

В. Р. Скальський, О. М. Станкевич

Метод діагностики типів руйнування матеріалів із застосуванням до їх сигналів акустичної емісії вейвлет-перетворення

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Є. Андрейківим)

Запропоновано ефективний метод ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів у режимі реального часу. В його основу покладено новий критерій, побудований на аналізі амплітудно-частотних параметрів сигналів акустичної емісії, яка супроводжує руйнування. Показано, що застосування неперервного або дискретного вейвлет-перетворення сигналів дозволяє визначати типи руйнування на будь-якій стадії його розвитку під квазістатичним навантаженням.

У задачах оцінки стану промислових об'єктів особливої уваги потребує діагностика пошкодженості структури їхніх конструкційних матеріалів, оскільки за час тривалої експлуатації вони деградують і здебільшого окрихчуються. Це, в свою чергу, призводить до зростання небезпеки утворення та розвитку у них тріщиноподібних дефектів, а відтак — до непередбаченого катастрофічного руйнування конструкцій або виробів. Виявлення небезпечних дефектів у будь-який момент часу експлуатації об'єкта контролю та ідентифікування типу руйнування конструкційних матеріалів на ранніх стадіях його розвитку стає необхідною ланкою у розв'язанні актуальних задач технічного діагностування.

Стан проблеми. Для оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів у лабораторних умовах використовують аналіз діаграм розтягу [1], металографічні та фрактографічні дослідження [2], визначення в'язкості руйнування (тріщиностійкості) матеріалу [3]. Такі підходи до оцінки типів руйнування можливо реалізувати лише руйнівними методами. Тому для технічної діагностики стану об'єкта контролю під час його експлуатації вони непридатні. За аналізом зарубіжних та вітчизняних літературних джерел, на сьогодні значних результатів щодо ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів досягнуто за допомогою методу акустичної емісії (АЕ). Більшість відомих критеріїв ідентифікування побудовано на основі аналізу частотного спектра сигналу, який отримують за допомогою перетворення Фур'є [4–7].

Вагому інформацію про особливості динаміки процесів дефектоутворення у твердих тілах можна отримати, скориставшись методами вейвлет-перетворення (ВП) [8–12]. У роботах [10, 11] запропоновано критерій кількісної оцінки руйнування конструкційних матеріалів за параметрами неперервного вейвлет-перетворення (НВП) сигналів АЕ. Особливості макроруйнування матеріалів за енергетичним критерієм на основі дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) наведено у роботі [12].

Мета досліджень — провести порівняльний аналіз результатів неперервного та дискретного вейвлет-перетворення сигналів АЕ, отриманих під час руйнування зразків із різних конструкційних матеріалів.

Обґрунтування методики досліджень. З урахуванням властивостей вейвлет-коефіцієнтів НВП сигналів АЕ та результатів теоретичних досліджень зміни амплітудно-частотних характеристик пружних хвиль АЕ під час різних процесів руйнування у твердих тілах кількісною характеристикою сигналів АЕ під час руйнування раніше запропоновано критеріальний показник κ [10]:

$$\kappa = \frac{WT_{\max}\Delta f_0}{\Delta f}, \quad (1)$$

де WT_{\max} — максимальне значення вейвлет-коефіцієнта в події АЕ у певний момент часу; Δf — ширина смуги спектра частот, що відповідає WT_{\max} в події АЕ, у координатах $WT - f$; Δf_0 — ширина робочої смуги АЕ-тракту, що визначається робочою смугою частот первинного перетворювача (у даному випадку 0,2–0,6 МГц). Для побудови НВП сигналів АЕ використали програму AGU-Vallen Wavelet. У ролі материнського в програмі вибрано вейвлет Габора, який дозволяє добре виділяти локальні особливості сигналів АЕ та забезпечує їх частотно-часове представлення. Залежно від значення експериментально встановленого критеріального параметра тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в'язке ($\kappa < 0,1$), в'язко-крихке ($0,1 \leq \kappa < 0,2$) та крихке руйнування ($\kappa \geq 0,2$). З подальшим збільшенням значення κ схильність до крихкого руйнування матеріалу об'єкта контролю зростає.

Зважаючи на те, що на практиці ВП переважають дискретні сигнали, для їх аналізу широко застосовують дискретне вейвлет-перетворення, яке ще називають кратномасштабним аналізом [13]. У дискретному випадку для аналізу сигналу на різних масштабах використовують фільтри з різними частотами зрізу. Сигнал пропускають через деревовидноз'єднані високо- і низькочастотні фільтри. В результаті отримують послідовність вейвлет-компонент, кожна з яких має свій власний частотний діапазон. Як показує практика, у випадку ДВП для розкладу сигналу використовують переважно ортогональні вейвлети Добеші (DB). Оскільки чітко визначеної стратегії вибору того або іншого вейвлета на сьогодні не розроблено, ми проаналізували вейвлети DB3, DB5, DB7, DB20, які, як свідчать літературні джерела [8, 9], найчастіше використовують для дослідження сигналів АЕ. В результаті вибрано вейвлет DB5 і 5 рівнів розкладу, оскільки розклад за вейвлетами вищих порядків не впливав на його інформативність.

Часто для виявлення особливостей тих або інших сигналів застосовують енергетичний критерій [8, 12]. Розподіл енергії розглядають як співвідношення енергії кожного рівня розкладу до загальної енергії сигналу. По-перше, якщо енергія сигналу зосереджена на певному рівні, то іншими даними можна знехтувати, оскільки вони не мають значущої інформації, що дає можливість скоротити обсяг даних. По-друге, оскільки розподіл енергії для кожного рівня вейвлет-розкладу, що відповідає певному частотному діапазону, різний, це може бути пов'язано із певним механізмом руйнування, що важливо для вивчення особливостей процесу руйнування в цілому.

Результати досліджень та їх обговорення. Реалізація методики досліджень здійснювалася з використанням руйнування матеріалів різних типів. Під час випробувань паралельно проводився відбір АЕ-інформації за допомогою акустико-емісійної вимірювальної системи SKOP-8M [14] з використанням чотирьох вимірювальних АЕ-каналів і з відповідними її налаштуваннями: тривалість вибірки становила 0,5 мс, а період дискретизації аналогового сигналу — 0,25 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот — 600 кГц, фільтра високих — 200 кГц; поріг дискримінації був у межах 30%. Смуга частот вимірювально-

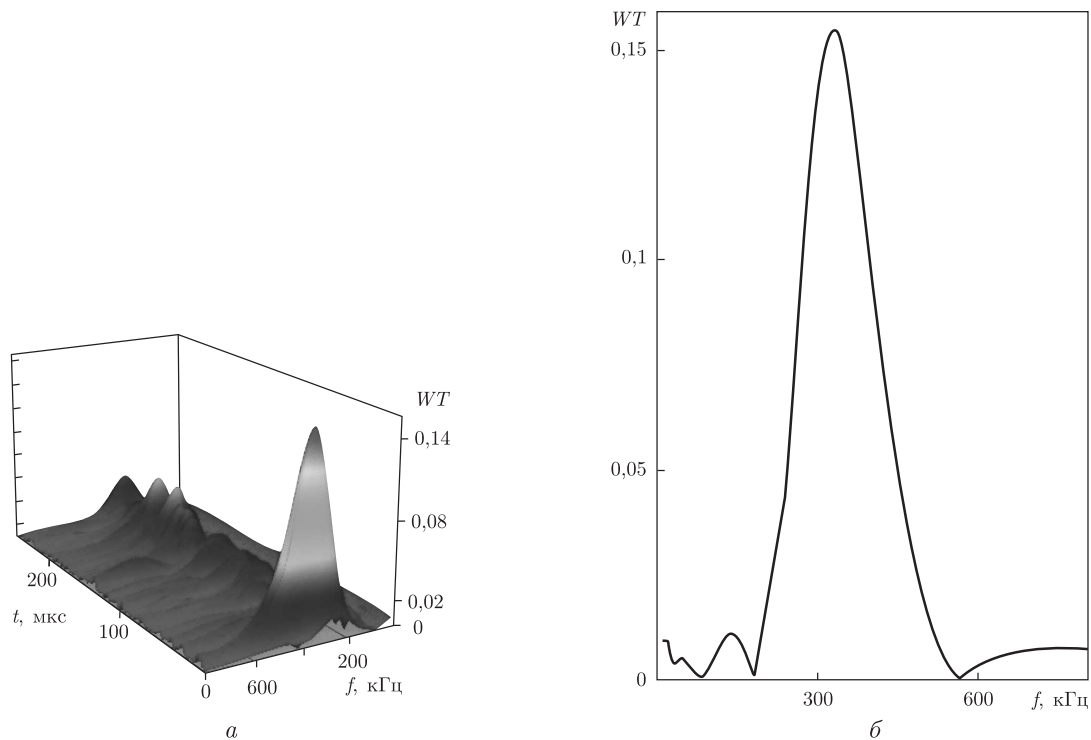


Рис. 1. НВП сигналів АЕ, які супроводжують акти руйнування скляної тротуарної плитки: *a* — 3D-зображення; *б* — 2D-проекція на площину вейвлет-коефіцієнт WT — частота f у момент часу, коли вейвлет-коефіцієнт набуває максимального значення WT_{\max}

го АЕ-тракту визначалася за робочою смугою частот ПАЕ і в нашому випадку становила 0,2–0,6 МГц, що узгоджується з відповідними значеннями у згаданому вище критерії ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів за співвідношенням (1). У режимі постобробки будувалися НВП та ДВП отриманих сигналів АЕ.

Особливості руйнування тротуарної RGB-плитки. Плитка мала форму зрізаної піраміди, нижня основа якої — квадрат зі стороною 95 мм, а верхня — зі стороною 90 мм. В середині вона порожниста (відсутня нижня грань), бокові стінки товщиною 15 мм, верхня грань — 10 мм, висота плитки — 60 мм. Виріб стискався по всій верхній площині на розривній машині УМЭ-10ТМ квазістатично із середньою швидкістю зміни навантаження 6,7 кПа/с [10].

НВП сигналів АЕ (рис. 1) будували за допомогою програмного забезпечення AGU-Valle Wavelet, перевівши попередньо у необхідний формат записану під час експерименту АЕ-інформацію. Для ілюстрації особливостей макроруйнування скла опрацьовувалися сигнали АЕ, отримані в результаті випробування плитки до повного руйнування.

За НВП для кожного сигналу АЕ встановлювалися такі параметри: максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} , відповідне йому значення частоти f (кГц) та ширина смуги частот Δf (МГц). За співвідношенням (1) визначали значення критеріального показника κ . Діапазон розкиду його значень був у межах $0,1 \leq \kappa \leq 0,8$, що відповідає квазікрихкому та крихкому типам руйнування.

Для побудови ДВП використовувалися попередньо запрограмовані обчислювальні модулі у середовищі Matlab 7.1. Сигнал за допомогою вейвлета DB5 розкладали на п'ять рівнів,

визначаючи розподіл енергії на кожному з них. Результат обчислень показав, що на рівнях розкладу $D2$, $D3$ та $D4$ зосереджено більше 80% основної енергії сигналу АЕ. Оскільки під час експериментальних випробувань крок дискретизації сигналів АЕ дорівнював 0,25 мкс, то, за теоремою Котельникова [13], максимальна частота сигналу АЕ становила 2 МГц. Тоді, згідно з концепцією кратномасштабного аналізу, рівням $D2$, $D3$ та $D4$ відповідають частотні діапазони 0,5–1, 0,25–0,5 і 0,125–0,25 МГц відповідно. В той же час максимальна енергія більшості сигналів АЕ зосереджена на рівні $D3$ (0,25–0,5 МГц). Варто зауважити, що цьому діапазону належать і значення частот, для яких вейвлет-коефіцієнти мають максимальні значення у НВП, побудованому раніше. Це свідчить про те, що даний частотний діапазон, а разом із ним і рівень $D3$ вейвлет-розкладу визначають домінуючий механізм руйнування у даному конструкційному матеріалі.

У табл. 1 наведено фрагмент результатів неперервного та дискретного вейвлет-перетворення сигналів АЕ, які аналізували. На основі результатів обчислень встановлено, що якщо для сигналу АЕ енергія на рівні $D3$ перевищує показник 50 і одночасно на рівні $A5$ менша 10, то значення критеріального показника κ більше 0,2, що, згідно з критерієм оцінки типів руйнування, відповідає крихкому руйнуванню. Зазначимо також, що кількість таких сигналів становить 80% від кількості всіх зареєстрованих.

Оцінка макроруйнування конструкційних матеріалів. Опрацьовували сигнали АЕ, отримані в результаті розтягу до руйнування гладкого циліндричного зразка з конструкційної гартованої сталі 45 (циліндр діаметром 4 мм, довжиною робочої частини $l = 36$ мм, загартування, $t = 850$ °С, масло, вода) [12].

За формулою (1) обчислювали критеріальний параметр. Діапазон одержаних значень становив $0,1 \leq \kappa \leq 0,3$, що підтверджує належність даних сигналів АЕ до таких, які характеризують квазікрихке та крихке руйнування.

За аналізом результатів ДВП виявлено дві типові моделі сигналів АЕ для даного матеріалу. Енергія сигналу зосереджена на рівнях $D2$, $D3$ та $D4$, аналогічно до попереднього випадку. До типу I віднесено сигнали АЕ з максимальним значенням співвідношення енергії на рівні $D3$ вейвлет-декомпозиції, а до типу II — на рівні $D2$. Для обох моделей сигналів усереднене найбільше значення співвідношення енергії становить $rE_{2,3}^D \geq 0,40$ (масштаб $D3$ тип I — 0,453; масштаб $D2$ тип II — 0,40). Цей результат можна використати для розпізнавання АЕ-сигналу у досліджуваному матеріалі за допомогою ВП.

Отже, для сигналів АЕ, отриманих у результаті руйнування зразків з гартованої сталі 45, на $D2$ та $D3$ рівнях вейвлет-декомпозиції, зосереджено більше 70% енергії сигналу.

Таблиця 1. Результати НВП та ДВП сигналів АЕ, які супроводжують акти руйнування скляної тротуарної плитки

WT_{\max}	Δf , МГц	κ	E_1^D	E_2^D	E_3^D	E_4^D	E_5^D	E_5^A
0,05	0,125	0,16	4,44	29,04	43,58	11,11	0,89	10,92
0,09	0,1	0,36	0,7	5,82	58,95	14,88	0,19	0,11
0,16	0,1	0,64	1,14	9,44	70,55	13,66	0,44	1,54
0,085	0,2	0,17	3,97	58,09	17,51	6,46	0,18	13,76
0,049	0,125	0,16	3,04	23,04	37,86	13,4	2,58	20,02
0,1	0,1	0,40	4,28	25,78	50,57	14,65	0,57	0,12
0,054	0,25	0,09	9,29	67,57	4,59	1,23	0,22	17,08
0,15	0,09	0,67	1,28	11,4	59,5	23,86	2,56	1,37
0,19	0,1	0,76	3,43	20,08	58,3	13,52	3,83	0,8
0,12	0,15	0,32	2,25	18,51	50,5	26,84	3,68	2,19

Разом із тим, кількість сигналів, віднесених до I типу, становить 95% від загальної кількості, а II типу — 5%. Отже, сигнали АЕ, для яких максимальна енергія зосереджена на рівні D3, відповідають крихкому (квазікрихкому) типу руйнування у даному матеріалі. Аналогічно випадку руйнування тротуарної RGB-плитки, аналіз результатів неперервного та дискретного вейвлет-перетворення сигналів АЕ дозволив встановити, що вони характеризують крихке руйнування, тобто $\kappa \geq 0,2$, якщо $E_3^D \geq 50$ і $E_5^A \leq 10$, і їх кількість становить 60% від усіх зареєстрованих. Це свідчить про перевагу крихкого типу руйнування у даному конструкційному матеріалі, що добре узгоджується з результатами ранжування матеріалів за типом руйнування, згідно з відомим критерієм на основі найстійкіших параметрів сигналів АЕ [12].

Розтяг циліндричних зразків з конструкційної сталі 38ХНЗМФА. Розтягувалися гладкі циліндричні зразки діаметром 4 мм та довжиною 44 мм [12]. Далі в режимі постобробки отриманих результатів будувалися діаграми розтягу та аналізувалися параметри сигналів АЕ.

За результатами досліджень НВП сигналів АЕ з різних ділянок діаграми розтягу (I — ділянка пружної деформації, II — пластичної деформації та текучості матеріалу, III — долому) встановлено два типи сигналів: для першого типу значення критеріального параметра були в межах $0,03 \leq \kappa \leq 0,15$, що відповідає в'язкому типу руйнування, другого типу — $0,2 \leq \kappa \leq 0,5$, що відповідає крихкому руйнуванню. На I ділянці діаграми розтягу більшість сигналів відповідає першому типу, тому можна припустити, що на початку руйнування матеріалу переважають механізми в'язкого руйнування. З появою сигналів АЕ з вищими значеннями амплітуд, які належать до другого типу, гіпотетично можна вважати, що відбувається розвиток мікротріщиноутворення та початок макроруйнування матеріалу (крихке руйнування). Під час подальшого розтягу процес мікротріщиноутворення чергується з процесом розвитку пластичних деформацій, оскільки чергуються сигнали двох встановлених типів. Особливо активно це відбувається з наближенням до межі плинності $\sigma_{0,2}$ матеріалу, де відбуваються інтенсивні дислокаційні процеси, які супроводжуються відповідними низькоамплітудними та широкосмуговими сигналами АЕ. Наведені міркування підтверджуються результатами роботи [12], в якій автори зафіксували фрактографічно утворення внутрішніх мікротріщин у перерізі зразка.

Побудоване ДВП сигналів АЕ дає можливість виділити такі особливості. На відміну від ДВП крихких матеріалів, у випадку сталі 38ХНЗМФА енергія сигналів зосереджена на рівнях D2, D3 та A5 вейвлет-розкладу, що становить до 90% загальної енергії сигналу.

Виявлено, що у більшості сигналів АЕ максимальна енергія зосереджена на рівні D3 декомпозиції. Якщо енергія сигналу на рівнях D3 та A5 задовольняє нерівності $E_3^D \geq 50$ і $E_5^A \leq 10$, то значення критеріального показника κ перевищує 0,2, аналогічно результатам ДВП для двох попередніх матеріалів. Такі сигнали АЕ належать до другого типу, встановленого за НВП, і відповідають крихкому руйнуванню. Разом із тим, у сигналів АЕ із високим значенням розподілу енергії на рівні A5 відповідні значення критеріального параметра лежать у межах $\kappa \leq 0,1$. Це означає, що у таких сигналах АЕ значну частку частотного діапазону займає низькочастотна складова, яка відповідає в'язкому типу руйнування. За результатами НВП їх віднесено до першого типу.

Кількість сигналів АЕ, що відповідають крихкому руйнуванню за НВП та ДВП, становить 30%. Тобто у даному конструкційному матеріалі під час руйнування переважають в'язкі механізми. Разом із тим за допомогою НВП та ДВП ми можемо виділити і сигнали, що відповідають стрибкам макротріщини.

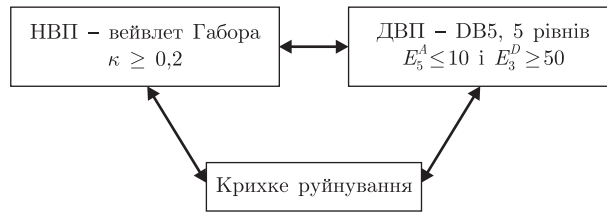


Рис. 2. Схема кореляції НВП та ДВП сигналів АЕ

На підставі узагальнення результатів здійсненого порівняльного аналізу НВП та ДВП різних конструкційних матеріалів побудовано схему їх кореляції, наведену на рис. 2.

Таким чином, вейвлет-перетворення сигналів АЕ дозволяє отримати важливу діагностичну інформацію, за якою можна ідентифікувати механізми макроруйнування у будь-якому часовому інтервалі навантаження. За результатами виконаного порівняльного аналізу НВП та ДВП сигналів АЕ, отриманих під час руйнування зразків із різних конструкційних матеріалів, встановлено кореляцію обох алгоритмів вейвлет-перетворення, що дозволяє ефективно діагностувати механізми руйнування у конструкційних матеріалах у будь-який момент часу.

1. *Läpple V.* Einführung in die Festigkeitslehre. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008. – 420 s.
2. *Клевцов Г. В., Ботвіна Л. Р., Клевцова Н. А., Лимарь Л. В.* Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. – Москва: МИСиС, 2007. – 264 с.
3. *Ковчик С. Е., Морозов Е. М.* Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения // Механика разрушения и прочность материалов. В 4-х т. / Под. общ. ред. В.В. Панасюка. – Т. 3. – Киев: Наук. думка, 1988. – 435 с.
4. *Kline R. A., Hartman W.* Frequency analysis of acoustic emission signals // Proceeding of the 2nd Intern. conf. on mechanical behavior of materials. – 1976. – P. 1631–1635.
5. *Иванов В. И.* Применение метода АЭ для неразрушающего контроля и исследования материалов (обзор основных проблем и задач) // Дефектоскопия. – 1980. – № 5. – С. 65–84.
6. *Lysak M. V.* Acoustic emission during jumps in subcritical growth of crack in three-dimensional bodies // Eng. Fract. Mech. – 1994. – 47, No 6. – P. 873–879.
7. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник. В 3-х т. Т. 2. Методологія акустико-емісійного діагностування. – Київ: Наук. думка, 2009. – 263 с.
8. *Khamedi R., Fallahi A., Refahi Oskouei A.* Effect of martensite phase volume fraction on acoustic emission signals using wavelet packet analysis during tensile loading of dual phase steels // Materials and Design. – 2010. – 31. – P. 2752–2759.
9. *Piotrkowski R., Castro E., Gallego A.* Wavelet power, entropy and bispectrum applied to AE signals for damage identification and evaluation of corroded galvanized steel // Mech. Systems and Signal Processing. – 2009. – 23. – P. 432–445.
10. *Скальський В. Р., Буйло С. И., Станкевич Е. М.* Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 2012. – № 5. – С. 26–34.
11. *Скальський В. Р., Ботвіна Л. Р., Станкевич О. М.* Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 3. – С. 12–17.
12. *Скальський В., Станкевич О., Галан П.* Визначення особливостей макроруйнування матеріалів за вейвлет-аналізом сигналів акустичної емісії // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2011. – Матеріали конф. 21–26 лютого 2011 р. – Львів, 2011. – С. 67–71.
13. *Яковлев А. Н.* Введение в вейвлет-преобразования: уч. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
14. *Скальський В. Р., Клим Б. П., Плахтій Р. М. та ін.* Портативна система SKOP – 8M для вимірювання та аналізу сигналів акустичної емісії // Наука та інновації. – 2010. – 6, № 3. – С. 20–29.

15. *Puttik K. E.* Ductile Fracture in Metals // *Phil. Mag.* – 1959. – 4. – P. 964–969.

Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшло до редакції 02.07.2012

В. Р. Скальський, Е. М. Станкевич

Метод диагностики типов разрушения материалов с применением к их сигналам акустической эмиссии вейвлет-преобразования

Предложен эффективный метод идентификации типов разрушения конструкционных материалов в режиме реального времени. В его основу положен новый критерий, построенный на анализе амплитудно-частотных параметров сигналов акустической эмиссии, сопровождающей разрушение. Показано, что использование непрерывного или дискретного вейвлет-преобразования сигналов позволяет определять типы разрушения на любой стадии его развития при квазистатической нагрузке.

V. R. Skalsky, O. M. Stankevych

A method of fracture-types diagnostics of structural materials using the wavelet transformation of acoustic emission signals

An effective method for the identification of fracture types of structural materials in real time is proposed. It is based on a new criterion constructed on the analysis of spectral characteristics of acoustic emission signals accompanying the fracture. It is shown that the use of the continuous or discrete wavelet transformation of signals allows the identification of fracture types at any stage of fracture development under a quasistatic load.