

УДК 539.3:620.179.17

В.Р.Скальський, О.М.Станкевич

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

ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ СКЛА

Розглянуто руйнування різного типу скломатеріалів. Показано, що воно розпочинається за низьких значень прикладених навантажень та супроводжується низькоамплітудними сигналами акустичної емісії (АЕ). Під час подальшого розвитку руйнування сигнали АЕ змінюють свої амплітудно-частотні характеристики, для опису яких запропоновано неперервне вейвлет-перетворення. На основі аналізу значень отриманих вейвлет-коефіцієнтів побудовано критерій оцінки крихкого руйнування скла.

Актуальність проблеми. Під час АЕ-діагностування елементів конструкцій важливо встановити механізми руйнування, що у результаті дає змогу ефективно попереджати аварії або визначати залишковий ресурс об'єкта контролю. Зокрема, у залежності від величини пружнопластичної деформації конструкційного елемента за навантаження, що відповідає макроруйнуванню, методом АЕ розрізняють крихке (або квазікрихке) та в'язке руйнування [1]. Такий підхід дозволяє суттєво підняти рівень діагностичних робіт, оскільки на практиці встановити тип макроруйнування можна лише під час здійснення експертизи руйнування шляхом фрактографічного дослідження [2, 3].

У технічній діагностиці різноманітних об'єктів особливо важливо виявляти руйнування крихкого типу, оскільки більшість конструкційних матеріалів за час тривалого експлуатування суттєво окрихчуються. Це є дуже небезпечним фактором, що призводить до зниження в'язкості руйнування матеріалу, а відтак значного підвищення швидкості росту тріщини.

У літературі відомо модель та критерій АЕ-оцінювання типів макроруйнування за найстійкішими параметрами сигналів АЕ [1]: амплітудою, хвильовим відображенням та спектральними характеристиками. Однак, у режимі реального масштабу часу, на нашу думку, ефективніше для оцінки механізмів руйнування матеріалів використовувати їх неперервне вейвлет-перетворення.

Часто під час обробки нестационарних сигналів важливо оцінити їх частотні компоненти у часі. Одним із підходів, що дозволяє розв'язати таку задачу, є використання вейвлет-перетворення (ВП) [4]. Ефективність вейвлет-методів підтверджується зростаючим до них інтересом науковців багатьох прикладних галузей науки та техніки.

Стан проблеми. Різноманітні методи досліджень сигналів АЕ з використанням ВП для моніторингу стану елементів конструкцій та машин представлені у працях [5, 6]. Зокрема, виділено такі головні аспекти приведених методик: часово-частотний аналіз сигналів; видалення із сигналів шумових компонент та екстракція слабких сигналів; визначення особливостей сигналів; сингулярний аналіз стану об'єктів контролю; отримання особливостей наявних пошкоджень та дефектів; оцінка питомої ваги зношеності інструменту; стиск інформації та ідентифікація систем.

Методику використання ВП для локалізації джерел АЕ представлено у працях [7, 8]. Вейвлет-фільтрація сигналів АЕ дозволяє ефективно видаляти шумові компоненти сигналу, що своєю чергою, сприяє зменшенню впливу шумів та завад на визначення часу приходу сигналу, а відтак, і підвищенню точності локалізації джерел АЕ.

Низка публікацій присвячена використанню ВП для дослідження мікроруйнування (виявлення та розпізнавання пошкоджень і дефектів) за АЕ-контролю [9-11]. Автори на основі теоретико-експериментальних досліджень пропонують методики не лише виявлення дефектів у різних матеріалах чи конструкціях, але і їхньої ідентифікації.

Спроби визначення особливостей макроруйнування матеріалів за енергетичним критерієм та розподілом вейвлет-коефіцієнтів протягом усього часу навантаження зразка (аж до повного його руйнування) представлено у праці [12].

Мета роботи – оцінити механізми макроруйнування скла на основі аналізу особливостей сигналів АЕ за їх неперервним вейвлет-перетворенням (НВП) протягом усього часу навантаження.

Методика досліджень. Згідно з означенням [4], НВП сигналу $s(t)$ обчислюють за формулою

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

де $\psi(t)$ – материнський вейвлет, a – масштаб, b – часовий зсув, t – час. У результаті отримують спектр коефіцієнтів кореляції сигналу з вейвлетом $W_s(a, b)$, який зображають поверхнею у тривимірному просторі (рис. 1, а). На основі проєкції спектра на площину з ізолініями (рис. 1, б) можна прослідкувати зміну коефіцієнтів на різних масштабах у часі, а також виявити локальні екстремуми структури досліджуваного процесу. Великі значення вейвлет-коефіцієнтів означають наявність у сигналі значних флуктуацій у даний момент часу і, одночасно, хорошу відповідність огинаючої сигналу і вейвлета. Чим сильніше виражена особливість сигналу, тим сильніше вона виділяється на спектрограмі і тим вищий рівень вейвлет-коефіцієнтів.

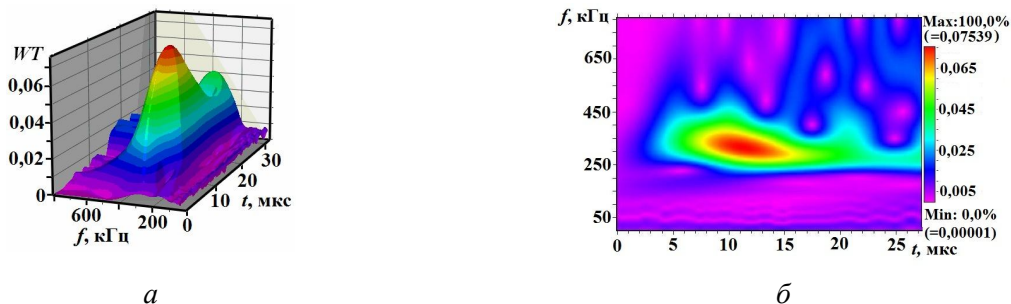


Рис. 1. Результат НВП у вигляді тривимірної поверхні (а) та проєкції спектра на площину з ізолініями (б).

Вибір конкретного материнського вейвлета (неперервного чи дискретного) повністю залежить від характеру поставленої задачі і від конкретного сигналу, який необхідно проаналізувати. Найпоширеніші дійсні неперервні базиси конструюють на основі функції Гауса, оскільки вона має найкращі показники локалізації як у часовій, так і у частотній областях, що є дуже важливо для аналізу нестационарних сигналів [4]. Зокрема, у програмі AGU-Vallen Wavelet [13], яку використовували для обчислення НВП у наших дослідженнях, за материнський вибрано вейвлет Габора, в основі якого лежить функція Гауса. Даний вейвлет дозволяє добре виділяти локальні особливості сигналів АЕ та забезпечує їх частотно-часове представлення. Материнський вейвлет та його Фур'є-перетворення записують у вигляді:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_p}{\gamma}\right)^2 + i\omega_p t\right], \quad (2)$$

$$\Psi(\omega) = (2\pi)^{1/2} \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_p}{\gamma}\right)^2 (\omega - \omega_p)^2\right], \quad (3)$$

де ω_p – несуча частота, γ – константа ($\gamma = \pi(2 \ln 2)^{1/2} = 5,336$) [14].

Результати досліджень та їх обговорення. Серед різноманіття конструкційних матеріалів чільне місце після металу та деревини займає скло. Окрім того, воно вважається яскравим представником крихких матеріалів [15].

Реалізацію методики досліджень здійснювали з використанням руйнування натрій-кальцій-силікатного скла. У першому варіанті експериментів використовували тротуарну RGB-плитку, виготовлену із такого матеріалу, а у другому – зразки віконного скла. Плитка мала форму зрізаної піраміди, нижня основа якої квадрат зі стороною 95 мм, а верхня – зі стороною 90 мм. Усередині плитка порожниста (відсутня нижня грань) і має бокові стінки товщиною 15 мм, а товщина верхньої грані – 10 мм; висота плитки – 60 мм. Виріб (рис. 2, а) стискали по всій верхній площині на розривній машині УМЭ-10ТМ квазістатично із середньою швидкістю зміни навантаження 6,7 кПа/с.

Щоб зменшити вплив хибних сигналів АЕ від тертя у місці дотикання граней плитки з робочими частинами машини та забезпечити відповідні умови навантаження, були виготовлені антифрикційні прокладки. Для відбору сигналів АЕ первинні перетворювачі через шар мастила фіксували за допомогою еластичної стрічки на бокових поверхнях тротуарної плитки із зусиллям притискання 3...5 Н (рис. 2, б).

За результатами експерименту встановлено, що зародження руйнування плитки відбувається за напружень 0,4...0,6 МПа, а остаточне руйнування – 10...12 МПа.

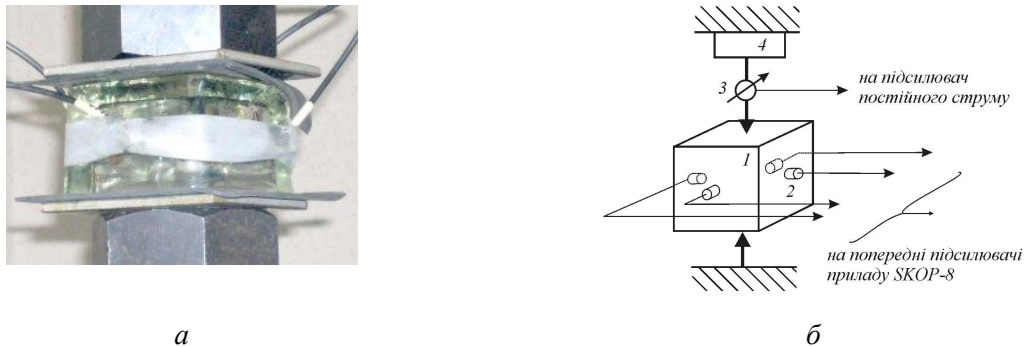


Рис. 2. Загальний вигляд випробувальної частини установки (а) та схема експериментальних випробувань (б): 1 – зразок, 2 – первинні п'єзоперетворювачі сигналів АЕ, 3 – тензометричний динамометр, 4 – навантажувальний пристрій машини УМЭ-10ТМ [1].

У режимі постобробки опрацьовували записані акустико-емісійною інформаційно-вимірювальною системою SKOP-8М [1] сигнали АЕ. Було експериментально оцінено такі параметри сигналів АЕ, як час настання події t_i (с) від початку експерименту; максимальне значення амплітуди A (мВ); час наростання переднього фронту сигналу τ_1 (мкс), за спектральним розподілом – смугу спектра частот Δf (кГц). Необхідно зауважити, що смуга частот вимірювального АЕ-тракту визначалась робочою смугою частот первинного перетворювача АЕ, яка становила 0,2–0,6 МГц. Таким чином, для ілюстрації особливостей макроруйнування скла опрацьовано 1500 сигналів АЕ, отриманих у результаті випробування плитки до повного руйнування.

Далі сигналів АЕ обчислювали неперервне вейвлет-перетворення за допомогою програмного забезпечення AGU-Vallen Wavelet [13]. Для кожного сигналу встановлено такі параметри: максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} та частоту f_{\max} (кГц), що йому відповідає у фіксований момент часу. За проведеним порівняльним аналізом отриманих даних варто зауважити, що результати спектрального аналізу та вейвлет-перетворення добре корелюють між собою – частоти f_{\max} , що відповідають максимальним значенням вейвлет-коефіцієнтів WT_{\max} , та частоти з найбільшими амплітудами за спектральним аналізом рівні.

На основі отриманих даних НВП побудували часовий тривимірний розподіл зміни максимальних вейвлет-коефіцієнтів та частот, що їм відповідають, протягом усього часу навантаження зразка – від початку і до повного його руйнування (рис. 3).

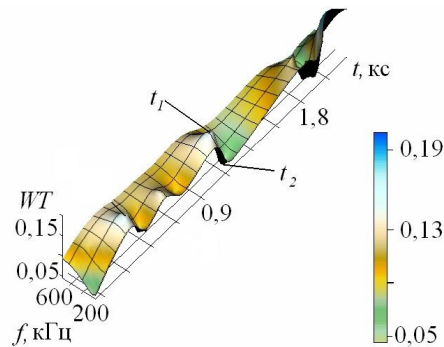


Рис. 3. Розподіл WT_{\max} та частот f_{\max} , що їм відповідають, НВП сигналів АЕ у склі.

Згідно методології АЕ-діагностування [1] за крихкого руйнування для сигналів АЕ характерні великі значення амплітуд, вузька смуга частотного спектра та швидке наростання переднього фронту. За зазначеними характеристиками вибірково проаналізовано отримані різні за величиною вейвлет-коефіцієнтів сигнали АЕ. Їх попарно вибирали так, щоб у часі розглянути особливості сигналів за максимальних та мінімальних значень WT . Приклад такого довільного вибору сигналів АЕ, зареєстрованих у моменти часу t_1 , t_2 з різними значеннями вейвлет-коефіцієнтів, показано на рис. 3. Згідно відомого критеріального параметра ζ [1] для оцінювання типів макроруйнування твердих тіл за найстійкішими параметрами сигналів АЕ, встановлено, що вибрані сигнали відповідають крихкому руйнуванню. На рис. 4, а, в наведено 3D-зображення НВП цих сигналів і їх 2D-проекції на площину "вейвлет-коефіцієнт WT – частота f " на рис. 4, б, г. Із рис. 4 бачимо, що НВП сигналів АЕ, отриманих під час руйнування скла тротуарної плитки, характеризується вузькосмуговими частотними піками та переважно високими значеннями вейвлет-коефіцієнтів WT_{\max} (змінюються у межах 0,05 ... 0,19 протягом повного циклу навантаження). Оскільки маємо крихкий матеріал, то бачимо, що під час руйнування стрибки, якими ростуть тріщини, відбуваються швидко і є короткотривалими. На основі аналізу отриманих 3D-зображень НВП сигналів АЕ впливає, що на протязі до 200 мкс може відбутися приблизно 10 актів руйнування. Якщо проаналізувати характеристики всіх сигналів АЕ, що відповідають актам руйнування і мають найбільші значення вейвлет-коефіцієнтів, то отримаємо зміну ширини спектрів відповідних частот Δf у межах 0,09-0,25 МГц. Її визначали для кожної спектральної характеристики події АЕ на рівні $0,7WT_{\max}$ (рис. 4, б).

Було зауважено, що за збільшення значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} ширина смуги частот, що відповідає частоті f_{\max} , звужується. Таким чином, можна стверджувати, що існує певне співвідношення між максимальним значенням вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} та шириною смуги частот Δf , що йому відповідає, за яким можна встановити кількісні характеристики сигналів АЕ під час руйнування скла. З урахуванням наведених вище міркувань, такою характеристикою може бути критеріальний параметр κ :

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \times \Delta f_0}{\Delta f}, \quad (4)$$

де WT_{\max} – максимальне значення вейвлет-коефіцієнта в події АЕ; Δf – ширина частотної смуги для, що відповідає WT_{\max} , події АЕ в координатах WT - f ; Δf_0 – ширина робочої смуги АЕ-тракту, що визначається робочою смугою частот первинного перетворювача (0,2–0,6 МГц).

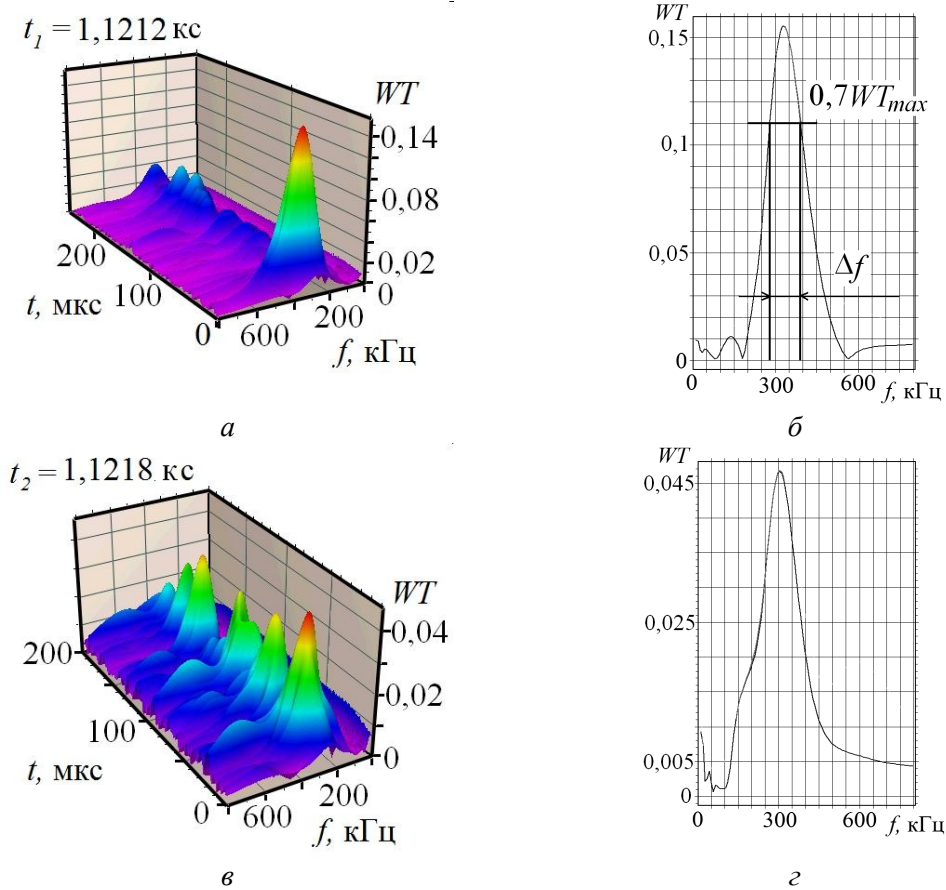
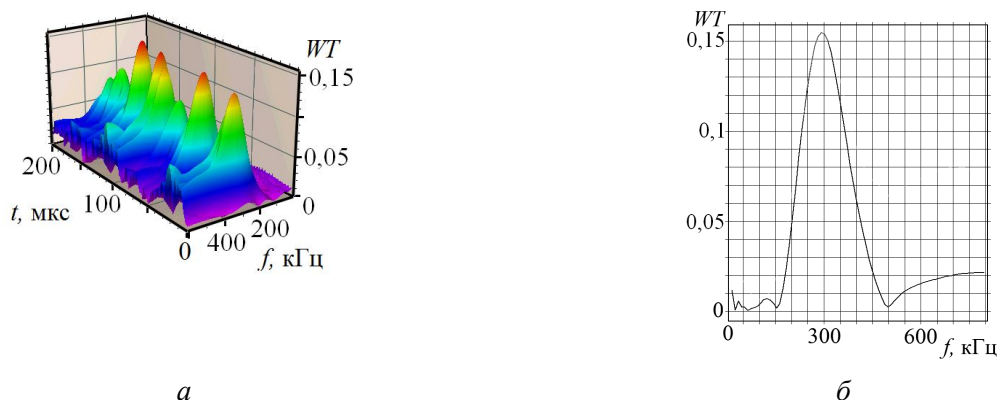


Рис. 4. Результати НВП сигналів АЕ, які супроводжують акти руйнування скляної тротуарної плитки (t_i – час настання i -ої АЕ-події від початку експерименту).

За виконаними розрахунками на основі даних НВП сигналів АЕ, необхідно зауважити, що для руйнування скла характерною ознакою є те, що коефіцієнти WT_{max} вейвлет-перетворення сигналів АЕ мають діапазон розкиду значень $0,05 \leq WT_{max} \leq 0,19$, а критеріальний параметр κ – $0,1 \leq \kappa \leq 0,8$.

Одержану інформацію додатково співставили з результатами НВП сигналів АЕ, отриманих під час руйнування різного типу зразків, виготовлених із віконного скла. Їх випробували розтягом пластинчастих і позацентровим розтягом компактних зразків. Характерні 3D-відображення сигналів АЕ та їх 2D-проекції на площину $WT-f$ показані на рис. 5. Як бачимо, вони цілком ідентичні до приведених вище, при цьому діапазон розкиду смуги частот становить 0,09-0,2 МГц, а значень вейвлет-коефіцієнтів – $0,05 \leq WT_{max} \leq 0,24$. Таким чином, для крихкого руйнування віконного скла розкид значень критеріального параметра становить $0,1 \leq \kappa \leq 0,7$, що добре узгоджується з описаними вище випробуваннями скла тротуарної плитки.



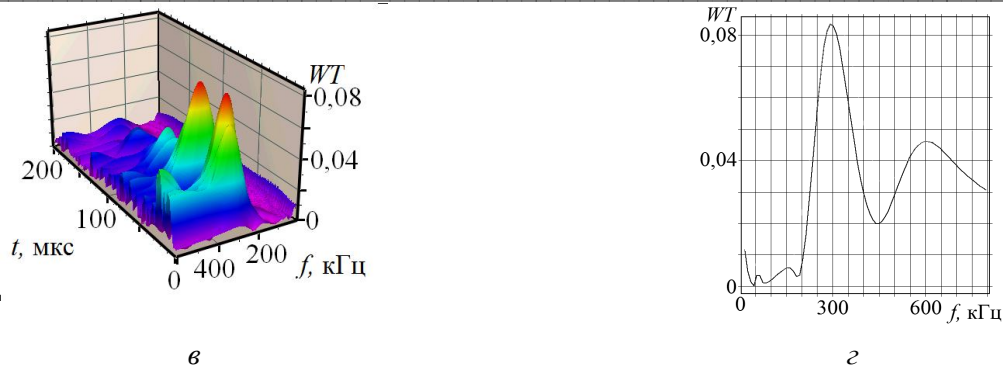


Рис. 5. Результати НВП типових сигналів АЕ, які супроводжують акти руйнування віконного скла.

На підставі викладеного можна стверджувати, що для крихкого руйнування різних типів скла діапазон розкиду значень критеріального параметра становить $0,1 \leq \kappa \leq 0,8$.

Висновки. Неперервне вейвлет-перетворення сигналів АЕ є важливим фактором одержання діагностичної інформації, за якою можна ідентифікувати механізми макроруйнування у будь-якому часовому інтервалі навантаження. Залежності “вейвлет-коефіцієнт–частота” сигналів АЕ добре корелюють з їхніми спектральними характеристиками, отриманими шляхом перетворення Фур’є.

За шириною частотної смуги неперервного вейвлет-перетворення в координатах $WT-f$ та величиною значення вейвлет-коефіцієнта сигналу АЕ, що характерний кожному акту руйнування, запропоновано критерій, який враховує параметри вимірювального тракту і особливості спектрів сигналів АЕ. Кількісно встановлено діапазон його значень для крихкого руйнування скломатеріалів.

1. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: у 3 т./ З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К: Наукова думка. – 2009. – 878 с.
2. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л. Р. Ботвина; под ред. И. И. Новикова. – М.: Наука, 2008. – 344 с.
3. Мак-Ивили А. Дж. Анализ аварийных разрушений / А Дж. Мак-Ивили; под ред. Л. Р. Ботвиной. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.
4. Воробьев В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин. – СПб.: ВУС, 1999. – 204 с.
5. Данюк А. В. Применение Фурье- и вейвлет-преобразования в комплексном анализе сигналов акустической эмиссии для диагностики технологического оборудования/ А. В. Данюк, Д. Л. Мерсон, М. Ю. Надточий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://konftm.tltsu.ru/stat/danuk/input1.html>.
6. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning / Xiaoli Li // International Journal of Machine Tools &Manufacture. – 2002. – **42**. – P.157–165.
7. 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.
8. Ding Y. A new method for waveform analysis for estimating AE wave arrival times using wavelet decomposition / Y. Ding, R. L. Reuben, J. A. Steel // NDT&E International. – 2004. – **37**. – P. 279–290.
9. Kim H. Damage detection of structures by wavelet analysis / Hansang Kim, Hani Melhem // Engineering Structures. – **26**. – 2004. – P. 347–362.
10. Khamedi R. Effect of martensite phase volume fraction on acoustic emission signals using wavelet packet analysis during tensile loading of dual phase steels / R. Khamedi, A. Fallahi, A. Refahi Oskouei // Materials and Design. – 2010. – **31**. – P. 2752–2759.

11. Ahadi M. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals / Majid Ahadi, Mehrdad Sharif Bakhtiar // Applied Acoustics. – 2010. – 71. – P. 634–639.
12. Скальський В. Визначення особливостей макроруйнування матеріалів за вейвлет-аналізом сигналів акустичної емісії / В. Скальський, О. Станкевич, П. Галан // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2011, 21-26 лютого 2011 р.: матеріали конференції. – Львів, 2011. – С. 67-71.
13. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. – [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/software/index.html>.
14. Wavelet transform of acoustic emission signals / H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Nayashi, M. Takemoto, K. Ono // Journal of Acoustic Emission. – 1996. – Vol. 14., № 2. – P. 69-84.
15. Солнцев С. С. Разрушение стекла / С. С. Солнцев, Е. М. Морозов. – М.: ЛКИ, 2008. – 152 с.