Sensors*, 2025, vol. 25, iss. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25123795>.
12. Du J., et al. Time-frequency analysis of acoustic emission signals in composite materials under repeated impact conditions. *Polymer composites*, 2025, vol. 46, iss. 13, pp. 12407–12420. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.29752>.
13. Saeedifar M., et al. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 144, pp. 206–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.028>.
14. Pan Z., et al. Flexural damage and failure behavior of 3D printed continuous fiber composites by complementary nondestructive testing technology. *Polymer composites*, 2022, vol. 43, iss. 5, pp. 2864–2877. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.26582>.
15. Li W., Cheng J., Jiang P., Liu Y. Klasternyy analiz dannykh akusticheskoy emissii sloistykh kompozitnykh materialov s razlichnoy orientatsiey mezhfaznykh volokon na osnove modeli gaussovoy smesi [Acoustic emission cluster analysis of composite laminates with different interfacial fiber orientations based on gaussian mixture model]. *Russian journal of nondestructive testing*, 2023, no. 3, pp. 14–30. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0130308223030028> (in Russ.).