Сравнение энергетических спектров сигналов акустической эмиссии по фрактальным размерностям и сравнительным диаграммам / А.Е. Волков, Е.В. Черняева, Н.А. Казаринов, Н.А. Волкова. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.10 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 1. – С. 129–138.

Perm Polytech Style: Volkov A.E., Chernyaeva E.V., Kazarinov N.A., Volkova N.A. The Comparison of Energy Spectra of Acoustic Emission Signals by Fractal Dimensions and Comparative Diagrams. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 1, pp. 129-138. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.10

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.10
УДК 620.179.16

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО ФРАКТАЛЬНЫМ РАЗМЕРНОСТЯМ И СРАВНИТЕЛЬНЫМ ДИАГРАММАМ

А.Е. Волков[1], Е.В. Черняева[1], Н.А. Казаринов[2], Н.А. Волкова[3]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3]Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 20 ноября 2024 г.
Одобрена: 05 марта 2025 г.
Принята к публикации: 28 марта 2025 г.

Ключевые слова:

акустическая эмиссия, сравнение сигналов, индентирование, спектральная плотность мощности, фрактальная размерность, сравнительная диаграмма спектров.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены проблемы анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ), направленного на исследование изменения состояния материала образцов в результате их испытаний. Поскольку получить информацию непосредственно о характеристиках источников АЭ очень сложно ввиду искажений сигналов из-за наличия дисперсии, неодинакового затухания на разных частотах, отражений от свободных поверхностей образца, искажений, создаваемых датчиком, волноводом и усилителем электрических колебаний, в данной работе предложено сравнивать характеристики сигналов, полученных на «свежих» (контрольных) образцах и образцах, испытавших механические воздействия. Рассмотрено выявление различий сигналов путем построения сравнительной диаграммы спектров, представляющей модуль отношения усредненных Фурье-образов сигналов. Другой способ анализа сигналов основан на поиске таких их характеристик, которые не изменяются под действием многих из перечисленных искажений. Поскольку график спектральной плотности мощности имеет сложную изломанную форму, он может быть рассмотрен как фрактальная кривая. Ее важнейшей характеристикой является фрактальная размерность, которая определяется условиями формирования сигналов и, следовательно, может служить признаком для их классификации. Для примера исследовали образец из стали 20, который подвергли циклическому нагружению от напряжения $\sigma = 0$ до напряжения $\sigma_{max} = 1{,}2\sigma_т$, ($\sigma_т$ – предел текучести) и разгрузке до нуля с частотой $f = 20$ Гц. Испытание прекратили на 8851-м цикле, когда сформировалась «шейка», а относительное удлинение составило 15 %. Сравнивали сигналы АЭ, возникающие при индентировании образца в областях, расположенных на различных расстояниях от шейки. Фрактальная размерность спектров мощности при приближении к зоне шейки снижалась с 0,72 до 0,62. На сравнительной диаграмме спектров выделялись пики вблизи частот 270 и 680 кГц. Таким образом, рассмотренные способы сравнения сигналов позволяют оценить степень изменения состояния образцов в результате механических испытаний.

© **Волков Александр Евгеньевич** – д. ф.-м. н., проф. кафедры теории упругости, e-mail: a.volkov@spbu.ru.
Черняева Елена Васильевна – к. т. н., с. н. с. кафедры теории упругости, e-mail: e.chernyaeva@spbu.ru.
Казаринов Никита Андреевич – д. ф.-м. н., с. н. с., доцент кафедры теории упругости, 7/9, e-mail: nkazarinov@gmail.com.
Волкова Наталия Александровна – к. ф.-м. н., доцент, e-mail: navolkova@list.ru.

Alexandr E. Volkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: a.volkov@spbu.ru.
Elena V. Chernyaeva – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: e.chernyaeva@spbu.ru.
Nikita A. Kazarinov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, e-mail: m.evard@spbu.ru.
Natalia A. Volkova – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: navolkova@list.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THE COMPARISON OF ENERGY SPECTRA OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS BY FRACTAL DIMENSIONS AND COMPARATIVE DIAGRAMS

A.E. Volkov[1], E.V. Chernyaeva[1], N.A. Kazarinov[2], N.A. Volkova[3]

[1]St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation
[3]St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 November 2024
Approved: 05 March 2025
Accepted for publication: 28 March 2025

Keywords:

acoustic emission, comparison of signals, indentation, spectral power density, fractal dimension, comparative diagram of spectra.

ABSTRACT

The article analyzes acoustic emissions (AE) aimed at studying changes in the state of the material caused by deformation. It is very difficult to obtain information directly about characteristics of AE sources because of signal distortions caused by dispersion, unequal attenuation at different frequencies, reflections from free surfaces of the sample, distortions created by the sensor, waveguide and amplifier of electrical oscillations. This paper proposes to compare the characteristics of signals obtained from *"fresh"* (control) samples and samples that have experienced mechanical testing. Differences between signals are identified with a comparative diagram of spectra representing the modulus of the ratio of Fourier images of signals. Another method used in this work for analyzing signals is based on searching for such characteristics that do not change under the influence of many of the listed distortions. The graph of the spectral power density has a complex serrated shape and, thus, can be considered as a fractal curve which important attribute is the fractal dimension. It is affected by the signal formation conditions and, therefore, can serve as a characteristic for their classification. As an example, a sample of steel 20 was studied. It was subjected to cyclic loading from stress $\sigma = 0$ to $\sigma_{max} = 1.2\sigma_y$, ($\sigma_y$ is the yield strength) and unloading, with a frequency of $f = 20$ Hz. The test was stopped at the 8851st cycle, when the *"neck"* was formed, and the relative elongation was 15%. We compared the AE signals generated during sample indentation in areas located at different distances from the neck. The fractal dimension of the power spectra decreased from 0.72 to 0.62 when approaching the neck zone. Peaks near the frequency of 270 kHz and 680 kHz were distinguished on the comparative diagrams of the spectra. Thus, the considered methods of signal comparison allow us to estimate the degree of change in the state of samples occurred because of mechanical tests.

Введение

Сигналы акустической эмиссии (АЭ) генерируются при быстром изменении напряженного состояния (разгрузке) в отдельных областях нагруженного тела (металла, композита, горной породы) в результате произошедшей в них неупругой деформации посредством дислокационного сдвига, двойникования, мартенситного превращения, разрушения посредством образования или продвижения трещины, а также в результате распространения коррозии. Одной из первых работ, посвященных изучению АЭ, была работа А.Ф. Иоффе [1], в которой отмечена генерация звука при деформировании цинка и нагретой каменной соли. Первые систематические исследования АЭ были выполнены в докторской диссертации Д. Кайзера [2], основные результаты которой были опубликованы в работе [3]. В этих работах исследовалась АЭ в процессе растяжения, когда генерация звука была обнаружена при деформировании многих материалов. Автор констатировал, что «шумы необратимы, т.е. после напряжения определенного уровня шум возникает только тогда, когда тот же образец снова подвергается нагрузке, когда уровень первого напряжения превышен». Данный эффект сейчас называется эффектом Кайзера. Относительно недавние исследования показали, что эффект Кайзера изменяется при варьировании ориентации главных осей или (и) главных значений тензора напряжения [4].

Более подробно история развития науки о причинах АЭ, ее классификации, закономерностях, методах регистрации и последующего анализа изложена в учебном пособии Л.А. Оглезневой и А.Л. Калиниченко [5]. В настоящее время исследования АЭ применяются для решения многих прикладных и фундаментальных задач, среди которых фиксация факта и определение местоположения возникновения трещины, неразрушающий контроль состояния материала, в частности обнаружение состояния, предшествующего разрушению (для горных пород – землетрясению). Вопросы классификации, распространения, дисперсии, затухания и регистрации ультразвуковых волн изложены в учебном пособии [6]. Там же указано, что механизмы деформирования и разрушения материала при испытаниях определяют связь потока импульсов АЭ с параметрами нагружения и в конечном счете используются для обоснования критериев браковки.

В работе [7] установлено, что в осадочных породах при увеличении скорости деформации наблюдается АЭ-эффект, который заключается в росте интенсивности излучения в частотном диапазоне от сотен герц до первых десятков килогерц, наиболее сильно он проявляется на

заключительной стадии подготовки землетрясений. Исследование АЭ при подвижках грунта смоделировано в работе А.А. Остапчука с соавт. [8]. В ней показано, что перед динамическими срывами наблюдается степенной рост количества акустических импульсах и микроподвижках, причем на стадии подготовки динамических срывов излучаются высокочастотные (30–80кГц) импульсы, а динамический срыв проявляется в виде низкочастотного (< 20 кГц) сигнала.

Пример комплексного использования акустических методов для наблюдения дефектов в углепластике – метода АЭ в сочетании с методом акустоупругости – приведен в работе [9]. Достоверность локации дефектов обеспечена методом АЭ, а определение деформаций основано на эффекте акустоупругости, заключающегося в зависимости скорости упругих волн Лэмба от деформации, что позволяет измерять напряжения по временам задержки упругих волн Лэмба.

Ввиду возможностей метод АЭ положен в основу ГОСТ Р 52727–2007 [10], в котором утверждается, что в основе метода АЭ (как метода неразрушающего контроля и технической диагностики) «лежит физическое явление излучения волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала» и что «источником акустико-эмиссионной энергии служит переменное поле упругих напряжений от развивающихся дефектов». В [10] отмечено, что «метод акустической эмиссии (АЭ) является чувствительным к любым видам структурных изменений в широком частотном диапазоне работы (обычно от 10 до 1000 кГц). Оборудование способно регистрировать не только хрупкий рост трещин, но также процессы развития локальной пластической деформации, затвердевания, кристаллизации, трения, ударов, течеобразований и фазовых переходов». Подробное изложение преимуществ и ограничений метода АЭ при решении производственных задач представлено в обзорной работе [11].

Получить непосредственную информацию о природе источников АЭ очень сложно ввиду искажений сигналов за счет отражений от свободных поверхностей образца, возбуждения разных типов волн, имеющих различные скорости распространения (продольных, поперечных, поверхностных волн Рэлея, волн Лэмба); искажений из-за дисперсии волн и из-за различного коэффициента затухания волн разной частоты; искажений, создаваемых датчиком, волноводом и усилителями электрических колебаний. Одним из путей является поиск информативных параметров АЭ, которые сохраняются при передаче и преобразовании сигналов. Исследователи рассматривают такие характеристики АЭ, как общее количество сигналов, их энергия, автокорреляционная функция, взаимная корреляционная функция, спектральная плотность мощности, медианная частота, а также ряд других характеристик [12; 13]. В работе [14] показано, что при статическом нагружении образцов из дюралюминия при низкой температуре –50 °С количество регистрируемых сигналов увеличивалось, но энергия высокочастотной составляющей сигналов АЭ уменьшалась. В этой же работе показано, что некоторые характеристики спектров сигналов, полученных с помощью преобразования Фурье или вейвлет-преобразования, позволяют определять начало разрушения, хотя сами спектры подвергаются искажениям. Среди других параметров для предсказания начала разрушения используют среднюю частоту и угол нарастания сигнала АЭ [15] и параметр разупорядоченности АЭ-данных [16].

График зависимости амплитуды сигнала от времени имеет сложную изломанную форму. Он может быть рассмотрен как фрактальная кривая, важнейшей характеристикой которой является фрактальная размерность. Идеи фрактальной и мультифрактальной геометрии, используемые при анализе АЭ, изложены в книге [17].

Расчет фрактальных размерностей был использован в работах [18–23]. В [18] изучены методы анализа сигналов АЭ, рассматриваемых как временные ряды, по которым строили множество d-мерных векторов и вычисляли его корреляционную размерность. Другой способ, использованный в этой работе, заключался в построении кумулятивных рядов для последовательностей времен наступления и энергий событий АЭ, для которых вычисляли корреляционные интегралы и корреляционную размерность. В работе [19] применен информационно-статистический подход для исследования временных рядов АЭ, в рамках которого найдены информационная энтропия, фрактальная размерность и параметр самоорганизации сигнала АЭ. Показано, что эти параметры имеют меньшие значения для области максимального упрочнения. Установлено, что уменьшение информационной энтропии и фрактальной размерности свидетельствует о снижении хаотичности сигнала АЭ. Аналогичный подход использован в работе [20], в которой последовательность сигналов АЭ характеризовали корреляционной фрактальной размерностью множества векторов, построенного по алгоритму Грассберга – Прокаччи [21]. Метод, основанный на изучении фрактальной размерности, для определения особенностей сигнала АЭ при влиянии на них шума предложен в работе [22]. В работах [23; 24] методика мультифрактального анализа использована для изучения сейсмических сигналов. Показано, что метод анализа флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов может быть использован для изучения низкоэнергетических сейсмических сигналов перед, во время и после наступления сейсмических событий. Указано, что необходимо изучать динамику спектра сингулярности временного ряда, изменение которого может свидетельствовать об изменении характера исследуемых процессов, которое может быть невидимо как для традиционных методов, так и для фрактального анализа, основанного на расчёте только показателя Хёрста.

Другим способом анализа сигналов является поиск таких их характеристик, которые не изменяются под действием многих из перечисленных искажений. В данной работе рассмотрен способ анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ), основанный на том обстоятельстве,

что график энергетического спектра сигнала, имеющий сложную изломанную форму, может быть рассмотрен как фрактальная кривая, важнейшей характеристикой которой является фрактальная размерность. Эта характеристика изменяется при варьировании условий формирования сигналов и, следовательно, может служить характеристикой для классификации сигналов АЭ. Этот метод был использован для выявления изменений спектральных характеристик сигналов АЭ в результате испытаний на малоцикловую усталость.

Ввиду этих обстоятельств перспективным является сравнение характеристик сигналов, полученных на «свежих» образцах и образцах, испытавших различные механические (в частности циклические) воздействия. Разработка надежных способов сравнения открывает пути для оценки остаточного ресурса деталей для принятия решения о возможности их дальнейшего использования.

В работах [25; 26] на примере алюминиевых (сплав Д16) и стальных (стали 20, 45Х и 5Г17Ю3) образцов было показано, что в энергетических спектрах сигналов АЭ, полученных при индентировании металла после циклических испытаний, фиксируются характерные изменения по сравнению со спектрами сигналов от образцов в исходном состоянии. Во всех случаях «искажения» имели похожий характер: с увеличением количества циклов испытаний пики на кривой спектральной плотности энергии снижались и «раздваивались» в сторону увеличения частоты.

Оригинальный способ исследования эволюции энергетического спектра сигналов, генерируемых при деформировании образца, был реализован в работах [27; 28], в которых для анализа АЭ в процессе непрерывного деформирования образцов вводится параметр эволюции АЭ, равный интегралу по всем частотам от логарифмической производной по времени энергетического спектра сигнала. Таким образом, вычисляется относительное изменение спектра за малый интервал времени. В этих работах показано, что введенный параметр, во-первых, возрастает по модулю на ранних стадиях пластического течения и, во-вторых, мало зависит от характеристик широкополосного датчика, волновода и усилителя сигналов АЭ.

Аналогичная идея, использованная в настоящей работе, лежит в основе сравнения сигналов, полученных на одинаковых образцах до и после их испытаний. Она состоит в построении сравнительного спектра, представляющего собой отношение усредненных Фурье-образов сигналов. Если уравнения, описывающие генерацию, распространение и регистрацию сигналов, линейны, то это отношение равно отношению Фурье-образов сигналов до искажений, то есть в том виде, в каком они возникли внутри материала.

Методика анализа изменения спектра сигналов АЭ

Построение сравнительного спектра основано на предположении, что процессы генерации, распространения и регистрации сигналов описываются линейными уравнениями. Пусть $w(t)$ – оригинальный сигнал, каким он порожден в материале, а $x(t)$ – зарегистрированный сигнал, искаженный при прохождении по образцу и приеме датчиком. Тогда предполагаем, что функции $w(t)$ и $x(t)$ связаны уравнением

$$Lx(t) = w(t), \tag{1}$$

где L – линейный дифференциальный оператор. Применяя к уравнению (1) преобразование Фурье, получим

$$B(f)X(f) = W(f)$$

или

$$X(f) = A(f)\ W(f), \tag{2}$$

где f – частота, $W(f)$ и $X(f)$ – Фурье-образы функций $w(t)$ и $x(t)$, а $A(f)$ и $B(f)$ – прямая и обратная передаточные функции. Оператор L и функции $A(f)$ и $B(f)$ зависят от условий распространения и регистрации сигналов. Кроме сигналов, генерируемых пластическими сдвигами или растрескиваниями, аппаратура записывает также шум различной природы.

Обозначим возмущение, создаваемое шумом, через $w_{\text{шум}}(t)$, а его спектр через $W_{\text{шум}}(f)$. Если регистрируется только шум, то аппаратура покажет спектр $X_{\text{шум}}.= AW_{\text{шум}}$. Если же регистрируется и сигнал, и шум, то спектр АЭ будет равен

$$X = X_{\text{деф}} + X_{\text{шум}} = A(W_{\text{деф}} + W_{\text{шум}}),$$

где нижний индекс «деф» обозначает, что АЭ порождена деформацией. Пусть с помощью одного и того же датчика получены сигналы от двух образцов (или от двух областей одного образца), спектры которых X_1 и X_2. Тогда

$$X_{\text{деф1}} = X_1 - X_{\text{шум}} = AW_{\text{деф1}}, X_{\text{деф2}} = X_2 - X_{\text{шум}} = AW_{\text{деф2}}.$$

Построим сравнительный спектр W_{21} двух сигналов в форме отношения

$$W_{21} = \frac{X_2 - X_{\text{шум}}}{X_1 - X_{\text{шум}}} = \frac{AW_{\text{деф2}}}{AW_{\text{деф1}}} = \frac{W_{\text{деф2}}}{W_{\text{деф1}}}, \tag{3}$$

которое, хотя и не позволяет найти спектры $W_{\text{деф1}}$ и $W_{\text{деф2}}$, но дает сравнительную информацию об этих сигналах, не зависящую от условий прохождения сигналов и параметров регистрирующей аппаратуры.

Характеристикой сигнала АЭ, которая не изменяется под действием искажений, вносимых волноводами и датчиком, возможно, является фрактальная размерность спектра. Если она зависит от условий формирования сигналов, то может быть использована для их классификации. График спектральной плотности энергии имеет сложную изломанную форму. Его фрагменты при уменьшении их размера не являются в точности подобными, поэтому данный график нельзя характеризовать только одной фрактальной размерностью то есть с точки зрения теории фракталов его следует классифицировать как мультифрактал. Кроме того, как все природные объекты, его фрактальный характер прослеживается только до

определенных минимальных размеров, то есть он представляет собой предфрактал. В качестве примера рассмотрим график нормированной спектральной плотности энергии некоторого сигнала, заданной на дискретном наборе равноотстоящих частот (рис. 1). Будем рассматривать его как график плотности распределения частот, в котором нормированная энергия играет роль вероятности встретить данное значение частоты.

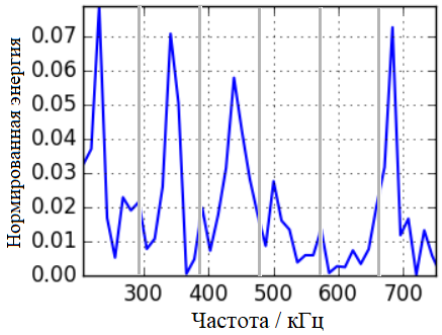


Рис. 1. Схема расчета фрактальной размерности спектральной плотности мощности сигнала АЭ. Вертикальные линии делят интервал значений энергии на *N* частей

Fig. 1. A scheme for calculating the fractal dimension of the spectral power density of the AE signal. Vertical lines divide the range of energy values into *N* parts

Выберем количество m отчетов частоты, входящих в один интервал разбиения всей области значений частоты. Таким образом, эта область оказывается разбита на $N(m)$ интервалов. Найдем

$$D_1(m) = \frac{-1}{\log_2 m} \sum_{i=1}^{N(m)} p_i \log_2 p_i,$$

где p_i – сумма значений энергии, соответствующей всем частотным отсчетом из i-го частотного интервала. Если бы существовала возможность неограниченно увеличивать число интервалов разбиения, то величина $D_1 = \lim_{m\to\infty}\left(D_1(m)\right)$ представляла бы собой информационную фрактальную размерность графика спектральной плотности энергии. При конкретных вычислениях количество интервалов $N(m)$ выбирали достаточно большим (соответственно m – достаточно малым). При этом оказывалось, что значения $D_1(m)$ слабо различаются при близких малых значениях m, так что величина $D_1(m)$ может служить оценкой информационной фрактальной размерности графика спектральной плотности энергии.

Для экспериментального исследования выбран образец из рулонной стали марки 20 (ГОСТ 10705), вырезанный из электросварной прямошовной трубы производства ТЭСЦ-3 ТЭСК МСД ОАО «Выксунский металлургический завод» диаметром 426 и толщиной стенки 7 мм, предел текучести $\sigma_т$ = 360 МПа, сваренной токами высокой частоты. Образец был подвергнут циклическому нагружению: отнулевой цикл с максимальным напряжением σ_{max} =1,2$\sigma_т$, частотой f = 20 Гц. Испытание прекратили на стадии формирования «шейки», видимой невооруженным глазом, в результате которого его относительное удлинение составило 15 %. При этом количество циклов равнялось 8851. Изучали сигналы АЭ, возникающие при внедрении в образец твердосплавного конического индентора со скоростью 1,0 мм/мин на испытательной машине ИМ-4А. Максимальная нагрузка на индентор составляла 1000 Н. Для регистрации и преобразования АЭ-сигналов в электрические применяли широкополосный датчик АЭ MSAE-L2 и усилитель MSAE-FA010 с общим усилением 87 дБ. Амплитудно-частотная характеристика датчика со встроенным предусилителем характеризуется плавным снижением чувствительности от 92 дБ (по отношению к уровню 1 В/(м/с)) при 100 кГц до 65 дБ при 500 кГц. Внешний вид установки показан на рис. 2. Поверхность образцов очищали от окислов и шлифовали. Индентирование проводили вдоль всей длины образца. Для каждого укола сигналы АЭ с использованием методики цифрового распознавания и анализа спектров [29] разбивали на группы по форме кривой энергетического спектра и строили усредненные спектры по каждой группе. В данной работе для всех изученных образцов 95–100 % составляли сигналы со спектром одного вида, что свидетельствует о действии источников АЭ одного типа.

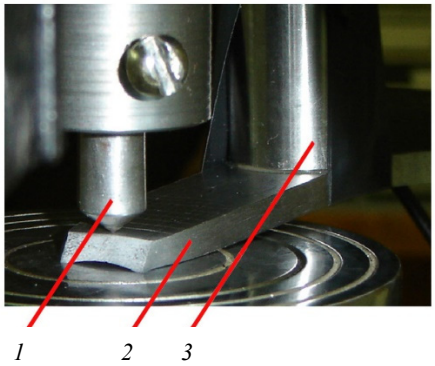


Рис. 2. Внешний вид установки: *1* – блок нагружения с коническим индентором; *2* – испытываемый образец; *3* – датчик АЭ

Fig. 2. The installation: *1* – loading unit with a conical indenter; *2* – test sample; *3* – AE sensor

Результаты анализа сигналов АЭ

Инициирование АЭ осуществляли путём вдавливания твердосплавного конического индентора на испытательной машине ИМ-4А. Уколы производили в точках, распределенных вдоль оси образца от одной области захвата (недеформированный материал) через рабочую часть, включающую шейку, до области второго захвата. На рис. 3 приведена фотография рабочей части образца и сопоставленные с ней графики распределений параметров АЭ. Из данных рис. 3 видно, что такие характеристики АЭ, как количество сигналов, средняя энергия

и информационная фрактальная размерность D_1 усредненного энергетического спектра, имеют существенные отличия в области локализации деформации. Там регистрируется большее общее количество сигналов, энергия усредненного сигнала имеет большее значение, а фрактальная размерность среднего сигнала изменяется сложным образом, имея наименьшее значение в наиболее сильно деформированной области вблизи шейки. Таким образом, рассмотренные характеристики АЭ могут служить индикатором роста плотности дефектов.

Для оценки изменения характера АЭ после механических испытаний образца выполнили сравнение сигналов, полученных индентированием вблизи захвата, где состояние образца близко к исходному (точка *2* на рис. 3, *a*), в рабочей части образца (точки *9*, *10*, *15* на рис. 3, *a*) и вблизи шейки, там, где предварительная деформация наибольшая (точка *16* на рис. 3, *a*). На рис. 4 показаны спектры сигналов, полученных при индентировании в различных точках образца, а также сравнительные диаграммы спектров.

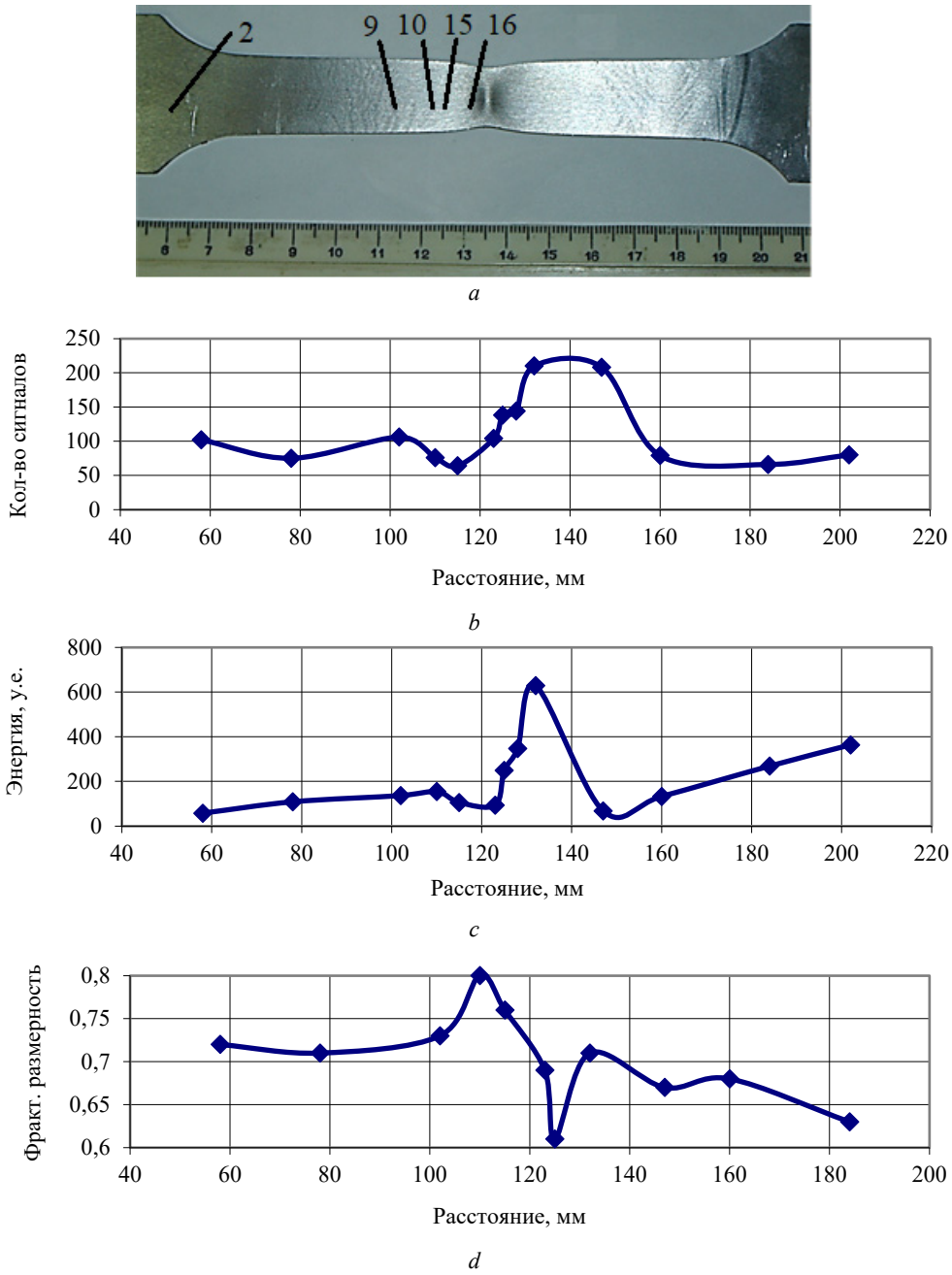


Рис. 3. *a* – фотография образца после циклических испытаний. Параметры акустической эмиссии при индентировании образца в различных точках, распределенных по его длине: *b* – количество сигналов; *c* – энергия усредненного сигнала; *d* – фрактальная размерность спектра усредненного сигнала

Fig. 3. *a* – photo of the sample after cyclic testing. Acoustic emission parameters during sample indentation at various points distributed along its length: *b* – number of signals; *c* – energy of the mean signal; *d* – fractal dimension of spectrum of the mean signal

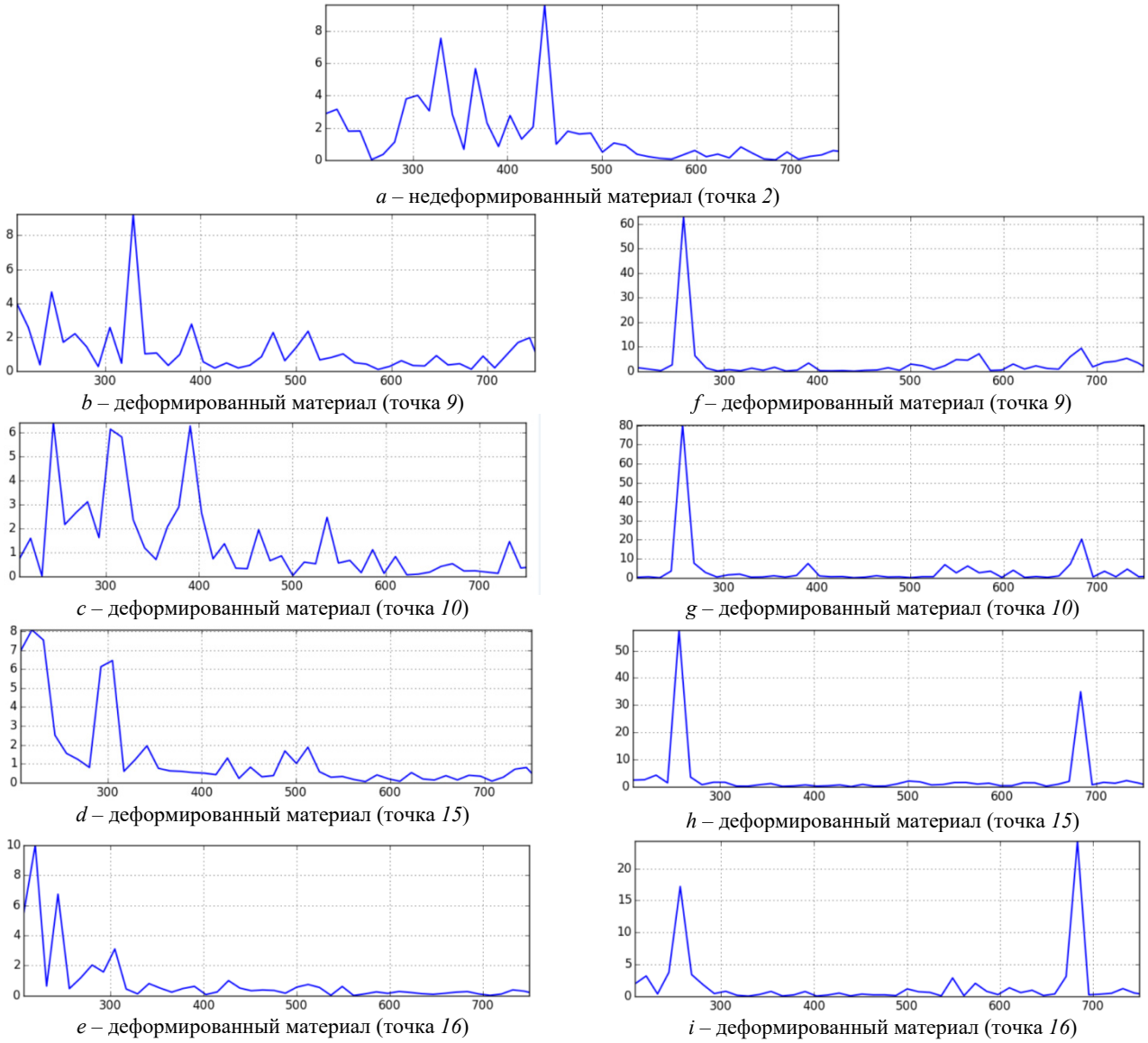


Рис. 4. *a, b, c, d, e* – спектральная плотность мощности АЭ-сигнала в точках *2, 9, 10, 15, 16*; *f, g, h, i* – сравнительные диаграммы спектров сигналов от деформированного материала в точках *9, 10, 15, 16* с сигналом от недеформированного материала в точке *2*

Fig.4. *a, b, c, d, e* spectral power density of the AE signal at points *2, 9, 10, 15, 16*; *f, g, h, i* comparative diagrams of spectra signals from the deformed material at points *9, 10, 15, 16* with a signal from the undeformed material at point *2*

Визуальное сравнение позволяет обнаружить изменения спектра сигнала, однако достаточно сложно явно сформулировать характер этих изменений. На сравнительных диаграммах различие сигналов видно более отчетливо. В частности, выделяется пик вблизи частоты 270 кГц, высота которого снижается по мере приближения к области шейки. Одновременно увеличивается высота пика, расположенного вблизи частоты 680 кГц. Сравнительная диаграмма не является спектром какого-либо сигнала, поэтому неясно, как можно объяснить имеющиеся на ней пики. Поскольку условия получения и регистрации сигналов АЭ на сравниваемых образцах одинаковые (одинаковые размеры образцов, один и тот же индентор, один и тот же датчик и его расположение относительно индентора, один и тот же усилитель электрической записи сигнала), то линейные искажения сигналов, вносимые этими факторами, согласно формуле (3), на сравнительную диаграмму не влияют. Таким образом, можно предположить, что пики на диаграммах, представленных на рис. 4 (*f*, *g*, *h*, *i*), связаны с изменениями в условиях генерации сигналов (плотности и расположения дефектов), произошедших в процессе циклического нагружения. При этом остается неясным, с чем связано появление пиков вблизи конкретных значений частот.

Из данных рис. 5 видно, что оценка фрактальной размерности в сильно деформированном материале равна 0,62 (при $N(m)$=50), то есть меньше, чем в недеформированном (0,72). Измеренная в ходе выполненных экспериментов оценка фрактальной размерности шума (также при $N(m)$=50) равнялась 0,86. Таким образом, снижение величины этого параметра может служить признаком уменьшения хаотичности сигнала.

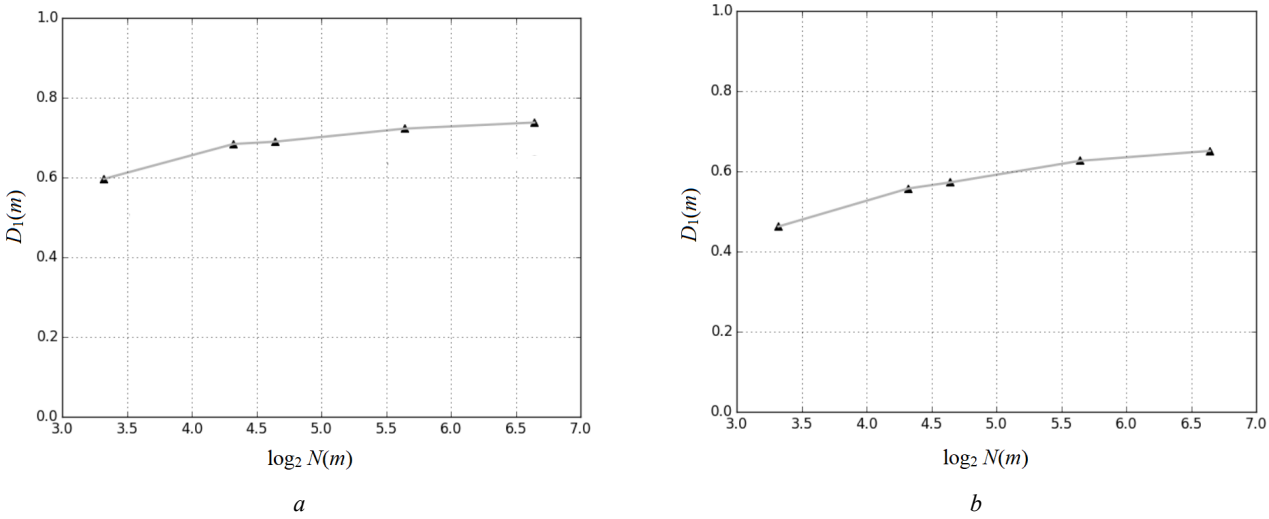


Рис. 5. Зависимости оценки информационной фрактальной размерности $D_1(m)$ спектра мощности сигнала от числа разбиения $N(m)$ для сигналов, полученных при индентировании: *a* – недеформированного материала в точке *2*; *b* – деформированного материала в точке *16*

Fig. 5. Dependences of the estimate of the information fractal dimension $D_1(m)$ of the signal power spectrum on the number of partitions $N(m)$ for the signals obtained during indentation: *a* – undeformed material at point *2*; *b* – deformed material at point *16*

Заключение

Фрактальная размерность энергетического спектра сигнала акустической эмиссии зависит от деформационной истории материала. После значительной пластической деформации стали 20 фрактальная размерность снижается, что, по-видимому, означает уменьшение хаотизации сигнала. Сравнительные диаграммы спектров плотности мощности позволяют выявить различие сигналов, полученных в разных условиях, в частности до и после механических испытаний. Таким образом, рассмотренные характеристики могут служить признаками для классификации сигналов, а их изменения, возможно, свидетельствуют о формировании новых структур деформационных дефектов.

Библиографический список

1. Иоффе, А.Ф. Физика кристаллов / А.Ф. Иоффе. – М.; Л.: Госиздат, 1929.

2. Kaiser, J. Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, o, O. (Maschinenschr): Dr.-Ing.-Diss., Techn, Hochsch / J. Kaiser. – Miinchen, 1950.

3. Kaiser, J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen / J. Kaiser // Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1953. – Bd 24, no 1/2. – S. 43–45.

4. Эффект Кайзера при многоосном непропорциональном сжатии песчаника / И.А. Пантелеев, В.А. Мубассарова, А.В. Зайцев, В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов, Н.И. Шевцов // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т.495. – С.63–67.

5. Оглезнева, Л.А. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II: учебное пособие / Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.

6. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учеб. пособие / С.А. Бехер, А.Л. Бобров. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2013. – 145 с.

7. Марапулец, Ю.В. Высокочастотный акустоэмиссионный эффект / Ю.В. Марапулец // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2015. – № 1(10). – С. 44-53. DOI: 10.18454/2079-6641-2015-10-1-44-53

8. Исследование сигналов акустической эмиссии при сдвиговом деформировании трещины / А.А. Остапчук, Д.В. Павлов, В.К. Марков, А.В. Крашенинников // Акуст. журн. – 2016. – Т. 62, № 4. – С. 503–512.

9. Исследование возможности комплексного применения методов акустической эмиссии, тензометрии и эффекта акустоупругости для контроля углепластиков при статическом нагружении / Л.Н. Степанова, А.Н. Курбатов, С.И. Кабанов, С.А. Бехер, В.В. Чернова, Е.С. Терехова // Контроль. Диагностика. – 2025, №1. – С. 13–25.

10. ГОСТ Р 52727–2007 Национальный стандарт Российской Федерации. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2007.

11. Современные возможности метода акустической эмиссии при оценке технического состояния промышленного оборудования: обзор и схемы применения / И.А. Растегаев, И. И. Растегаева, Д.Л. Мерсон, В.И. Иванов // Контроль. Диагностика. – 2024. – № 9. – С. 4–23.

12. Башков, О.В. Исследование и идентификация механизмов деформации и разрушения стали 12Х18Н10Т методом акустической эмиссии / О.В. Башков, С.В. Панин, Т.И. Башкова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – № II-1(2). – С. 145–154.

13. Овчарук, В.Н. Использование вторичных параметров спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии / В.Н. Овчарук // Моделирование систем. – 2005. – № 2(10). – С. 14–24.

14. Контроль образцов из дюралюминия Д16Т при статическом нагружении с использованием метода акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2024. – №2. – С. 4–14.

15. Acoustic emission, damage and fracture mechanisms of structural steel under mixed-mode loading / L.R. Botvina, A.I. Bolotnikov, I.O. Sinev, E.N. Beletsky // Engineering Fracture Mechanics. – 2023. – Vol. 292. – 109635.

16. Senapati, S. Acoustic emission data based modelling of fracture of glassy polymer / S. Senapati, A. Banerjee, R. Rajesh // Engineering Fracture Mechanics. – 2024. – Vol. 304. – 110154.

17. Божокин, С.В. Фракталы и мультифракталы: учебное пособие / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2001. – 128 с.

18. Мухамедов, В.А. Временные вариации фрактальных размерностей сейсмичности / В.А. Мухамедов, Б.С. Каррыев, Е.Г. Канель // Докл. РАН. – 1992. – Т. 322, № 3. – С. 490–497.

19. Информационно-статистический подход к анализу сигналов акустической эмиссии. / В.И. Ерофеев, А.В. Иляхинский, В.М. Родюшкин, Д.А. Рябов, А.А. Хлыбов // Акустический Журнал. – 2023. – Т. 69, № 4. – С. 490–496.

20. Fractal characteristics of acoustic emissions from coal under multi-stage true-triaxial compression / Dexing Li, Enyuan Wang, Xiangguo Kong, Xiaoran Wang, Chong Zhang, Haishan Jia, Hao Wang, Jifa Qian // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – Vol. 15, iss. 5. – P. 2021–2032.

21. Grassberger, P. Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach / P. Grassberger, I. Procaccia // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1984. – Vol. 13, iss. 1–2. – P. 34-54

22. Feature extraction of acoustic emission signals based on fractal dimension and independent component analysis / G.H. Liu, P.J. Huang, X. Gong, J. Gu, Z.K. Zhou // Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of South China University of Technology (Natural Science). – 2008. – Vol. 36(1). – P.76–80.

23. Долгополов, Б.К. Методика мультифрактального анализа сигнала на примере сейсмического шума / Б.К. Долгополов, В.Н. Сычев, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2017. – № 1. – С. 9–14.

24. Xie, X. Study on Multiple Fractal Analysis and Response Characteristics of Acoustic Emission Signals from Goaf Rock Bodies / X. Xie, S. Li, J. Guo // Sensors (Basel, Switzerland). – 2022. – Vol. 22(7). – 2746. DOI: 10.3390/s22072746

25. Черняева, Е.В. Влияние усталости на параметры акустической эмиссии в образцах из сплава AlCuPb / Е.В. Черняева, Д.Л. Мерсон, Д.Е. Мещеряков // Фазовые превращения и прочность кристаллов. Сб. тез. V Междунар. конф. (17–21 ноября 2008), Черноголовка. – 2008. – С. 111.

26. Черняева, Е.В. Спектральный анализ акустической эмиссии как перспективный метод оценки состояния материалов / Е.В. Черняева, Д.Л. Мерсон // Перспективные технологии и методы контроля. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ». – 2009. – С. 316–359.

27. Аглетдинов, Э.А. Метод определения сейсмических событий малых магнитуд в случайном временном ряду / Э.А. Аглетдинов, А.Ю. Виноградов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – №3(25). – С. 23–27

28. A Novel Bayesian Approach to Acoustic Emission Data Analysis / E. Agletdinov, E. Pomponi, D. Merson, A. Vinogradov // Ultrasonics. – 2016. – Vol. 72. – P. 89–94. DOI: 10.1016/j.ultras.2016.07.014

29. Мерсон, Д.Л. Применение методики анализа спектральных образов сигналов акустической эмиссии для исследования повреждаемости покрытий TiN на стальной подложке / Д.Л. Мерсон, А.А. Разуваев, А.Ю. Виноградов // Дефектоскопия. – 2002. – № 7. – С. 37–46.

References

1. Ioffe A.F. Fizika kristallov [Physics of crystals]. – M.; L.: Gosizdat, 1929.

2. Kaiser, J. Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, o, O. [1950]. (Maschinenschr.) – Dr.-Ing.-Diss., Techn, Hochsch. Miinchen.

3. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1953. Bd 24, N 1/2. S. 43–45.

4. Panteleev I.A., Mubassarova V.A., Zajtsev A.V., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B., Shevtsov N.I. Effekt Kajzera pri mnogoosnom neproporcional'nom szhatii peschanika [Kaiser effect at multiaxial non-proportional compression of sandstone] // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki (Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, technical sciences), 2020. V.495. – P.63-67.

5. Oglezneva L.A. Akusticheskie metody kontrolya i diagnostiki. Chast' II: uchebnoe posobie [Acoustic monitoring and diagnostic methods. Part II: Study guide] / L.A. Oglezneva, A.N. Kalinichenko. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. – 292 p.

6. S.A. Bekher, A.L. Bobrov Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoj emissii: ucheb. posobie [Fundamentals of non-destructive testing by acoustic emission method: study guide] – Novosibirsk: Izd-vo SGUPS, 2013. – 145 p.

7. Yu.V. Marapulets Vysokochastotnyj akustoemissionnyj effekt [High-frequency acoustic emission effect] // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki. 2015. N 1(10). P. 44-53. DOI: 10.18454/2079-6641-2015-10-1-44-53

8. Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krasheninnikov A.V. Issledovanie signalov akusticheskoj emissii pri sdvigovom deformirovanii treshchiny [Investigation of acoustic emission signals during shear deformation of a crack]. Akusticheskij. zhurnal. 2016. V.62. N 4. P. 503–512.

9. Stepanova L.N., Kurbatov A.N., Kabanov S.I., Bekher S.A., Chernova V.V., Terekhova E.S. Issledovanie vozmozhnosti kompleksnogo primeneniya metodov akusticheskoj emissii, tenzometrii i effekta akustouprugosti dlya kontrolya ugleplastikov pri staticheskom nagruzhenii [Investigation of the possibility of complex application of acoustic emission, strain gauge and acoustoelasticity methods for monitoring carbon fiber plastics under static loading] // Kontrol'.Diagnostika – 2025, N 1. – p. 13-25. Степанова

10. GOST R 52727–2007 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii "Tekhnicheskaya diagnostika. Akustiko-emissionnaya diagnostika. Obshchie trebovaniya" [The National standard of the Russian Federation "Technical diagnostics. Acoustic emission diagnostics. General requirements"]. / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii (Federal Agency for Technical Regulation and Metrology). Moscow. Standartinform 2007.

11. Rastegaev I.A., Rastegaeva I.I., Merson D.L., Ivanov V.I. Sovremennye vozmozhnosti metoda akusticheskoj emissii pri ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya promyshlennogo oborudovaniya: obzor i skhemy primeneniya [Modern possibilities of the acoustic emission method in assessing the technical condition of industrial equipment: overview and application schemes] // Kontrol'. Diagnostika. – 2024, N 9. – p. 4-23.

12. Bashkov O.V., Panin S.V., Bashkova T.I. Issledovanie i identifikaciya mekhanizmov deformacii i razrusheniya stali 12H18N10T metodom akusticheskoj emissii [Investigation and identification of mechanisms of deformation and fracture of 12X18H10T steel by acoustic emission method] // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010, N II-1(2). P. 145-154.

13. Ovcharuk V.N. Ispol'zovanie vtorichnyh parametrov spektral'nyh harakteristik signalov akusticheskoj emissii [Use of secondary parameters of spectral characteristics of acoustic emission signals] // Modelirovanie sistem, 2005. N 2(10). P.14-24.

14. Stepanova L. N., Kabanov S. I., Ramazanov I. S., Chernova V. V. Kontrol' obraztsov iz dyuralyuminiya D16T pri staticheskom nagruzhenii s ispol'zovaniem metoda akusticheskoj emissii [Control of duralumin D16T samples under static loading using the acoustic emission method] // Kontrol'.Diagnostika. – 2024, N 2. – p. 4-14.

15. Botvina L.R., Bolotnikov A.I., Sinev I.O., Beletsky E.N. Acoustic emission, damage and fracture mechanisms of structural steel under mixed-mode loading // Engineering Fracture Mechanics, 2023. Vol. 292, 109635.

16. Senapati S., Banerjee A., Rajesh R. Acoustic emission data based modelling of fracture of glassy polymer // Engineering Fracture Mechanics, 2024. V.304, 110154

17. Bozhokin S.V., Parshin D.A. Fraktaly i mul'tifraktaly: uchebnoe posobie [Fractals and multifractals: a textbook] Izhevsk: NIC "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika" (Regular and chaotic dynamics), 2001. 128 p.

18. Muhamedov V.A., Karryev B.S., Kanel' E. G. Vremennye variacii fraktal'nyh razmernostej sejsmichnosti [Temporal variations of fractal dimensions of seismic activity], Dokl. RAN (Reports of RAS), 1992, V. 322, N 3. P. 490– 497.

19. Erofeev V.I., Ilyahinskij A.V., Rodyushkin V.M., Ryabov D.A., Hlybov A.A. Informatsionno-statisticheskij podhod k analizu signalov akusticheskoj emissii [Information and statistical approach to the analysis of acoustic emission signals] Akusticheskij Zhurnal (Acoustic Journal), 2023, V. 69, N 4, p. 490–496.

20. Li Dexing, Wang Enyuan, Kong Xiangguo, Wang Xiaoran, Zhang Chong, Jia Haishan, Wang Hao, Qian Jifa. Fractal characteristics of acoustic emissions from coal under multi-stage true-triaxial compression // Journal of Geophysics and Engineering, Volume 15, Issue 5, October 2018, P. 2021–2032.

21. Grassberger P., Procaccia I. Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach // Physica D: Nonlinear Phenomena, 1984. Vol. 13, Iss. 1–2, P. 34-54

22. Liu G.H., Huang P.J. Gong, X., Gu J. Zhou Z.K. Feature extraction of acoustic emission signals based on fractal dimension and independent component analysis // Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2008. V. 36(1). P.76-80.

23. Dolgopolov B.K., Sychev V.N., Imashev S.A. Metodika mul'tifraktal'nogo analiza signala na primere sejcmicheskogo shuma [The technique of multifractal signal analysis on an example of seismic noise] // Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana (Science, new technologies and innovations of Kyrgyztan) N 1, 2017. – P.9-14.

24. Xie, X., Li, S., & Guo, J. (2022). Study on Multiple Fractal Analysis and Response Characteristics of Acoustic Emission Signals from Goaf Rock Bodies. Sensors (Basel, Switzerland), *22*(7), 2746. https://doi.org/10.3390/s22072746

25. Chernyaeva E.V., Merson D.L., Meshcheryakov D.E. Vliyanie ustalosti na parametry akusticheskoj emissii v obrazcah iz splava AlCuPb [Effect of fatigue on acoustic emission parameters in Al Cu Pb alloy samples] // Fazovye prevrashcheniya i prochnost' kristallov. Sb. tez. V Mezhdunar. konf.,17-21 noyabrya 2008, Chernogolovka (Phase transformations and strength of crystals. Abstracts of V Int. Conf. 17-21 November 2008), 2008. P.111.

26. Chernyaeva E.V., Merson D.L. Spektral'nyj analiz akusticheskoj emissii kak perspektivnyj metod ocenki sostoyaniya materialov [Spectral analysis of acoustic emission as a promising method for assessing the state of materials] in Perspektivnye tekhnologii i metody kontrolya – Vitebsk: izd-vo UO «VGTU» (Advanced technologies and control methods –Vitebsk: VSTU publishing house), 2009 – p.316-359.

27. Agletdinov E.A, Vinogradov A.Yu. Metod opredeleniya sejsmicheskih sobytij malyh magnitud v sluchajnom vremennom ryadu [A method for determining small-magnitude seismic events in a random time series] // Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013, N 3(25), P. 23-27.

28. Agletdinov E., Pomponi E., Merson D., Vinogradov A.A Novel Bayesian Approach to Acoustic Emission Data Analysis,. Ultrasonics – 2016. – Vol. 72. – P. 89-94. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.07.014

29. Merson D.L., Razuvaev A.A., Vinogradov. A.Yu. Primenenie metodiki analiza spektral'nyh obrazov signalov akusticheskoj emissii dlya issledovaniya povrezhdaemosti pokrytij TiN na stal'noj podlozhke [Application of a technique for analyzing spectral patterns of acoustic emission signals to study the damage of TiN coatings on a steel substrate] // Defektoskopiya. – 2002. – N 7. – P. 37-46.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект 116636233).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out with financial support from St. Petersburg State University (project 116636233).

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.