

УДК 539.3:620.179.17

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ФІБРИ В БЕТОННІЙ МАТРИЦІ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ¹, О. М. СТАНКЕВИЧ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено вплив об'ємної частки високоміцної фібри на механічні характеристики та акустичну емісію (АЕ) армованих бетонних балок під час випробувань методом триточкового згину. Запропоновано АЕ критерій оптимізації кількості фібри для забезпечення максимальної міцності на розтяг композитів на основі бетонної матриці, яким є мінімальне значення коефіцієнта міцності – відношення міцності на розтяг композиту до напружень початку генерування сигналів АЕ, що супроводжують зсувні механізми руйнування. Встановлено числові значення цього коефіцієнта для фібробетонів із базальтовою та сталєвою фібрами.

Ключові слова: акустична емісія, базальтова та сталєва фібри, фібробетон, вейвлет-перетворення, оптимізування об'ємної частки фібри.

The influence of the volume fraction of high-strength fiber on the mechanical characteristics and acoustic emission (AE) of reinforced concrete beams during their three-point bending test was studied. A criterion for AE optimization of the volume fraction of high-strength fiber to ensure the maximum tensile strength of composites based on a concrete matrix is proposed, which is the minimum value of the strength coefficient – the ratio of the tensile strength of the composite to the stresses of the beginning of the generation of AE signals accompanying shear fracture mechanisms. Numerical values of this coefficient were established for fiber concrete with basalt and steel fibers.

Keywords: acoustic emission, basalt and steel fiber, acoustic emission, wavelet transform, optimization of fiber volume fraction.

Вступ. Розвиток пошкодженості та руйнування композиційних матеріалів на основі портландцементу – складні явища, обумовлені безліччю структурно різноманітних взаємодіючих процесів. Відомо [1], що властивості таких композитів залежать від низки чинників, зокрема, від бетонної матриці (міцності бетону, основних та додаткових компонентів), волокна (типу, об'ємної частки, довжини, діаметра, міцності, жорсткості тощо) та міжфазного переходу. На сьогодні вплив різних видів волокон на механічну поведінку фібробетону за дії зовнішнього навантаження всебічно вивчено [2–4]. Однак поведінка волокна у конкретній матриці під дією навантаження залишається важливою під час проектування інженерних конструкцій.

Для моніторингу розвитку пошкодження бетонних матеріалів та конструкцій ефективний метод акустичної емісії (АЕ), оскільки утворення дефектів у структурі бетонних композитів супроводжується генеруванням сигналів АЕ з різними характеристиками, що дає змогу вивчити процес накопичення пошкоджень та особливості руйнування матеріалів [5, 6]. Тут найважливіше визначити тип цього руйнування, оскільки це дасть змогу вибрати оптимальну конструкцію підсилення, щоб протистояти конкретним напруженням. Крім того, оскільки зсувні

тріщини поширюються після появи тріщин відриву [7], то ідентифікуючи їх за відповідними параметрами АЕ, можна оцінити пошкодженість матеріалу, а отже, і стан конструкції загалом.

Стан проблеми. У літературі описано низку методик ідентифікування механізмів руйнування бетонів, де використовують різні параметри сигналів АЕ. Найпоширеніша із них ґрунтується на класифікації тріщин за розподілом параметрів RA (відношенням часу наростання сигналу до максимальної амплітуди) та середньої частоти AF (відношенням кількості подій АЕ до тривалості генерування), залежно від значення яких ідентифікують тріщини відриву та зсуву [7]. На основі загальної теорії АЕ розроблено автоматизований метод виявлення тріщини, встановлення її типу та орієнтації з урахуванням часу прибуття та амплітуди першого збурення. Такий підхід використали, зокрема, досліджуючи вплив на характеристики АЕ (під час руйнування фібробетону) кількості різного виду фібр [8, 9], різних видів хімічного покриття сталевих фібр [10] та типу навантаження [11, 12], а також температури [13]. Розроблено підходи до аналізу сигналів АЕ за їх частотним спектром [14], амплітудним розподілом [15], за допомогою багатопараметричного аналізу [16, 17] та навчання нейронної мережі [18].

Вказані вище методики дають змогу ідентифікувати механізми руйнування фібробетонів, однак, способи оптимізації їх складу, щоб забезпечити найкращі міцнісні характеристики з використанням методу АЕ, нам невідомі.

Мета досліджень – оптимізувати кількість високоміцної фібри у бетоні на основі ідентифікування механізмів руйнування за вейвлет-перетворенням сигналів АЕ.

Матеріали та методика випроб. Досліджували триточковим згином два типи зразків (40×40×160 mm): I – цементний камінь, армований базальтовою фіброю; II – бетон зі сталевією анкерною фіброю.

Для зразків першого типу використали 68% портландцементу ПЦ II/A-3-500 загального будівельного призначення (ПІАТ “Волинь-Цемент”), 4% гіперпластифікатора на основі полікарбоксилату Verament ТВ-1 та 28% води. Розчин перемішували до отримання однорідної суміші впродовж 5 min, після чого ущільнювали на вібраційному столі, щоб видалити повітряні бульбашки і зменшити кількість пор. До готової цементної суміші додавали 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 vol.% базальтової фібри (ТОВ “Технобазальт-Інвест”).

Суміш зразків другого типу складалась із портландцементу М400 (520 kg/m³), задалегідь промитого подрібненого щебеню (1030 kg/m³) із максимальним розміром частинок 5 mm, піску (700 kg/m³) та води (200 kg/m³) [19]. До бетону додавали 1,5; 2; 2,5 vol.% анкерної фібри зі загнутими кінцями і профільованою поверхнею (діаметр 1,2 mm та довжина 50 mm).

Зразки витримували у формі в лабораторних умовах 24 h. Далі виймали з форми і тримали в стандартному приміщенні для тверднення за сталої температури 20°C і вологості 95% до досягнення міцності впродовж 28 днів. Для забезпечення повторюваності експериментальних результатів виготовили по п’ять зразків кожного типу композиту, які випробовували зі швидкістю навантаження 4·10⁻⁷ m/s (рис. 1).

Міцність на розтяг під час триточкового згину зразків фібробетону обчислювали за формулою

$$\sigma_B = 3P_{\max}l / (2bh^2),$$

де $P_{\max}$ – граничне навантаження; l – відстань між опорами (152 mm); b , h – ширина і висота зразка (40 mm).

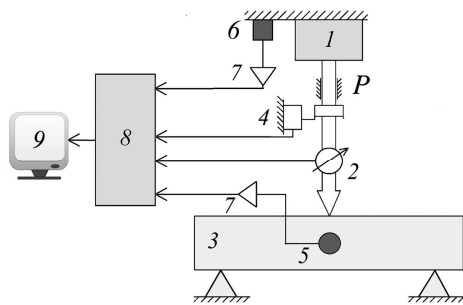


Рис. 1. Структурна схема експерименту:
1 – навантажувальна установка;
2 – динамометр; 3 – зразок; 4 – тензометр;
5, 6 – первинні перетворювачі АЕ;
7 – попередній підсилювач;
8 – АЕ система; 9 – комп'ютер.

Fig. 1. Structural scheme of the experiment:
1 – loading device; 2 – dynamometer;
3 – sample; 4 – extensometer;
5, 6 – AE sensors; 7 – pre-amplifier;
8 – AE system; 9 – computer.

Синхронно з механічними випробуваннями здійснювали АЕ моніторинг руйнування. Для селекції корисних сигналів від завад використовували паралельний АЕ канал (рис. 1; ПАЕ 6). Електричні сигнали АЕ реєстрували багатоканальною вимірювальною системою SKOP-8M [20]. Для всіх зразків місце встановлення ПАЕ (робоча смуга частот 0,2...0,6 МГц), параметри системи відбору, підсилення та опрацювання сигналів АЕ були однакові. Режими відбору АЕ інформації такі: тривалість вибірки 0,5 ms; період дискретизації аналогового сигналу 0,5 μ s; частота зрізу фільтра низьких частот 600 Hz, високих 200 Hz; поріг дискримінації – у межах 30%. Коефіцієнт підсилення АЕ тракту 70 dB (40 dB – попередній підсилювач). Щоб послабити вплив хибних сигналів АЕ від тертя у місці дотикання поверхонь балкового зразка з опорами установки, встановлювали антифрикційні прокладки. Будували розподіли у часі напружень, АЕ активності, кумулятивної амплітуди сигналів АЕ та здійснювали їх локальний аналіз за розробленими раніше методиками [21, 22].

Результати та їх обговорення. Відомо, що властивості армованого бетону, зокрема тріщиностійкість, міцність та в'язкість, залежать від механічних характеристик волокна, особливостей зв'язку між волокном та матрицею, а також від кількості та розподілу волокон у ній. Із підвищенням об'ємного вмісту волокна фізико-механічні характеристики фібробетону зростають до певного рівня, а далі знижуються. Тому існує певне співвідношення об'ємів волокна й матриці, за яких значення фізико-механічних характеристик фібробетону максимальні. Зазвичай спочатку розраховують склад бетону, що забезпечуватиме відповідні його міцнісні характеристики, а потім експериментально досліджують їх зміну з додаванням фіброволокон, визначаючи оптимальну кількість складників фібробетону.

Вплив об'ємної частки базальтової фібри на міцність та АЕ під час навантаження зразків армованого цементного каменю. На рис. 2 подано типові розподіли у часі напружень, АЕ активності та кумулятивної амплітуди сигналів АЕ під час руйнування зразків цементного композиту з різним об'ємним вмістом базальтової фібри. Як бачимо, кількість фібри не впливає на характер кривої навантаження, що підтверджує структурну цілісність композиту через високу адгезію базальтового волокна з матрицею. Водночас зі збільшенням об'ємного вмісту фібри міцність композиту зростає. Зокрема, за її вмісту 2% збільшується в 1,5 рази порівняно з композитом із 1% фібри (табл. 1). За об'ємного вмісту базальтової фібри 2,5% міцність композиту зменшується. Отже, оптимальний об'ємний вміст фібри в цементній матриці становить 2%.

Зі збільшенням об'ємного вмісту фібри змінюються також акустичні властивості композиту. Зокрема, суттєво підвищується АЕ активність, що можна пояснити так. В армованих волокнами композитах під дією навантаження розтягу найбільші напруження виникають на межі волокно–матриця [23]. Тому за відсутності дефектності матриці руйнування у такому композиті розпочинається саме

на цій межі. За цих умов у матриці одночасно виникають додаткові джерела генерування АЕ під час руйнування композиту. Водночас амплітуда сигналів АЕ, яка прямо пропорційна розміру новоутвореного дефекту, дещо зменшується. Внаслідок збільшення об'ємної частки фібри під навантаженням утворюються дефекти менших розмірів, тому генеруються сигнали АЕ меншої амплітуди.

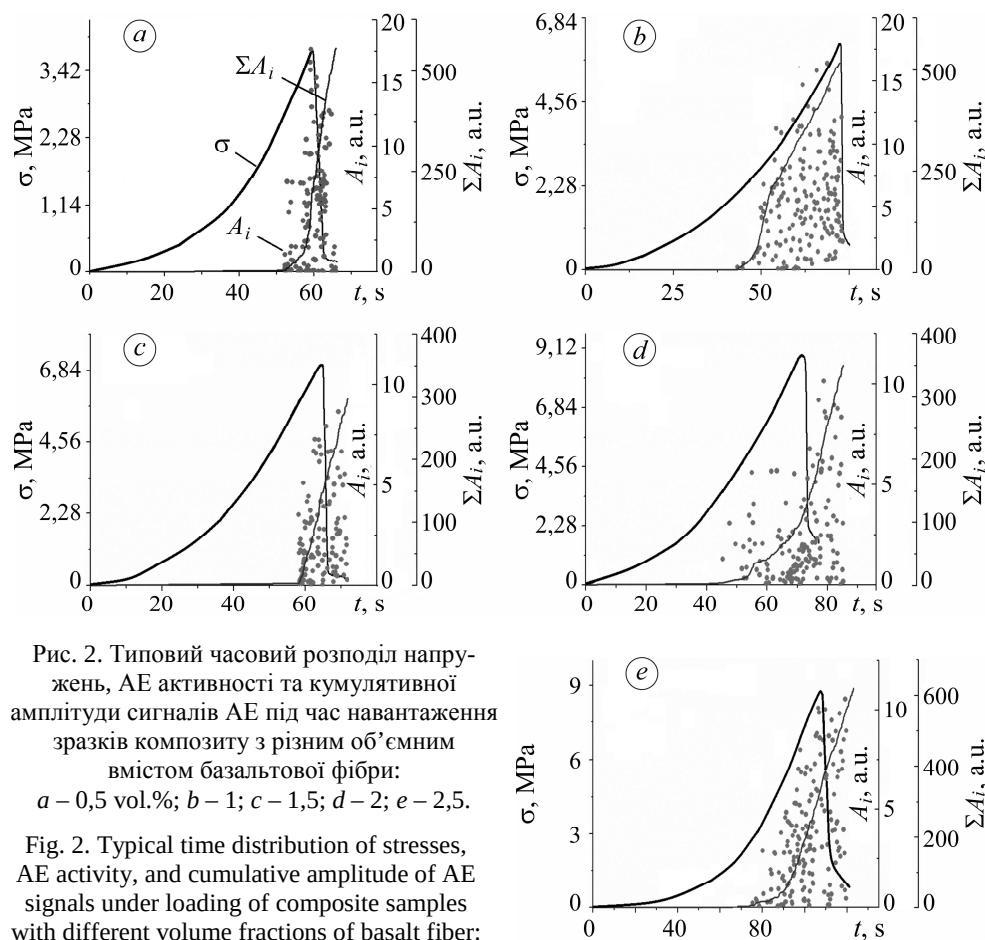


Рис. 2. Типовий часовий розподіл напружень, АЕ активності та кумулятивної амплітуди сигналів АЕ під час навантаження зразків композиту з різним об'ємним вмістом базальтової фібри: а – 0,5 vol.%; б – 1; в – 1,5; д – 2; е – 2,5.

Fig. 2. Typical time distribution of stresses, AE activity, and cumulative amplitude of AE signals under loading of composite samples with different volume fractions of basalt fiber: а – 0.5 vol.%; б – 1; в – 1.5; д – 2; е – 2.5.

Таблиця 1. Середні значення напружень початку генерування сигналів АЕ, які супроводжують зсувні механізми, міцності на розтяг та коефіцієнта міцності композиту з базальтовою фіброю

Об'ємний вміст фібри V_f	Напруження початку генерування сигналів АЕ, які супроводжують розвиток зсувних механізмів σ_{AE} , МПа	Міцність на розтяг σ_B , МПа	Коефіцієнт міцності k_{AE}
0,5	2,85	4,14	1,45
1	2,28	5,83	2,56
1,5	4,13	6,84	1,66
2	6,84	8,99	1,31
2,5	4,00	8,93	2,23

Міцність фібробетонів вичерпується з появою механізмів ковзання–витягування волокна [1]. У табл. 2 подано значення параметрів локальних імпульсів сигналів АЕ, які супроводжували різні механізми руйнування композиту з базальтовою фіброю [24]. За результатами їх ідентифікування будували діаграми розподілу цих механізмів у композитах з різним об’ємним вмістом фібри (рис. 3), де $n_{tf} = (N_{tf} / N) \cdot 100\%$, N_{tf} – кількість АЕ подій, які супроводжували відповідні механізми руйнування композиту; N – загальна кількість АЕ подій. Виявили, що зі зростанням частки базальтового волокна у композиті від 0,5 до 2 vol.% кількість подій n_{tf} , що супроводжують зсувні механізми руйнування (ковзання–відшарування волокна), збільшується, а в композиті з 2,5 vol.% базальтової фібри – зменшується.

Таблиця 2. Параметри сигналів АЕ, які супроводжували різні механізми руйнування композиту з базальтовою фіброю

Механізм руйнування	Максимальна частота $f_{\max}$, kHz	Тривалість випромінювання Δt , μs	Енергетичний параметр E_{WT}
Мікро- і макророзтріскування	100...200	15...25	0,019...0,5
Ковзання–відшарування волокна	200...250	5...9	0,005...0,0086
Витягування–руйнування волокна	300...400	8...10	0,015...0,11

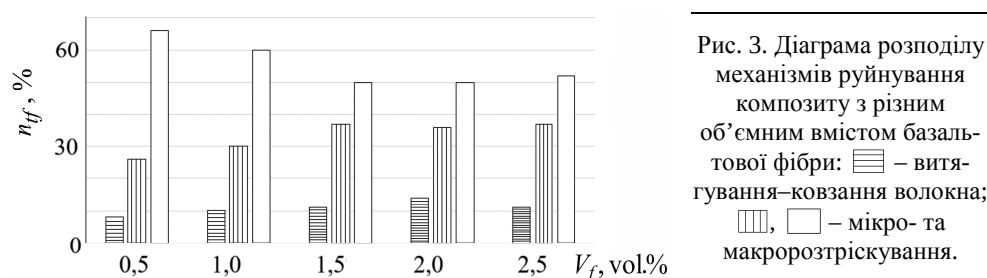


Fig. 3. Diagram of distribution of the fracture mechanisms of the composite with different volume fractions of basalt fiber: ▨ – pull out–slipping of the fiber; □, ▤ – micro- and macrocracking.

Визначали напруження початку генерування сигналів АЕ, які супроводжують зсувні механізми руйнування в композиті під навантаженням, та знаходили коефіцієнт міцності

$$k_{AE} = \sigma_B / \sigma_{AE},$$

де σ_B – міцність на розтяг під час триточкового згину зразків фібробетону; σ_{AE} – напруження початку генерування сигналів АЕ, які супроводжують зсувні механізми (табл. 1).

Для композиту з 2 vol.% базальтової фібри, який має найбільшу міцність на розтяг, значення цього коефіцієнта найменше, що свідчить про те, що зсувні механізми (ковзання–витягування фібри) тут розвиваються за напружень, близьких до максимальних. Отже, коефіцієнт k_{AE} , який відповідає оптимальній кількості фібри для забезпечення максимальної міцності на розтяг цементного композиту з базальтовою фіброю, не повинен перевищувати 1,3.

Вплив сталевї фїбри на механїчні та акустичнї властивостї бетону. За результатами механїчних випробувань (табл. 3), з підвищенням вмісту фїбри від 2 до 2,5 vol.% мїцнїсть на розтяг за згину дрібнозернистого бетону зї сталевю фїброю збільшилась у середньому на 35% і з подальшим зростанням кількостї арматури суттєво не змінюється. Отже, встановлено оптимальний вміст сталевї фїбри, який забезпечує максимальну мїцнїсть бетону на розтяг за згину (2,5 vol.%). Із подальшим збільшенням вмісту арматури мїцнїсть знижується, що обумовлено зменшенням товщини матричного шару настїльки, що матерїал стає схильним до розшарування навіть за невеликих навантажень.

Таблиця 3. Середнї значення навантаження початку генерування сигналів АЕ, якї супроводжують зсувнї механїзми, мїцностї на розтяг та коефїцієнта мїцностї бетону зї сталевю фїброю

Об'ємний вміст фїбри V_f	Напруження початку генерування сигналів АЕ, якї супроводжують розвиток зсувних механїзмів σ_{AE} , МПа	Мїцнїсть на розтяг σ_B , МПа	Коефїцієнт мїцностї k_{AE}
1,5	6,66	8,06	1,21
2	9,90	10,87	2,56
2,5	12,82	14,36	1,12
3	10,22	12,82	1,25

Щоб ідентифїкувати джерела АЕ, аналізували її сигнали, зареєстрованї під час навантаження згином бетону, армованого 2 vol.% сталевї фїбри. Криву навантаження (рис. 4) розділили на відповіднї ділянки, де домінують певнї механїзми його руйнування [25]: ділянка до т. А характеризується поширенням трїщин у матриці та незначним ковзанням волокна, від т. А до т. В – інтенсивним мікро-розтріскуванням, незначним витягуванням волокна та його ковзанням, від т. В до т. С – інтенсивним ковзанням волокна та його витягуванням, від т. С до т. D – витягуванням волокна з бетонної матриці. Від т. D крива виходить на сталий режим, що відповідає повільному поширенню магістральної трїщини.

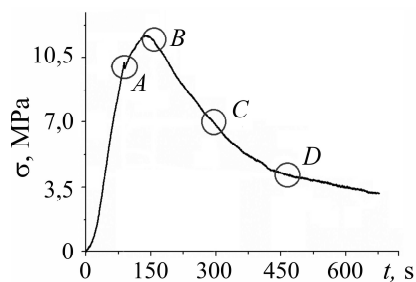


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Часова залежність навантаження для бетону, армованого 2 vol.% сталевї фїбри.

Fig. 4. Time dependence of loading for concrete reinforced with 2 vol.% steel fiber.

Рис. 5. Дїаграма розподїлу механїзмів руйнування фїробетону на рїзних стадїях навантаження:  – витягування–ковзання волокна;   – мікро- та макророзтріскування.

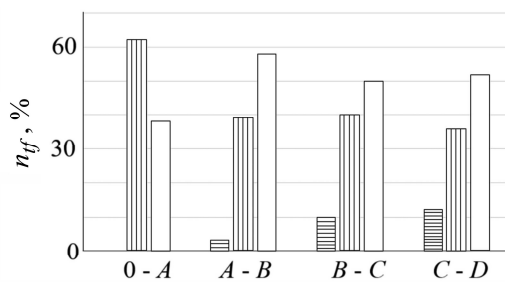


Рис. 5. Fig. 5.

Fig. 5. Diagram of distribution of the fracture mechanisms of fiber-reinforced concrete at different stages of loading:  – pull out-slipping of the fiber;   – micro- and macrocracking.

На рис. 5 подано розподіл кількості подій АЕ, що супроводжували різні механізми руйнування на різних стадіях навантаження. Виявили, що на початкових етапах відбувається активне мікро- та макророзтріскування, далі зростає частка подій, які генерувались внаслідок витягування–ковзання волокна. Оскільки для армування використовували анкерну фібру, то її витягування–ковзання супроводжується інтенсивним поширенням тріщин від її кінців у бетонній матриці. Тому, незважаючи на те, що на останніх стадіях навантаження фібробетонів традиційно домінують саме ці механізми, спостерігаємо велику кількість сигналів АЕ, що супроводжують тріщиноутворення у них. Отримані результати узгоджуються з відомими у [25], що свідчить про коректність запропонованого підходу.

Верифікували запропонований АЕ критерій оптимізації кількості фібри за мінімальним значенням коефіцієнта міцності композиту. Для композитів зі сталеву фібру визначали навантаження початку генерування сигналів АЕ, які супроводжують розвиток зсувних механізмів, та знаходили коефіцієнт міцності за наведеною формулою (табл. 3). Для найміцнішого композиту з 2,5 vol.% фібри значення цього коефіцієнта найменше. Таким чином, коефіцієнт міцності k_{AE} , який відповідає оптимальній кількості сталеву фібри для забезпечення максимальної міцності на розтяг композиту, не повинен перевищувати 1,12.

Отже, АЕ критерій оптимізування кількості високоміцної фібри в бетонній матриці сформулюємо так: щоб забезпечити максимальну міцність на розтяг армованого фібру композиту, його коефіцієнт міцності повинен задовольняти умову

$$k_{AE} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{AE}} \leq \begin{cases} 1,3 - \text{композит із базальтовою фібру}; \\ 1,12 - \text{зі сталеву}. \end{cases}$$

ВИСНОВКИ

Запропоновано новий метод ідентифікування механізмів руйнування в фібробетонах під дією навантаження за параметрами вейвлет-перетворення сигналів АЕ, який дає змогу визначати момент вичерпання їх міцності на ранніх стадіях руйнування. Для композитів на основі бетонної матриці встановлено АЕ критерій оптимізації кількості високоміцної фібри, що забезпечує їх максимальну міцність на розтяг. Таким критерієм є мінімальне значення коефіцієнта міцності – відношення міцності на розтяг композиту до напружень появи сигналів АЕ, що супроводжують зсувні механізми руйнування. Встановлено його числові значення для фібробетонів із базальтовою (1,3) та сталеву (1,12) фібрами.

1. *Bentur A. and Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites.* – CRC Press, 2006. – 624 p.
2. *Influence of the volume fraction and shape of steel fiber on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – a review / L. Soufeiani, S. N. Raman, M. Z. B. Jumaat, U. J. Alengaram, G. Ghadyani, and P. Mendis // Eng. Struct.* – 2016. – **124**, № 1. – P. 405–417.
3. *Pakravan H. R., Latifi M., and Jamshidi M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: a review // Constr. Build. Mater.* – 2017. – **142**, № 1. – P. 290–294.
4. *Wu Z., Khayat K. H., and Shi C. How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC // Cem. Concr. Compos.* – 2018. – **90**. – P. 193–201.
5. *Ren H., Li T., and Song S. Analysis of damage characteristics of steel fiber-reinforced concrete based on acoustic emission // Eng. Fail. Anal.* – 2023. – **148**. – Article number 107166.
6. *Acoustic emission characteristics and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete under tensile load / L. Yang, H. Xie, D. Zhang, F. Zhang, and C. Lin // Constr. Build. Mater.* – 2021. – **312**. – Article number 125442.

7. Ohno K. and Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission // *Constr. Build. Mater.* – 2010. – **24**. – P. 2339–2346.
8. Aggelis D. G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters // *Mech. Res. Commun.* – 2011. – **38**. – P. 153–157.
9. Mechanical properties and crack classification of basalt fiber RPC based on acoustic emission parameters / H. Liu, Sh. Liu, P. Zhou, Yu. Zhang, and Yu. Jiao // *Appl. Sci.* – 2019. – **9**, № 18. – doi:10.3390/app9183931
10. Monitoring of the mechanical behavior of concrete with chemically treated steel fibers by acoustic emission / D. G. Aggelis, D. V. Soulioti, E. A. Gatselou, N.-M. Barkulova, and T. E. Matikas // *Constr. Build. Mater.* – 2013. – **48**. – P. 1255–1260.
11. Experimental investigation on the stress-strain behavior of steel fiber reinforced concrete subjected to uniaxial cyclic compression / B. Li, L. Xu, Y. Chi, B. Huang, and C. Li // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – **140**. – P. 109–118.
12. Damage analysis in steel fibre reinforced concrete under monotonic and cyclic bending by means of acoustic emission monitoring / M. De Smedt, S. Vrijdanhs, C. Van Steen, E. Vestring, and L. Vandewalle // *Cem. Concr. Compos.* – 2021. – **114**. – 103765.
13. Acoustic emission behavior of thermally damaged self-compacting high strength fiber reinforced concrete / H. Xargay, P. Folino, N. Nunez, M. Gómez, A. Gaggiano, and E. Martinnelli // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – **187**. – P. 519–530.
14. Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damaged concrete / Y. Farnam, M. R. Geiker, D. Bentz, and J. Weiss // *Cem. Concr. Compos.* – 2015. – **60**. – P. 135–145.
15. Wu K., Chen B., and Yao W. Study on the AE characteristics of fracture process of mortar, concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams // *Cem. Concr. Res.* – 2000. – **30**. – P. 1495–1500.
16. Damage processes of polypropylene fiber reinforced mortar in different fiber content revealed by acoustic emission behavior / Y. Wang, S. Chen, Z. Xu, S. Liu, and H. Hu // *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Scie. Ed.* – 2018. – **33**, № 1. – P. 155–163.
17. Electric and acoustic activity in notched fiber-reinforced concrete beams under three-point bending / D. Triantis, D. K. Tsaousi, I. Stavarakas, E. D. Pasiou, P. Douvis, and S. K. Kourkoulis // *Materials Today: Proc.* – 2020. – **32**, № 2. – P. 148–155.
18. Kravchuk R. and Landis E. N. Acoustic emission-based classification of energy dissipation mechanisms during fracture of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – **176**. – P. 531–538.
19. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталевібробетонних конструкцій. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
20. Acoustic-emission system for non-destructive testing SKOP-8M. – Електронний ресурс. – URL: https://ipm.lviv.ua/our_developments/our_developments_details_id=6.php
21. Skalsky V. R., Stankevych O. M., and Kuz I. S. Application of wavelet transforms for the analysis of acoustic-emission signals accompanying fracture processes in materials (A survey) // *Materials Science.* – 2018. – **54**, № 2. – P. 139–153.
22. A ranking of fiber composites by estimation of types and mechanisms of their fracture / V. Skalskyi, O. Stankevych, T. Zosel, S. Vynnytska, H. Thomas, and A. Pich // *Eng. Fract. Mech.* – 2020. – **235**. – Article number 107147.
23. Identification of fracture mechanisms in cementitious composites using wavelet transform of acoustic emission signals / O. Stankevych, V. Skalskyi, B. Klym, and P. Velykyi // *Proc. Struct. Integrity.* – 2022. – **36**. – P. 114–121.
24. Identification of fracture mechanism of cement mortar reinforced with basalt and polypropylene fibers / V. R. Skalsky, O. M. Stankevych, B. P. Klym, A. Ye. Lisnichuk, and P. P. Velykyi // *Materials Science.* – 2021. – **56**, № 4. – P. 441–453.
25. Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete / B. Li, L. Xu, Y. Shi, Y. Chi, Q. Liu, and C. Li // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – **181**. – P. 474–486.

Одержано 13.06.2023