

УДК 539.3:620.179.17

## ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПІД ЧАС РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, О. М. СТАНКЕВИЧ<sup>1</sup>, І. С. КУЗЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup> Львівський національний університет ім. Івана Франка

Проаналізовано результати застосування вейвлет-перетворення (ВП) для аналізу сигналів акустичної емісії (АЕ) під час руйнування конструкційних матеріалів та технічного діагностування різних промислових об'єктів. Охарактеризовано методику ідентифікування типів руйнування матеріалів (сталей, сплавів, полімерів тощо) за допомогою ВП. Розглянуто можливості ВП сигналів АЕ для встановлення механізмів руйнування в композитах та опрацювання сигналів магнетоакустичної емісії. Наведено приклади випроб, виконаних у Фізико-механічному інституті НАН України, що підтверджують ефективність вейвлет-аналізу сигналів.

**Ключові слова:** акустична емісія, вейвлет-перетворення, локація джерела АЕ; ідентифікування типів руйнування, технічна діагностика

Метод акустичної емісії (АЕ) – один із небагатьох для технічного діагностування (ТД) та неруйнівного контролю (НК), який дає можливість у реальному часі спостерігати за зародженням та розвитком дефектів у матеріалі об'єкта. Під час моніторингу стану дороговартісного або потенційно небезпечного технологічного обладнання важливо оцінювати зміну значень параметрів сигналів АЕ в часі. Для цього використовують вейвлет-перетворення (ВП) сигналів АЕ, яке дає змогу виявляти тонку структуру сигналу [1]. Застосовуючи ВП до нестационарних у часі або неоднорідних у просторі сигналів, вдається отримати не лише їх загальну частотну характеристику (розподіл енергії сигналу за частотними компонентами), але й інформацію про певні локальні координати, де проявляють себе ті або інші групи частотних компонент або відбувається швидка їх зміна.

**Вейвлет-аналіз сигналів АЕ в ТД.** Відома математична модель автоматизованої системи ТД і прогнозування залишкового ресурсу промислового обладнання на основі комплексного використання вейвлет-аналізу та нейромережових технологій [2]. Вейвлет-аналізом вдалося виділити шумовий компонент, який впливає на точність прогнозу, через що зросла можливість раннього виявлення відхилень механічних характеристик виробу від допустимих. За допомогою нейронних мереж можна автоматизувати контроль, а отже, суттєво знизити трудомісткість діагностичних оцінок.

Результати використання ВП сигналів АЕ під час моніторингу стану інструментів та машин подано в оглядових працях [3–5]. Виділили такі напрямки вживання ВП: часово-частотний аналіз сигналів; видалення з них шумових компонент та екстракція слабких сигналів; визначення їх особливостей; сингулярний аналіз стану інструменту чи машини; встановлення характеристик виявлених пошкоджень та дефектів; оцінювання зношеності інструменту; стиснення інформації та ідентифікація систем.

Для аналізу сигналів АЕ під час діагностування технічних систем та обладнання зазвичай використовують дискретне або пакетне ВП. Зокрема, вейвлет-пакетне (ВПП) – для виявлення сигналів АЕ від утворення та поширення тріщин, виникнення подряпин тощо під час моніторингу стану трибологічних систем [6, 7]. Досліджуючи контактну втому залізничної колії [6] за запропонованим методом виділення окремих АЕ-подій, оцінювали та класифікували поширення у ній тріщин. Енергетичний критерій ВПП сигналів АЕ вжито для моніторингу покриття поверхонь трибопар чавун–сталь [7]. Автори праці [8] за критерієм ентропії Шеннона встановили оптимальний материнський вейвлет для ВПП та запропонували методику виявлення дефектів високошвидкісної залізничної колії за частотними компонентами сигналів АЕ.

Важливими структурними елементами багатьох машин є підшипники кочення, стан яких контролюють у чотири етапи: статистичний аналіз, діагностика дефектів та розрахунок їх розмірів, прогнозування залишкового ресурсу. У праці [9] запропонували модифікований та ефективний алгоритм опрацювання сигналів АЕ для діагностування дефектів компонентів підшипників кочення за різних швидкостей виконання операцій, навантаження та розмірів дефектів, який ґрунтується на оптимізації співвідношення Куртосіса та ентропії Шеннона для визначення оптимального вейвлета і застосування ВПП.

Праця [10] присвячена проблемі підвищення функціональної безпеки автомобілів через впровадження нових методів діагностики редуктора. Автори поєднали методи АЕ та віброакустичних вимірювань і виконали дискретне ВП (ДВП) для аналізу даних. Так проідентифікували найчутливіші діагностичні параметри, за якими вдалося краще охарактеризувати стан досліджуваної системи, ніж за класичними підходами.

У праці [11] використали ДВП для аналізу частотного вмісту сигналів АЕ під час моніторингу безцентрового шліфування. Автори встановили вплив на частотні параметри сигналів АЕ шорсткості поверхні та геометричних параметрів зразків і запропонували ефективну методику прогнозування якості поверхні виробів, оцінювання похибок шліфування.

Автори праці [12] опрацювали новий підхід до класифікації сигналів АЕ, які виникають під час моніторингу корозії. Один із важливих його кроків – видалення шумових компонент сигналу за допомогою ВП, щоб виокремити його корисну частину. За результатами подальшого аналізу сигналів АЕ за допомогою Random Forest алгоритму запропонували надійні та продуктивні критерії виявлення корозії.

**ВП у задачах локації джерел АЕ та ідентифікування дефектів конструкційних матеріалів.** У літературі детально описано використання ВП для локації джерел АЕ [13–24] та ідентифікування дефектів конструкційних матеріалів [25–38].

Для неперервного вейвлет-перетворення (НВП) сигналів АЕ як материнські найчастіше застосовують вейвлети на основі функції Гаусса, наприклад, вейвлет Габора. За таким підходом автори праці [17] поліпшили фільтрацію сигналу від шумів, візуалізували та розділили акустичні моди, визначили відстань до джерела АЕ за однією осцилограмою та уточнили час надходження сигналу. У праці [18] побудували методику локації джерел АЕ з одним перетворювачем у тонких пластинах. За максимальними коефіцієнтами ВП Габора встановили час появи характерних мод. НВП з вейвлетом Габора застосували у праці [30] для ідентифікування та оцінки дефектів у кородівній сталі, що дало можливість визначити діапазони частот, які відповідають певним типам пошкод. Такою ж методикою скористались у праці [33]. Для ефективнішої ідентифікації різних механізмів руйнування покриття (поперечне розтріскування, руйнування зв'язку покриття–матриця) запропонували використовувати частоту, якій відповідає вейвлет-коефіцієнт з максимальною амплітудою. Для локалізації пошкод залізобетонних конструкцій

автори праці [24] застосували новий енергетичний параметр на основі НВП з вейвлетом Габора.

Відомі також дослідження, де використовували інші вейвлет-функції. Зокрема, у праці [31] проаналізували ефективність НВП на основі трьох вейвлетів (“гаусса 27”, “гаусса 1”, “добеші 40”) та виклали метод для виявлення та точної ідентифікації у часі АЕ-події, а також визначення джерела сигналів від витoku за відповідними енергетичними діапазонами за вейвлетом “гаусса 27”. Метод для ідентифікування тріщини у плитах на основі вейвлет-аналізу подали у праці [16]. Для локації та визначення глибини розташування тріщини до сигналів АЕ застосували НВП, заздалегідь вибравши серед інших (“койфлет 2”, “ортогональний 6.8”, “симетричний 4”) найефективніший тут материнський вейвлет – “симетричний 4”. Для виявлення дефекту у вітротурбінній коробці запропонували [21] спосіб уточнити час надходження сигналів АЕ на основі ВП з вейвлетом Морле. За зміною енергії НВП з вейвлетом Хаара встановили [34] послідовність мікромеханізмів руйнування в гальванізованій сталі.

Часто для виявлення джерел АЕ здійснюють ДВП зареєстрованих сигналів. У праці [35], щоб ідентифікувати момент виникнення тертя у роторі, спочатку виконали ДВП сигналів АЕ з вейвлетом “добеші 20” (вісім рівнів розкладу), видаливши з них шумові компоненти, а потім методом крос-кореляції визначили місце тертя. Для ідентифікування втомної тріщини на початку її росту автори праці [19] застосували до сигналів АЕ ДВП з біортогональним вейвлетом (п’ять рівнів розкладу). Вивчали [32] метод АЕ для контролю термічного зварювання. На основі ДВП з вейвлетом “добеші 6” (шість рівнів розкладу) встановили, що за зміною енергії рівнів розкладу сигналів АЕ, отриманих під час проходження зварювального інструменту над дефектною ділянкою, можна відтворити розташування та розмір зварних дефектів.

Для детального аналізу частотного спектра сигналів АЕ ефективніше ВПП. Зокрема, у праці [13] для дослідження поширення сигналів АЕ через елементи турбін застосували ВПП із материнським вейвлетом “добеші 5” та чотири рівні розкладу – шістнадцять вейвлет-пакетів. Автори праці [23] використали ВПП для локалізації дефектів зварювання. Опрацювали [27] методику ідентифікування мікромеханізмів руйнування у двофазній сталі. На основі аналізу частотного діапазону кожного рівня розкладу ВПП сигналу АЕ з вейвлетом “добеші” (три рівні розкладу – вісім вейвлет-пакетів) та енергетичним розподілом ідентифікували такі типи пошкод, як розрив ферито-мартенситного зв’язку та руйнування мартенситної фази. Новий метод моніторингу стану підшипників обертових машин з допомогою ВПП на основі вейвлета “добеші 10” описано у праці [36]. У праці [37], використовуючи АЕ, ідентифікували шліфувальний опік матеріалу. Досліджували властивості АЕ теплового розширення, моделюючи термічний наслідок шліфування лазерним опроміненням. За ВПП встановили, що розподіл енергії сигналів АЕ за високої температури концентрується в смугах високих частот. За невисоких – на ділянках низьких частот, що підтверджують експерименти. За шліфувального опіку високочастотні характеристики сигналу АЕ виражені набагато сильніше, ніж без нього.

У праці [38] подано метод двовимірного ВП для ідентифікування тріщин у пластинах. Кількісно глибину тріщини оцінювали за максимальними значеннями та енергетичним вмістом вейвлет-коефіцієнтів ВП з материнською функцією “симлет 6”.

Зародження тріщини під час розтягу та втомного руйнування алюмінієвого сплаву досліджували у праці [39]. Для визначення характерних ознак сигналів АЕ, що генеруються під час зародження та подальшого росту тріщини, аналізува-

ли діаграми руйнування, амплітуди та частотний вміст сигналів АЕ за їх НВП та порівнювали з результатами числового моделювання (рис. 1).

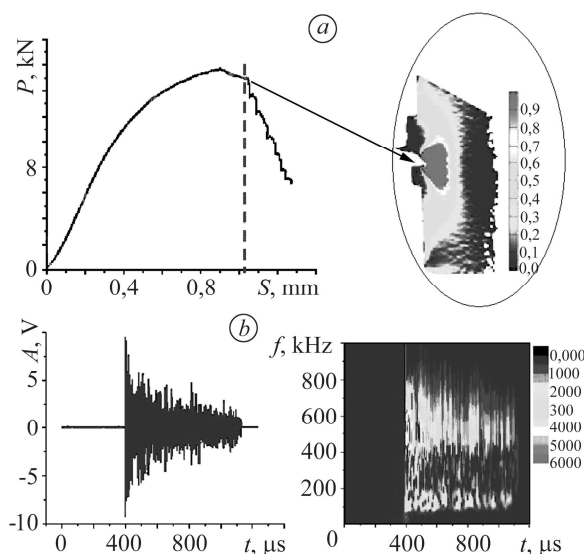


Рис. 1. Крива навантаження–переміщення та фрагмент числового моделювання старту тріщини (а), а також сигнал АЕ, що супроводжує зародження тріщини, та його НВП (б) [39].

Fig. 1. Curve of loading–displacement and a piece of numerical modeling of crack start (a) and also AE signal for the crack initiation and its continuous wavelet transform (CWT) (b) [39].

#### Ідентифікування механізмів руйнування композитів за ВП сигналів АЕ.

ВП сигналів АЕ забезпечує часову локалізацію їх особливостей, а отже, сприяє ефективному ідентифікуванню основних механізмів руйнування композитів: розтріскування матриці, порушення адгезії, відшарування волокон від матриці, розвиток тріщин у волокнах, їх витягування тощо.

Зокрема, класичний АЕ-метод та ВП сигналів АЕ для вивчення особливостей руйнування модельних композитів застосували у праці [40]. За швидким перетворенням Фур'є (ШПФ) виявили, що під час руйнування матриці генеруються сигнали АЕ з домінуючим діапазоном частот  $< 100$  kHz, за відшарування волокна – з  $200 \dots 300$  kHz, а під час його руйнування – з  $400 \dots 450$  kHz. Щоб з'ясувати послідовність механізмів руйнування композитів та їх тривалість, використали НВП на основі вейвлета Габора та проаналізували мікрофрактограми зразків. Встановили, що руйнування спричинило порушення цілісності волокна у центрі поперечного перерізу, внаслідок чого тріщини швидко поширювались уздовж радіальних ліній у волокні і в матриці, зумовивши повне руйнування композиту. За ВП тривалість випромінювання сигналу АЕ (максимальна частота  $20$  kHz), який відповідає розтріскуванню матриці,  $35$   $\mu\text{s}$ , а за розриву волокна (максимальна частота  $450$  kHz) –  $20$   $\mu\text{s}$ .

Результати дослідження симетричного та асиметричного розтріскування матриці у середніх та поверхневих шарах скловолоконних композитів наведені у праці [41]. Класифікували сигнали АЕ, які генеруються під час розтріскування матриці в багат шарових композитах, за узагальненими результатами числового моделювання сигналів, ДВП (вейвлет “добеші 5”) змодельованих та отриманих експериментально сигналів та одержаними методом найменших квадратів.

Методику використання вейвлет-аналізу сигналів АЕ для вивчення особливостей руйнування композитних матеріалів, зміцнених вуглецевими волокнами, розкрили у працях [42, 43]. Для оцінки отриманих під час руйнування композитів сигналів АЕ застосували ДВП на одинадцять рівнів розкладу та вейвлет “добеші 20”. Встановили, що дев'ятий рівень характеризує енергію, яка випромінюється внаслідок руйнування волокна, із центром частотного спектра приблизно  $300$  kHz, а восьмий рівень – енергію під час руйнування зв'язку волокно–матриця із центром частотного спектра приблизно  $250$  kHz. Виявили також інші джерела

сигналів з вищою або нижчою частотами та низькою енергією, серед яких домінує сьомий рівень (із частотним центром приблизно 110 kHz), який характеризує енергію від розтріскування матриці.

Модель визначення групової швидкості як функції частоти поперечної моди нормальної хвилі, що поширюється в графіто-епоксидних композитах, на основі аналізу за вейвлетом Габора та приклади її застосування для ефективної локації джерел випромінювання АЕ-сигналів описано у працях [44, 45]. Використовуючи частотну залежність часу приходу сигналу та кутову групової швидкості, можна значно точніше встановити розташування джерела АЕ для однонаправлених та квазіізотропних великих плоских композитних пластин.

У праці [46] досліджували складніший випадок, коли присутні кілька типів хвиль, які поширюються у шарі композитного матеріалу. Автори запропонували загальну методику автоматичної селекції хвиль у композитах різної будови за ВПП сигналів АЕ. Виявили, що так можна ідентифікувати важливі типи хвиль та встановити час їх надходження на первинний перетворювач, а отже, підвищити точність локації джерел їх випромінювання.

Новий алгоритм локації джерел АЕ та визначення групової швидкості в композитних структурах запропоновано у праці [47]. В його основі – різниця часу надходження поперечної хвилі Лемба, яку фіксували шістьма первинними перетворювачами. До сигналів АЕ застосували НВП з комплексним вейвлетом Морле. Згідно з цією концепцією, за квадратом амплітуди максимального вейвлет-коефіцієнта можна ідентифікувати час прибуття хвильового пакету та значення частоти, яка йому відповідає. Для перевірки алгоритму досліджували дві різні композитні структури: квазіізотропний вуглепластик та сендвіч-панель. Виявили місце розташування джерела АЕ та групову швидкість. Максимальна похибка локації складала приблизно 2% для квазіізотропної панелі з вуглепластика і майже 1% – для плити.

Рис. 2. Різні механізми руйнування склополіестерного диска після випробувань на зношування: *A* – розшарування між волокном та матрицею; *B* – обрив та зміщення волокна; *C* – зміщення матриці та волокна; *D* – розрив волокна [48].

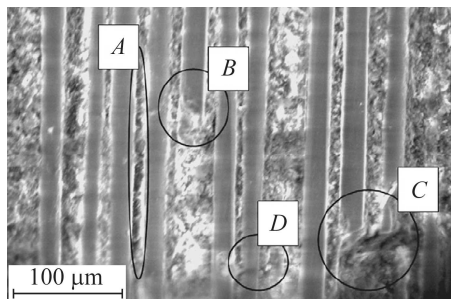


Fig. 2. Various damage mechanisms of a glass-polyester disc after wear testing: *A* – fiber matrix debonding; *B* – fiber breaking and displacement due to shear forces; *C* – fiber and matrix displacement; *D* – fiber breaking [48].

Використання методу АЕ для контролю стану композиту під дією абразивного зношування присвячена праця [48]. Серед механізмів такого зношування волоконних композитних матеріалів розрізняють: порушення зв'язку волокно–матриця; розрив волокна і зміщення його частин зсувними зусиллями; видалення частинок матриці (рис. 2). Для ідентифікування сигналів від різних механізмів зношування автори застосували метод розпізнавання образів. Щоб розділити сигнали, пов'язані з конкретною подією за неперервної АЕ, вжили апарат НВП, вбудований у програмне забезпечення PACShare Wavelets (PAC). Згідно з аналізом частотних особливостей, низькочастотні та довготривалі сигнали відповідають відшаруванню волокна від матриці, високочастотні – його розриву, а розтріскуванню матриці – сигнали АЕ середнього частотного діапазону (рис. 3). За допо-

могою нейронної мережі ідентифікували сигнали від руйнування волокна, відшарування його від матриці та гібридні, які поєднували два попередні види.

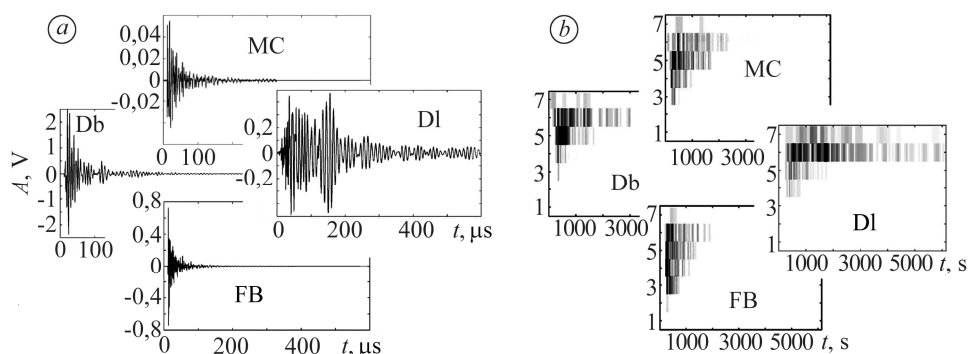


Рис. 3. Типові АЕ сигнали від різних механізмів руйнування (а) та їх ВП (b) під час розтягу: MC – розтріскування матриці; Db – порушення зв’язку матриця–волокно; DI – відшарування; FB – розрив волокна [48].

Fig. 3. Typical AE signals originating from different damage mechanisms (a) and its wavelet decomposition (b) during tensile testing: MC – matrix cracking; Db – matrix–fiber debonding; DI – delamination; FB – fiber breaking [48].

Метод пасивної діагностики для визначення частотних характеристик сигналів АЕ в графіто-епоксидних композитах описали у праці [49]. За допомогою ДВП (вейвлет “добеші 4”, три рівні розкладу) встановили, що розтріскуванню матриці відповідає частотний діапазон 300...400 kHz, а відшаруванню – нижче 250 kHz. Також виявили, що наприкінці руйнування таких композитів тривалість АЕ-подій скорочується, а амплітуди сигналів утричі вищі, ніж під час відшарування.

У праці [50] подано результати використання багатofакторного аналізу та ВП для ідентифікування типів руйнування скловолоконних композитних матеріалів різної структури: багатошарових та з перехресним укладанням. За НВП та ДВП сигналів АЕ з вейвлетом “добеші 10” (п’ять рівнів розкладу) автори вивели нові критеріальні параметри, за якими вдається ефективніше ідентифікувати механізми руйнування, ніж методом кластеризації сигналів АЕ.

Комплексну методологію постопрацювання сигналів АЕ, отриманих під час тестування композитів, побудували у праці [51]. Для цього використали ШПФ для визначення домінуючих частотних діапазонів та ВП (вейвлет “добеші 20”, шість рівнів розкладу) для ідентифікування механізмів руйнування. Встановили, що близько 50% енергії сигналів АЕ зосереджено на рівні розкладу з частотним діапазоном 300...400 kHz. Отже, він може відповідати найпоширенішому механізму руйнування композиту – розриву волокна.

ВПП використали для оцінки стану свердлильного інструменту та вивчення особливостей руйнування склофенольних полімерних композитів під час свердління [52]. Аналіз амплітудно-частотних характеристик сигналів АЕ виявив, що зі збільшенням кількості просвердлених отворів змінюються частота та амплітуда сигналів, що може свідчити про погіршення стану інструменту. За результатами досліджень запропонували критерій його оцінювання, де критеріальний параметр розраховували за вейвлет-коефіцієнтами ВПП (чотири рівні розкладу).

У праці [53] запропонували оцінювати масові частки речовини в композитах із мікрокристалічним графітом методом АЕ та ВПП. Досліджували характеристики загасання сигналів АЕ у композитах із різними масовими частками графіту. За ВПП встановили залежності між коефіцієнтами загасання енергії, амплітудами

пакетів вейвлет-функцій та масовими частками. Виявили, що за більшого вмісту графіту інтенсивність загасання енергії та амплітуди пакетів вейвлет-функцій більші. Параметри загасання у частотному діапазоні 125...171,85 kHz найчутливіші для оцінювання масових часток, похибка складає 1,8 проти 3,9% за вихідним сигналом.

Графіто- та скловолоконні композити вивчали у праці [54]. Для визначення навантаження згином використали різні методи опрацювання сигналів АЕ: ВП, ШПФ та перетворення Чой–Вільямса. Встановили, що за їх навантаження три-точковим згином для опрацювання сигналів АЕ найкраще ВП.

Руйнування полімерних композитів із вуглецевими волокнами досліджували у праці [55]. За новим методом розпізнавання образів на основі коефіцієнтів НВП встановили кореляцію між ідентифікованими образами та механізмами руйнування таких композитів, що дало можливість класифікувати дефекти в них. Автори праці [56] для видалення шумових компонент зі сигналів АЕ запропонували ДВП.

У праці [57] побудували алгоритм ідентифікування пошкодження в композитних стінках ємностей високого тиску, який ґрунтується на аналізі НВП сигналів АЕ. У результаті виділили типи хвиль (симетричну та асиметричну хвилі Лемба) та визначили їх частотні смуги.

Особливості розшарування багатошарових волоконних композитів під дією зусиль відриву досліджували в праці [58]. Для аналізу та кластеризації сигналів АЕ використали метод розпізнавання образів. Далі на основі скінченно-елементного моделювання встановили відповідність отриманих трьох типів сигналів АЕ механізмів руйнування волоконних композитів: розтріскуванню матриці, руйнуванню зв'язку між волокном та матрицею, руйнуванню волокна. Результат підтвердили також за НВП експериментальних та змодельованих сигналів АЕ.

**Вейвлет-аналіз в опрацюванні сигналів магнетоакустичної емісії (МАЕ).** Зазначимо, що сигнали МАЕ, як і пружні хвилі АЕ, описують, використовуючи теорію випадкових процесів. Вони вирізняються змінним у часі частотним спектром. Тому для аналізу їх частотних особливостей ефективно ВП. Такі дослідження нечисленні, про що свідчить небагато публікацій. Зокрема, у праці [59] подано методику визначення внутрішніх механічних напружень за допомогою ВП сигналів МАЕ. Виявили, що вейвлет-коефіцієнти в частотно-часовій площині описують характерні особливості сигналів, а за їх зміною можна оцінити напружений стан конструкційних елементів.

Залежність шуму Баркгаузена та сигналів МАЕ від пластичної деформації у плитках армо-заліза досліджували в праці [60]. Для виявлення змін властивостей сигналів шуму виконали багатопараметричний аналіз (ШПФ, амплітудний розподіл імпульсів, ВП). Встановили вплив пластичної деформації на інтенсивність генерування сигналів МАЕ і на їх амплітуди.

У праці [61] вивчали особливості МАЕ в стрічці з металічного скла 2605SS, перемагнечуючи зразки у двох перпендикулярних напрямках. За допомогою НВП з вейвлетом Габора виявили відмінності у частотному складі сигналів МАЕ залежно від напрямку перемагнечення відносно поздовжньої осі стрічки: за паралельного амплітуди сигналів МАЕ вищі, концентрованіші в часі та зі складнішою частотною структурою, ніж за перпендикулярного (рис. 4). Це можна пояснити різницею в об'ємах перемагнечення. Автори виділили два типи сигналів МАЕ, за якими можна визначити однорідність структури матеріалу.

У праці [62], застосувавши вейвлет-аналіз, встановили середню тривалість шумів (приблизно  $10^{-4}$  s) в аморфному сплаві  $Fe_{78}B_{12}Si_9Ni_9$ . Запропонували [63] новий підхід до опрацювання шумів Баркгаузена за допомогою фрактального

аналізу на основі ВП, за яким виявили тріщини у металевих феромагнетних структурах на ранніх стадіях зародження.

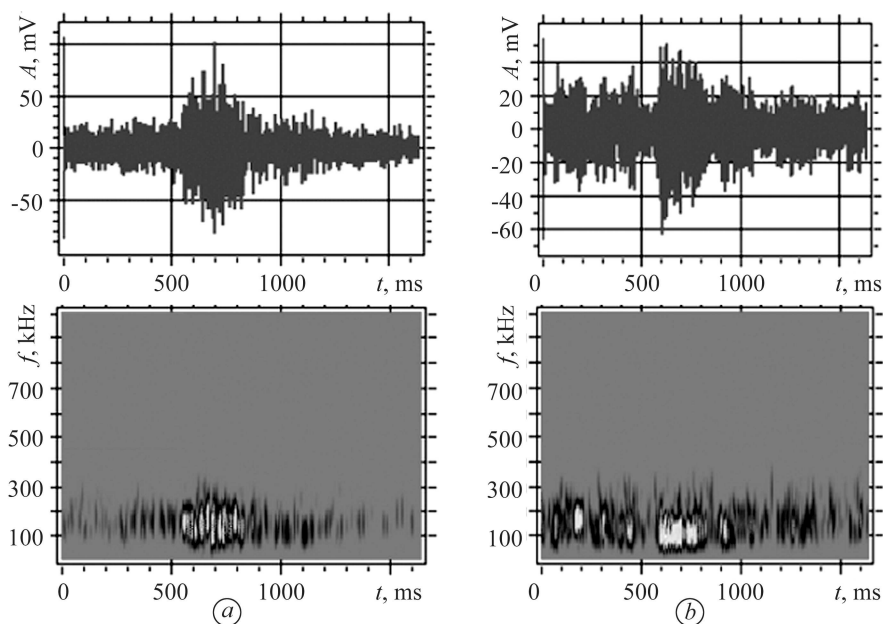


Рис. 4. Типові сигнали МАЕ та їх ВП під час перемагнення паралельно (а) та перпендикулярно (б) до поздовжнього напрямку осі стрічки [61].

Fig. 4. Typical MAE signals with its wavelet spectrograms during magnetizing parallel (a) and perpendicular (b) to the longitudinal direction of the strip axis [61].

Діагностуванню товстостінних об'єктів за інтенсивністю МАЕ присвячена праця [64]. Встановили, що за ШПФ та вейвлет-аналізом можна виокремити корисний сигнал МАЕ, інтенсивність якого під час діагностування в промислових умовах може бути нижча, ніж фонових шумів. Такий метод фільтрації забезпечує вимірювання лише корисних даних, що значно спрощує їх аналіз та підвищує достовірність висновків.

У праці [65] досліджували вплив водню на параметри сигналів МАЕ, використовуючи НВП (вейвлет Габора) та ДВП (вейвлет "симлет 8", три рівні розкладу). Встановили, що зі зростанням напруженості магнетного поля максимальні значення вейвлет-коефіцієнтів НВП сигналів МАЕ в нікелі зростають як для матеріалу в стані постачання, так і після наводнювання. Водночас за присутності водню у нікелі їх максимальні значення нижчі на 15...30%, ніж у ненаводненому матеріалі. За частотними параметрами НВП та розподілом енергії сигналів МАЕ для ДВП можна відтворити фізичні процеси, спричинені у феромагнетику змінною напруженості магнетного поля, і використати їх як критерії для оцінки впливу водню на конструкційні матеріали.

**Застосування к-критерію для оцінювання типів руйнування конструкційних матеріалів.** Вивчаючи АЕ під час руйнування конструкційних матеріалів, важливо вміти розмежувати походження сигналів АЕ та виявляти їх відповідність тим чи іншим типам руйнування. Відомі методики ідентифікування сигналів АЕ ефективні за наявності лише двох механізмів генерування АЕ: пластичної деформації та росту макротріщини. Водночас у конструкційних матеріалах під час руйнування джерелами АЕ у малому інтервалі часу можуть бути різні процеси: формування пластичних деформацій, мікротріщиноутворення, розтріскування включень, макроруйнування тощо. Більшість відомих критеріїв ідентифікування



типів руйнування ґрунтуються на характеристиках частотного спектра сигналу, який отримують за допомогою перетворення Фур'є [66]. Зважаючи на високу ефективність ВП в сучасному опрацюванні сигналів АЕ, побудували [67–69] новий критерій кількісного оцінювання типів руйнування.

На основі теоретичних [70, 71] та експериментальних [67–69, 72–79] досліджень сформулювали та верифікували критерій ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів (сталей, сплавів, композитів, полімерів) за амплітудно-частотними характеристиками локальних особливостей НВП сигналів АЕ. Для цього використали критеріальний параметр  $\kappa$ :

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

де  $WT_{\max}$  – максимальний вейвлет-коефіцієнт локальної події в сигналі АЕ;  $\Delta f_{\max}$  – ширина частотної смуги в проекції НВП на площину “ $WT-f$ ” для центральної частоти  $f_{\max}$ , яку встановлюють за значенням  $0,7WT_{\max}$ ;  $\Delta f_0$  – ширина робочої смуги вимірювального АЕ-тракту, що залежить від робочої смуги частот первинного перетворювача АЕ (у нашому випадку 200...600 kHz).

Отже, кількісно визначити типи макроруйнування конструкційних матеріалів за параметром  $\kappa$  можна так: якщо  $\kappa < 0,1$ , сигнал АЕ характеризує в'язкий тип руйнування матеріалу (пластична деформація); якщо  $0,1 \leq \kappa < 0,2$  – відповідає зародженню та поширенню мікротріщин (мікротріщиноутворення); коли  $\kappa \geq 0,2$  – сигнал АЕ супроводжує крихке руйнування (утворення та ріст у конструкційному матеріалі макротріщин). З його зростанням небезпека руйнування в об'єкті контролю посилюється.

Для оцінювання типів руйнування матеріалів запропонували низку методик на основі НВП та ДВП сигналів АЕ [65, 67–69, 72–80].

**Енергетичний критерій ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів.** Оскільки побудований  $\kappa$ -критерій, як засвідчила практика, має вузький діапазон переходу від в'язкого до крихкого руйнування, то запропоновано оцінити сигнали АЕ за енергією локальних максимумів їх НВП, які характеризують кожний елементарний акт руйнування. Відомо, що на формування сигналу АЕ впливають енергія, що виділяється під час деформації чи руйнування, і деформація. Значення, швидкість та механізми деформації пов'язані з частотою та енергією пружної акустичної хвилі, яка виникає під час руйнування. Тому для оцінки сигналів АЕ, щоб ідентифікувати певний тип руйнування, важливо враховувати не тільки їх частотні особливості, а й енергетичні характеристики. У праці [81] подано методику побудови енергетичного критерію ідентифікування типів руйнування матеріалів за локальними особливостями НВП сигналів АЕ. Як критеріальний параметр використано енергію локального імпульсу НВП сигналу АЕ:

$$E_{WT} = \int_{t_1}^{t_2} |WT_a(t)|^2 dt, \quad (2)$$

де  $WT_a(t) = A + B \cdot e^{-0,5\left(\frac{t-C}{D}\right)^2}$  – функція апроксимації локального імпульсу.

Наведемо кілька прикладів застосування енергетичного критерію для ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів під квазістатичним навантаженням.

*Особливості руйнування сталі 38ХНЗМФА* [73, 81]. Випробовували розтягом циліндричні зразки з конструкційної сталі 38ХНЗМФА, загартованої за тем-

ператури відпуску 893 К. За результатами обчислень побудували двопараметричний розподіл сигналів АЕ для різних ділянок діаграми розтягу. Встановили, що на ранніх стадіях руйнування активність утворення мікротріщин несуттєва порівняно з дислокаційними механізмами та посилюється на етапі навантаження, який відповідає початку пластичної деформації. Далі спостерігали ріст АЕ-активності. Сигнали АЕ, які відповідають різним типам руйнування за енергетичним критерієм їх ідентифікування, свідчать про інтенсивний розвиток мікро- та макротріщиноутворення. Останній стадії навантаження властиві зменшення деформованого об'єму і локалізація зони деформації (формується шийка), що супроводжується підросанням і злиттям утворених раніше мікротріщин і руйнуванням зразка. Значення енергетичного параметра  $E_{WT}$  для різних типів руйнування сталі такі:  $0,0001 \leq E_{WT} < 0,0009$  – в'язке;  $0,01 \leq E_{WT} < 0,098$  – в'язко-крихке та  $0,147 \leq E_{WT} < 0,185$  – крихке. Обчислюючи частку енергії різних типів руйнування, виявили, що найбільший її відсоток (68,3%) під час розтягу сталевих зразків виділяється за в'язкого та в'язко-крихкого механізму руйнування, тобто під час пластичних деформацій та мікротріщиноутворення.

*Ідентифікування типів руйнування стоматологічних полімерів* [76–78, 82]. Досліджували полімерні зразки з провізорних матеріалів Protemp™ 4 (3M ESPE, США), Structur 2SC (VOCO, Німеччина), Tempron 1-1PKG (GC, Японія), Acrodent (АО СТОМА, Україна) під час квазістатичного розтягу. Виявили чергування сигналів АЕ, які відповідають різним типам руйнування, що можна тлумачити як розвиток мікро- та макророзтріскування з утворенням пластичних зон перед тріщиною. Енергетичний критерій дав можливість виокремити для всіх матеріалів події АЕ, що відповідають пластичній деформації [82], чого не вдалось зробити за допомогою к-критерію [76–78]. Це ще раз підтверджує ефективність енергетичного підходу для ідентифікування типів, а отже, і механізмів руйнування в матеріалах.

*Оцінювання стадій руйнування композитних матеріалів за енергетичним критерієм.* Вивчали руйнування скловолоконного композита ручного формування під час квазістатичного розтягу [75]. Використовуючи часово-частотний аналіз, встановили взаємозв'язок між параметрами НВП і ДВП сигналів АЕ та механізмами руйнування скловолоконного композита. Серед них: відшарування склотканини від матриці, руйнування волокна, розтріскування матриці, витягування волокон або зсувні механізми в матриці. Характерні ознаки сигналів АЕ, джерелами яких є відшарування склотканини в композиті, такі: значна тривалість випромінювання (до 20  $\mu$ s), вузька смуга частот у проекції  $WT-f$  у момент досягнення  $WT_{max}$  (65...75 kHz), діапазон значень енергетичного параметра  $0,021 \leq E_{WT} < 0,265$ , максимальна енергія зосереджена у частотному діапазоні 125...500 kHz. Особливістю сигналів АЕ, що гіпотетично супроводжують витягування волокон або зсувні механізми в матриці, є коротка тривалість (до 10  $\mu$ s), широка смуга частот у проекції  $WT-f$  у момент часу досягнення у них значення  $WT_{max}$  (230...270 kHz) та діапазон критеріального параметра  $0,005 \leq E_{WT} < 0,1$ . Для сигналів АЕ, які генеруються внаслідок руйнування скловолокна, переважає частотний діапазон 400...500 kHz, тривалість випромінювання більше 20  $\mu$ s, а енергетичний параметр  $E_{WT} \geq 0,389$ .

На рис. 5 подано характерні розподіли енергій для деяких конструкційних матеріалів за типами їх руйнування [81].

За результатами експериментальних обчислень встановили узагальнений енергетичний критерій ідентифікування типів руйнування: за  $E_{WT} < 0,01$  – в'язке

(пластична деформація); якщо  $0,01 \leq E_{WT} < 0,1$  – в’язко-крихке (мікротріщиноутворення); якщо  $E_{WT} \geq 0,1$  – крихке (ріст макротріщини). Критерій забезпечує якісніше ідентифікування типів руйнування проти відомих методик.

Рис. 5. Розподіл енергії типів руйнування для різних конструкційних матеріалів [81]: I – корунд; II – натрієве скло; III – сталь 45 (гарт.); IV – сталь 45 (стан пост.); V – сталь 38ХНЗМФА; 1 – пластична деформація (в’язке руйнування); 2 – мікротріщиноутворення (в’язко-крихке руйнування); 3 – ріст макротріщини (крихке руйнування).

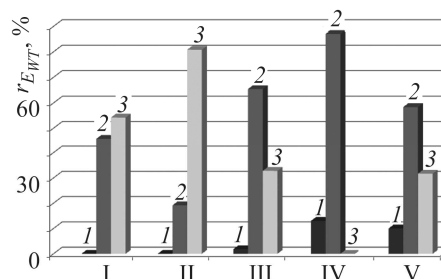


Fig. 5. The ratio of energy of the representative fracture types for different structural materials [81]: I – corundum; II – sodium glass; III – steel 45 (quenched); IV – steel 45 (as-received); V – 38ХНЗМФА steel; 1 – plastic deformation (ductile fracture); 2 – microcracking (ductile-brittle fracture); 3 – macrocracking (brittle fracture).

## ВИСНОВКИ

Таким чином, ВП виявилось ефективним для аналізу сигналів АЕ під час діагностування технічних об’єктів та ідентифікування типів та механізмів руйнування різних за структурою конструкційних матеріалів. Тому методики, побудовані на ВП сигналів АЕ, сприяють ефективному неруйнівному контролю та запобіганню передчасного руйнування конструкцій та їх елементів.

**РЕЗЮМЕ.** Проанализированы результаты применения вейвлет-преобразования для анализа сигналов акустической эмиссии при разрушении конструкционных материалов и технической диагностике различных промышленных объектов. Охарактеризованы методики идентификации типов разрушения материалов (сталей, сплавов, полимеров и др.) с помощью вейвлет-преобразования. Рассмотрены возможности вейвлет-преобразования сигналов акустической эмиссии для определения механизмов разрушения в композитах и обработки сигналов магнитоакустической эмиссии. Приведены примеры исследований, выполненных в Физико-механическом институте НАН Украины, подтверждающие эффективность вейвлет-анализа сигналов.

**SUMMARY.** The results of wavelet transform application for acoustic emission signals under structural materials fracture and technical diagnostics of different industrial objects have been analyzed. The methods of identification of fracture types of materials (steels, alloys, polymers etc.) using the wavelet transform have been characterized. The opportunities of the wavelet transform of acoustic emission signals for determination of fracture mechanisms of composites and processing of magnetoacoustic signals have been described. The considered examples of researches of scientists of Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine confirm the effectiveness of spectral analysis of signals.

1. Астафьев Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. – 1996. – **11**. – С. 1145–1170.
2. Бабичева И. Ф., Шарко А. В. Теоретические разработки по использованию вейвлет-анализа и нейросетевых технологий в системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 2005. – № 2. – С. 17–21.
3. Kumpeng Z., SanW. Y., and Soon H. G. Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results // Int. J. of Machine Tools & Manufacture. – 2009. – **49**. – P. 537–553.
4. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning // Int. J. of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – **42**. – P. 157–165.

5. Peng Z. K. and Chu F. L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2004. – **18**. – P. 199–221.
6. Wavelet packet transform for detection of single events in acoustic emission signals / D. Bianchi, E. Mayrhofer, M. Gröschl, G. Betz, A. Vemes // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2015. – **64/65**. – P. 441–451.
7. Saedi F., Shevchik S. A., and Wasmer K. Automatic detection of scuffing using acoustic emission // *Tribology Int.* – 2016. – **94**. – P. 112–117.
8. Acoustic emission detection of rail defect based wavelet transform and Shannon entropy / X. Zhang, N. Feng, Y. Wang, Y. Shen // *J. of Sound and Vibration.* – 2015. – **339**. – P. 419–432.
9. Hemmati F., Orfali W., and Gadala M. S. Roller bearing acoustic signature extraction by wavelet packet transform, applications in fault detection and size estimation // *Appl. Acoustic.* – 2016. – **104**. – P. 101–118.
10. Skrickij V., Bogdevičius M., and Junevičius R. Diagnostic features for the condition monitoring of hypoid gear utilizing the wavelet transform // *Appl. Acoustic.* – 2016. – **106**. – P. 51–62.
11. Monitoring of through-feed centreless grinding processes with acoustic emission signals / E. A. Dias, F. B. Pereira, S. L. M. R. Filho, L.C. Brandão // *Measurement.* – 2016. – **94**. – P. 71–79.
12. Classification of acoustic emission signals using wavelets and Random Forests: application to localized corrosion / N. Morizet, N. Godin, T. E. Mailet, M. Fregonese, B. Normand // *Mech. System and Signal Proc.* – 2016. – **70/71**. – P. 1026–1037.
13. Wavelet packet analysis for the propagation of acoustic emission signals across turbine runners / X. H. Wang, C. M. Zhu, H. L. Mao, Z. F. Huang // *NDT&E Int.* – 2009. – **42**. – P. 42–46.
14. Использование вейвлет-фильтрации при локализации сигналов акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, И. С. Рамазанов, С. И. Кабанов, А. Е. Кареев // *Контроль. Диагностика.* – 2007. – № 9. – С. 27–31.
15. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика.* – 2008. – № 1. – С. 15–19.
16. Douka E., Loutridis S., and Trochidis A. Crack identification in plates using wavelet analysis // *J. of Sound and Vibration.* – 2004. – **270**. – P. 279–295.
17. Терентьев Д. А., Елизаров С. В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах // *Контроль. Диагностика.* – 2008. – № 7. – С. 51–54.
18. Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor / J. Jiao, C. He, B. Wu, R. Fei, X. Wang // *Int. J. of Pressure Vessels and Piping.* – 2004. – **81**. – P. 427–431.
19. Gaul L. and Hurlebaus S. Identification of the impact location on a plate using wavelets // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 1998. – **12**, № 6. – P. 783–795.
20. Hamstad M. A., O’Gallagher A., and Gary J. A wavelet transform applied to acoustic emission signals: Part 2: Source location // *J. of Acoustic Emission.* – 2002. – **20**. – P. 62–82.
21. Zhang Y., Lu W., and Chu F. Planet gear fault localization for wind turbine gearbox using acoustic emission signals // *Renewable Energy.* – 2017. – **109**. – P. 449–460.
22. Pomponi E., Vingradov A., and Danyuk A. Wavelet based approach to signal activity detection and phase picking: Application to acoustic emission // *Signal Proc.* – 2015. – **115**. – P. 110–119.
23. Solder joint failure localization of welded joint based on acoustic emission beamforming / X. Liu, D. Xioa, Y. Shan, Q. Pan, T. He, Y. Gao // *Ultrasonic.* – 2017. – **74**. – P. 221–232.
24. Acoustic emission energy b-value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings / F. Sagasta, M. E. Zitto, R. Piotrowski, A. Benavent-Clement, E. Suarez, A. Gallego // *Mech. System and Signal Proc.* – 2018. – **102**. – P. 262–277.
25. Li Y. and Yi-Chu Z. Wavelet analysis of acoustic emission signals from thermal barrier coatings // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* – 2006. – **16**. – P. 270–275.
26. Hamstad M. A., O’Gallagher A., and Gary J. A wavelet transform applied to acoustic emission signals: Part 1: Source identification // *J. of Acoustic Emission.* – 2002. – **20**. – P. 39–61.
27. Khamedi R., Fallahi A., and Oskouei A. R. 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.

28. Grabowska J., Palacz M., and Krawczuk M. Damage identification by wavelet analysis // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2008. – **22**. – P. 1623–1635.
29. Kim H. and Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis // *Eng. Struct.* – 2004. – **26**. – P. 347–362.
30. Piotrkowski R., Castro E., and Gallego A. Wavelet power, entropy and bispectrum applied to AE signals for damage identification and evaluation of corroded galvanized steel // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2009. – **23**. – P. 432–445.
31. Ahadi M. and Bakhtiar M. S. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals // *Appl. Acoustics.* – 2010. – **71**. – P. 634–639.
32. Chen C., Kovacevic R., and Jandgric D. Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminium // *Int. J. of Machine Tools & Manufacturing.* – 2003. – **43**. – P. 1383–1390.
33. *Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis* / R. Piotrkowski, A. Gallego, E. Castro, M. T. García-Hernandez, J. E. Ruzzante // *NDT&Int.* – 2005. – **38**. – P. 260–267.
34. *Coating adherence in galvanized steel assessed by acoustic emission wavelet analysis* / A. Gallego, J. F. Gil, J. M. Vico, J. E. Ruzzante, R. Piotrowski // *Scripta Materialia.* – 2005. – **52**. – P. 1069–1074.
35. Wang Q. and Chu F. Experimental determination of the rubbing location by means of acoustic emission and wavelet transform // *J. of Sound and Vibration.* – 2001. – **248**, № 1. – P. 91–103.
36. Feng Ya. and Schlindwein F. S. Normalized wavelet packets quantifiers for condition monitoring // *Mech. System and Signal Proc.* – 2009. – **23**. – P. 712–723.
37. Liu Q., Chen X., and Gindy N. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn // *Int. J. of Machine Tools & Manufacturing.* – 2006. – **46**. – P. 284–292.
38. A *two-dimensional* wavelet transform for detection of cracks in plates / S. Loutridis, E. Douka, L. J. Hadjileontiadis, A. Trochidis // *Eng. Struct.* – 2005. – **27**. – P. 1327–1338.
39. Vanniamparambil P. A., Guclu U., and Kotsos A. Identification of crack initiation in aluminum alloys using acoustic emission // *Exp. Mech.* – 2015. – **55**, № 5. – P. 837–850.
40. Ni Q.-Q. and Iwamoto M. Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites // *Eng. Fract. Mech.* – 2002. – **69**. – P. 717–728.
41. Jonson M. Classification of AE transients based on numerical simulations of composite laminates // *NDT&E Int.* – 2003. – **36**. – P. 319–329.
42. *Discrete* wavelet decomposition of acoustic emission signals from carbon-fiber-reinforced composites / G. Qi, A. Barhorst, J. Hashemi, G. Kamala // *Comp. Sci. and Techn.* – 1997. – **57**. – P. 389–403.
43. Qi G. Wavelet-based AE characterization of composite materials // *NDT&E Int.* – 2000. – **33**. – P. 133–144.
44. Jeong H. and Jang Y.-S. Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates // *Comp. Struct.* – 2000. – **49**. – P. 443–450.
45. Jeong H. Analysis of plate wave propagation in anisotropic laminates using a wavelet transform // *NDT&E Int.* – 2001. – **34**. – P. 185–190.
46. Ding Y., Reuben R. L., and Steel J. A. A new method for waveform analysis for estimating AE wave arrival times using wavelet decomposition // *NDT&E Int.* – 2004. – **37**. – P. 279–290.
47. Ciampa F. and Meo M. A new algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures // *Comp.: Part A.* – 2010. – **41**. – P. 1777–1786.
48. *Identification* of wear mechanisms of glass/polyester composites by means of acoustic emission / G. Kalogiannakis, J. Quintelier, P. De Baets, J. Degrieck, D. Van Hemelijck // *Wear.* – 2008. – **264**. – P. 235–244.
49. Sung D.-U., Kim C.-G., and Hong C.-S. Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform // *Comp.: Part B: Eng.* – 2002. – **33**. – P. 35–43.
50. Marec A., Thomas J.-H., and El Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2008. – **22**. – P. 1441–1464.
51. *Damage* evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms / T. H. Loutas,

- V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimenez, M. Pharaoh // *Comp. Sci. and Techn.* – 2006. – **66**. – P. 1366–1375.
52. Velayudham A., Krishnamurthy R., and Soundarapandian T. Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform // *Mat. Sci. and Eng. A.* – 2005. – **412**, № 1/2. – P. 141–145.
53. Acoustic emission detection for mass fractions of materials based on wavelet packet technology / X. Wang, J. Xiang, H. Hu, W. Xie, X. Li // *Ultrasonics.* – 2015. – **60**. – P. 27–32.
54. Beheshtizadeh N. and Mostafapour A. Processing of acoustic signals via wavelet & Choi-Williams analysis in three-point bending load of carbon/epoxy and glass/epoxy composites // *Ultrasonic.* – 2017. – **79**. – P. 1–8.
55. Baccar D. and Söffker D. Identification and classification of failure modes in laminated composites by using a multivariate statistical analysis of wavelet coefficients // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2017. – **96**. – P. 77–87.
56. A signal processing approach for enhanced Acoustic Emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites / M. Kharrat, E. Ramasso, V. Placet, M. L. Boubakar // *Mech. Systems and Signal Proc.* – 2016. – **70/71**. – P. 1038–1055.
57. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis / M. G. R. Sause, T. Müller, A. Horoschenkoff, S. Horn // *Comp. Sci. and Techn.* – 2012. – **72**, № 2. – P. 167–174.
58. On the model acoustic emission testing of composite structure / F. Dahmene, S. Yaacoubi, M. El Mountassir, N. Bendaoud, C. Langlois, O. Bardoux // *Comp. Struct.* – 2016. – **140**. – P. 446–454.
59. Takuma M. and Shinke N. Estimation of stress imposed on a structure's member parts by magnetomechanical acoustic emission. Application of displacement sensor and wavelet transform // *Technol. Repts Kansai Univ.* – 2000. – **42**. – P. 17–29.
60. Evaluation of Barkhausen Noise and Magnetoacoustic Emission Signals Properties for Plasticallé Deformed Armco Iron / L. Piotrowski, M. Augustynjak, M. Chmielewski, E. V. Hristoforou, K. Kosmas // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 2010. – **46**, № 2. – P. 239–242.
61. Barkhausen effect and acoustic emission in a metallic glass – Preliminary results / R. L. Sánchez, M. I. L. Pumeraga, M. Armeite, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante // *AIP Conference Proc.* – 2004. – **700**, № 1. – P. 1328–1335.
62. Спивак Л. В., Мясников Н. Н. Вейвлет-анализ спектров Баркгаузена в аморфном сплаве  $Fe_{78}B_{12}Si_9Ni_9$  // *Вестник Пермск. ун-та. Сер.: Физика.* – 2012. – **1**, № 19. – P. 61–64.
63. Miesowicz K., Staszewski W. J., and Korbiel T. Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection // *Int. J. of Fatigue.* – 2016. – **83**, № 2. – P. 109–116.
64. Piotrowski L., Augustyniak B., and Chmielewski M. On the possibility of the application of magnetoacoustic emission intensity measurements for the diagnosis of thick-walled objects in the industrial environment // *Measurement Sci. and Techn.* – 2010. – **21**, № 3. – P. 1–8.
65. Станкевич О. Вейвлет-перетворення сигналів МАЕ за перемагнення наводненого феромагнетика // *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип.: Проблеми корозії та антикорозійного захисту матеріалів.* – 2014. – **10**, № 2. – С. 517–522.
66. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: у 3-х т. Т. 2: Методологія акустико-емісійного діагностування. – К.: Наук. думка, 2009. – 264 с.
67. Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Станкевич О. М. Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів. – К.: Наук. думка, 2014. – 264 с.
68. Скальський В. Р., Станкевич О. М. Використання вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії для визначення особливостей крихкого руйнування скла // *Наук. нотатки: міжвуз. зб.* – Луцьк, 2011. – Вип. 33. – С. 213–219.
69. Скальський В. Р., Буйло С. И., Станкевич Е. М. Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии // *Дефектоскопия.* – 2012. – № 5. – С. 26–34. (Skal'skii V. P., Builo S. I., Stankevich E. M. A Criterion for evaluating the brittle fracturing of glass using acoustic emission signals // *Russian J. of Nondestructive Testing.* – 2012. – **48**, № 5. – P. 277–284.)
70. Skalsky V., Stankevych O., and Serhiyenko O. Wave displacement field at a half-space surface caused by an internal crack under twisting load // *Wave Motion.* – 2013. – **50**, № 2. – P. 326–333.

71. Stankevych O. and Skalsky V. The vibration of a half-space due to a buried mode I crack opening // *Wave Motion*. – 2017. – **72**. – P. 142–153.
72. Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Станкевич О. М. Ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів за параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 6. – С. 119–126.  
(Nazarchuk Z. T., Skal's'kyi V. R., and Stankevych O. M. A Method for the identification of the types of macrofracture of structural materials by the parameters of the wavelet transform of acoustic-emission signals // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 6. – P. 841–848.)
73. Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / В. Р. Скальський, Л. Р. Ботвіна, О. М. Станкевич, О. С. Дубицький, Ю. Я. Матвій // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2011. – № 3. – С. 12–17.
74. Станкевич О. М. Застосування вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії для оцінювання макроруйнування конструкційних матеріалів // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2015. – № 1. – С. 36–44.
75. Скальський В. Р., Станкевич Е. М., Матвій Ю. Я. Исследование особенностей макро-разрушения композиционных материалов // *Дефектоскопия*. – 2013. – № 10. – С. 14–25.  
(Skal'skii V. R., Stankevich E. M., Matviiv Yu. Ya. A Study of the features of the macrofracturing of composite materials // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2013. – **49**, № 10. – P. 562–571.)
76. Чергування типів руйнування стоматологічних полімерів на різних стадіях розвитку тріщини / В. Р. Скальський, В. Ф. Макеев, О. М. Станкевич, О. С. Кирманов, С. І. Винницька // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 6. – С. 60–66.  
(Alternation of the types of fracture for dental polymers in different stages of crack propagation / V. R. Skal's'kyi, V. F. Makeev, O. M. Stankevych, O. S. Kyrmanov, S. I. Vinnys'ka // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 6. – P. 836–843.)
77. Оцінювання міцнісних характеристик стоматологічних полімерів за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / В. Р. Скальський, В. Ф. Макеев, О. М. Станкевич, О. С. Кирманов, С. І. Винницька, В. К. Опанасович // *Проблеми прочності*. – 2015. – **47**, № 4. – С. 67–74.  
(Strength evaluation of stomatologic polymers by wavelet transform of acoustic emission signals / V. R. Skal's'kii, V. F. Makeev, O. M. Stankevich, O. S. Kyrmanov, S. I. Vynnyts'ka, V. K. Opanasovich // *Strength of materials*. – 2015. – **47**, № 4. – P. 566–572.)
78. Метод акустичної емісії в дослідженні стоматологічних полімерів / В. Р. Скальський, В. Ф. Макеев, О. М. Станкевич, О. С. Кирманов, Б. П. Клим. – Львів: Кварт, 2015. – 150 с.
79. Скальський В. Р., Станкевич О. М. Метод діагностики типів руйнування матеріалів шляхом застосування до їх сигналів акустичної емісії вейвлет-перетворення // *Доп. НАН України*. – 2013. – № 3. – С. 83–89.
80. Скальський В., Станкевич О., Галан П. Визначення особливостей макроруйнування матеріалів за вейвлет-аналізом сигналів акустичної емісії // *Матеріали 16-ої Міжнар. наук.-техн. конф. “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів” “ЛЕОТЕСТ-2011” (Славське Львівської обл., 21–26 лютого 2011 р.)*. – Львів, 2011. – С. 67–71.
81. Stankevych O. and Skalsky V. Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis // *Eng. Fract. Mech.* – 2016. – **164**. – P. 24–34.
82. Скальський В. Р., Макеев В. Ф., Станкевич О. М., Кирманов О. С. АЕ-діагностування руйнування стоматологічних реставраційних матеріалів // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2017. – № 3. – С. 21–28.

Одержано 27.11.2017