



ІІ МІЖНАРОДНА
НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
«ДИНАМІКА, МІЦНІСТЬ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В
МАШИНОБУДУВАННІ» (ДММ-2020)
05-08 жовтня 2020 р.



АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ РУЙНУВАННЯ ФІБРОБЕТОНІВ

Станкевич О. М., Скальський В. Р., Толопко Я. Д., Долішній П. М.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2020

Галузі найпоширенішого використання композитів:

1. Судно- та машинобудування
2. Авіакосмічна техніка
3. Хімічна промисловість
4. Житлове та промислове будівництво
5. Військова промисловість тощо

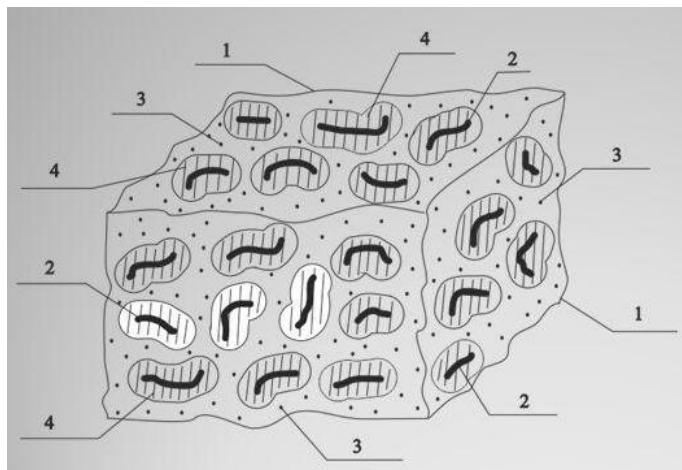
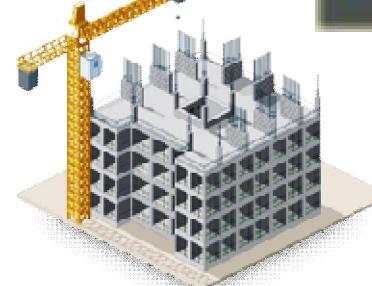


Рис. 1. Структура фібробетону:

1 – межа мікрокопічної комірки; 2 – фібра;
3 – матриця бетону; 4 – зона контактної взаємодії
армуючих волокон із бетоном

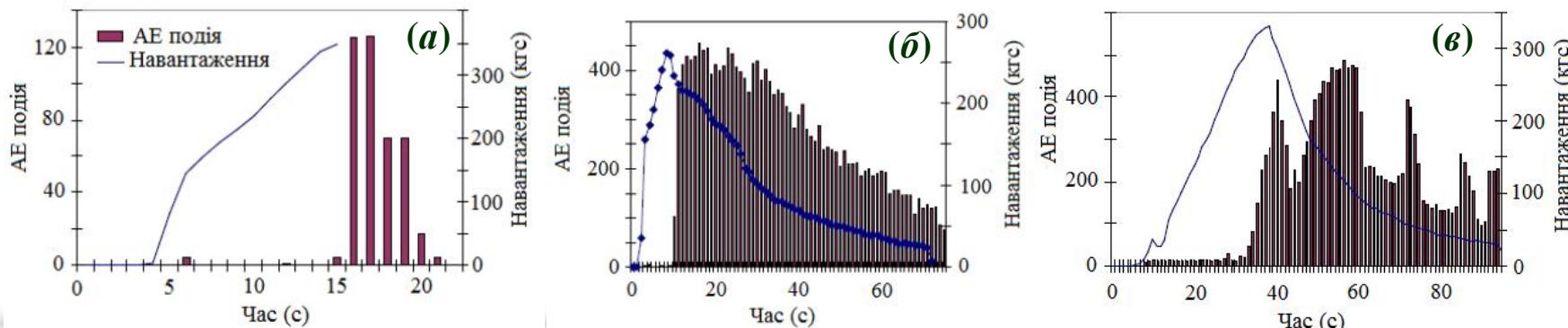
Види фібри у фібробетонах:

- скловолоконна;
- металева;
- базальтова;
- поліпропіленова;
- акрилова;
- карбонова;
- віскозна;
- поліетиленова;
- поліамідна;
- нейлонова;
- поліефірна;
- тощо.

Використання методу акустичної емісії (AE) у дослідженнях армованих фіброполокнами бетонів

Базальтове фіброполокно

1. Вивчали вплив різних конструкційних сумішей на властивості фібробетону, ідентифікували стадії його пошкодження за параметрами сигналів AE (Liu H. et al., 2019).
2. За параметрами сигналів AE аналізували внутрішнє пошкодження та механізми руйнування бетону під час тверднення (Liu H., Shan W., Jiao Y., 2017).
3. Досліджували вплив кількості та довжини базальтового волокна в суміші на генерування AE (Kencanawati N., Shigeishi M. , 2014).
4. Ідентифікували механізми руйнування композитів за частотою сигналів AE (Prasad V. V., Rao T. E., 2018).
5. Аналізували вплив кількості базальтового волокна в суміші на параметри сигналів AE (Wang Y. et al., 2019).
6. Вивчали вплив різних типів волокон на мікроструктуру та механічну поведінку бетонів, армованих волокнами (Hannawi K., Bian H., Prince-Agbodjan W., Raghavan B. , 2016).

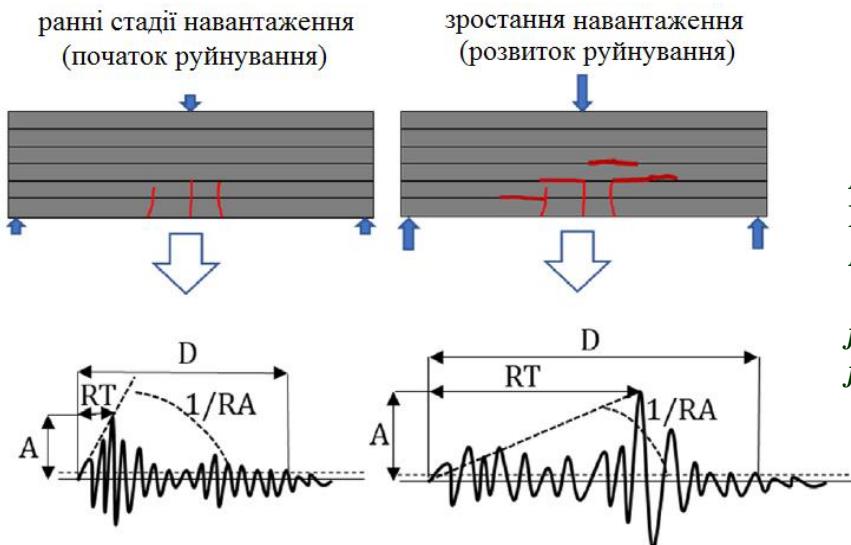


Генерування AE у високоміцному розчині без базальту (a), із 3% (б) та 5% (в) базальтового волокна [3].

Поліпропіленове фіброволокно

1. Огляд досліджень бетонів, армованих полімерними волокнами (Syed Mazlan S. M. S., Abdullah S. R., Shahidan S., Mohd Noor S. R. A review of the application Acoustic Emission (AE) incorporating mechanical approach to monitor Reinforced concrete (RC) strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) properties under fracture. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017).
2. Вивчали еволюцію руйнування (поширення мікро- та макротріщин, витягування та розрив волокон) та ступінь пошкодження цементного розчину та бетонів, армованих фіброволокнами, за різними параметрами сигналів АЕ (Guzmán C. et all, 2015; Choi W., Yun H., 2015; Ma G., Li H., 2017; Do Yun H., Choi W. C., Seo S. Y., 2010; Minak G., Zucchelli A., 2008; Selman E., Ghiami A., Alver N., 2015; Degala S., Rizzo P., Ramanathan K., Harries K. A., 2009; Mohammad A. R., Shanmugan S. R., Kawasaki Y., Ogawa N., 2017; Wang Y., Chen S., Xu Z., Liu S., Hu H., 2018; Logoń D., 2019).

Параметри сигналів АЕ, які використовують у літературі для ідентифікування стадій руйнування фібробетонів



А – максимальна амплітуда; D – тривалість;
RT – час наростання; RA – співвідношення RT до А;
AF – “середня частота” – відношення загальної кількості
перетинів сигналом порогу до його тривалості;
 f_c – центральна частота (центроїд спектра);
 f_{max} – пікова частота (частота з найбільшим значенням).

Мета досліджень: розробити критерії та методики оцінювання механізмів руйнування армованих фіброполокнами композитів за спектральними та енергетичними параметрами вейвлет-перетворення (ВП) сигналів АЕ.

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Цементний камінь (портландцемент ПЦ II/A-3-500, гіперпластифікатор Berament TB-1, вода)

Хімічний склад цементу

Мінеральний вміст	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO
Об'ємна частка, %	60,5	18,1	7,4	8,9	0,9	1,8

Склад цементного каменю

Цемент	68%
Вода	28%
Пластифікатор	4%

2. Базальтова фібра



довжина фібри 12 мм

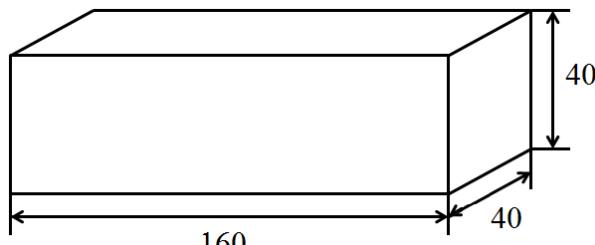
3. Поліпропіленова фібра



Механічні характеристики фібри

Назва фібри	ε_c	Густота, г/см ³	σ_B , МПа	E_f , ГПа
Базальтова	0,033	2,65	1200	110
Поліпропіленова	0,15	1,18	500	38

ЗРАЗКИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ



(a)



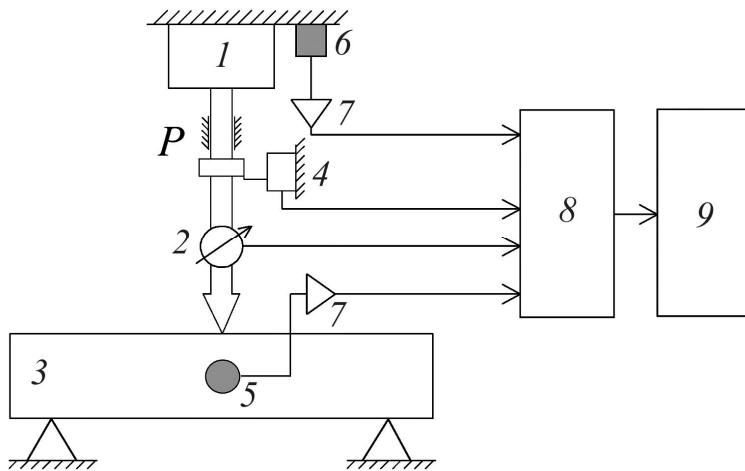
(б)

Геометрія зразка (а) та його загальний вигляд (б)

Класифікація зразків за об'ємною часткою фібри

Тип зразка	Вид армування	Об'ємна частка фібри v_f , %
I	Неармований цементний камінь	0
II	Армований базальтовою фібрвою	1
III	Армований поліпропіленовою фібрвою	1

Установка СВР5



1 – навантажувач ;

2 – динамометр;

3 – зразок;

4 – тензометр;

5, 6 – ПАЕ;

7 – попередні підсилювачі;

8 – SKOP-8M;

9 – комп’ютер

Швидкість навантаження 4×10^{-7} м/с

АЕ-вимірювальна система SKOP-8M



Режими відбору АЕ-інформації:

діаметр ПАЕ – 20 мм

смуга частот каналу відбору – 0,2 – 2,0 МГц

підсилення – 70 дБ

крок дискретизації сигналу – 0,25 мкс



Загальний вигляд ПАЕ
типу П-113

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛДЖЕНЬ

1. Побудова діаграм “навантаження P – прогин v ” (ділянка до падіння навантаження) та визначали розподіл АЕ-активності.
2. Оцінювання локальних особливостей сигналів АЕ за параметрами їх неперервного ВП (НВП) (максимальні амплітуда та частота, енергетичний параметр, тривалість випромінювання), ідентифікування типу руйнування.

Енергетичний параметр локального максимуму НВП сигналу АЕ:

$$E_{WT} = \int_{t_1}^{t_2} |WT(t)|^2 dt, \quad (1)$$

де $WT(t)$ – функція, яка описує проекцію НВП сигналу АЕ на площину “ $WT-t$ ”.

$$WT_a(t) = A + B \cdot e^{-0,5\left(\frac{t-C}{D}\right)^2}, \quad (2)$$

де A, B, C, D – коефіцієнти апроксимації. Skalskyi V., Stankevych O. Eng. Fract. Mech., 2018

$E_{WT} < 0,01$ - в'язке руйнування (пластична деформація)

$0,01 \leq E_{WT} < 0,1$ - в'язко-крихке руйнування (мікротріщиноутворення)

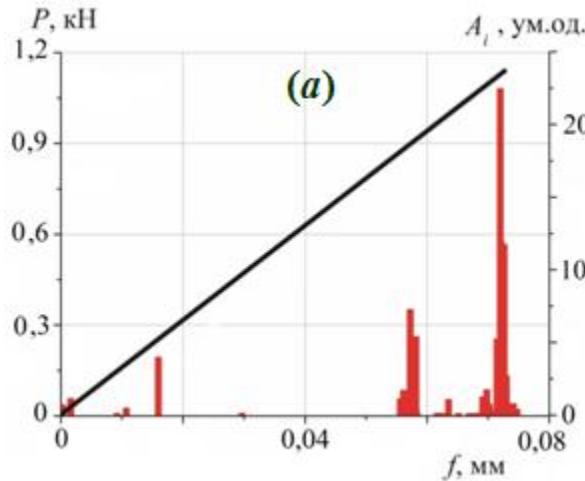
$E_{WT} \geq 0,1$ - крихке руйнування (зародження та розвиток макротріщини)

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

1. Акустичні властивості неармованого цементного каменю (тип I)

Механічні та АЕ властивості цементного каменю:

a – типова діаграма “навантаження – прогин” та розподіл амплітуд сигналів АЕ; кумулятивна сума амплітуд (*б*), максимальна амплітуда (*в*) та максимальна частота (*г*) сигналів АЕ залежно від часу



Граничне
навантаження
217...254 кг

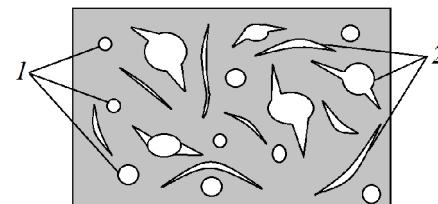
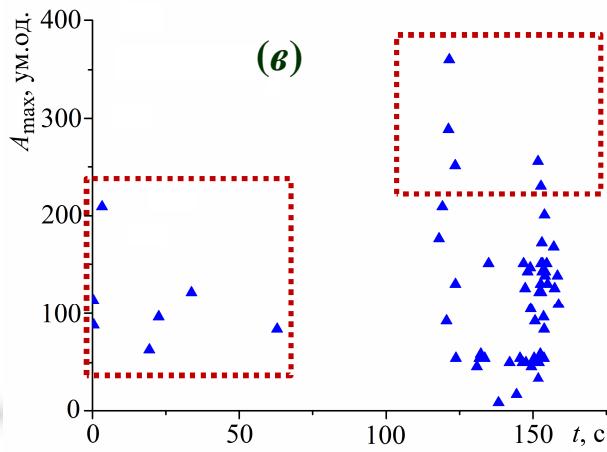
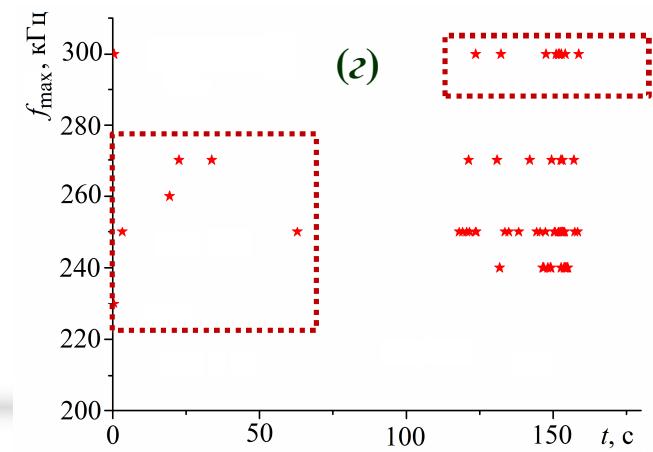
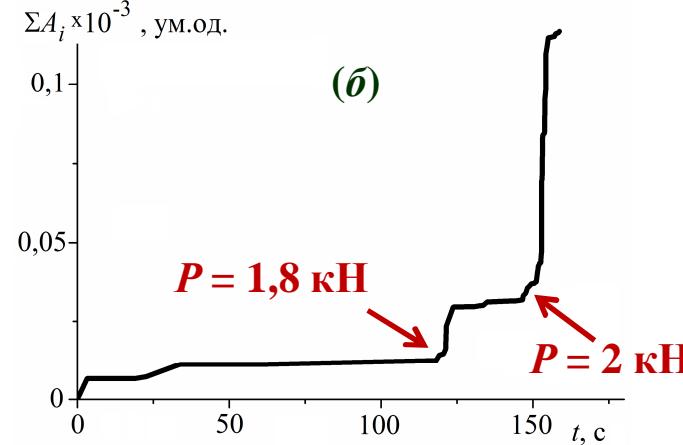
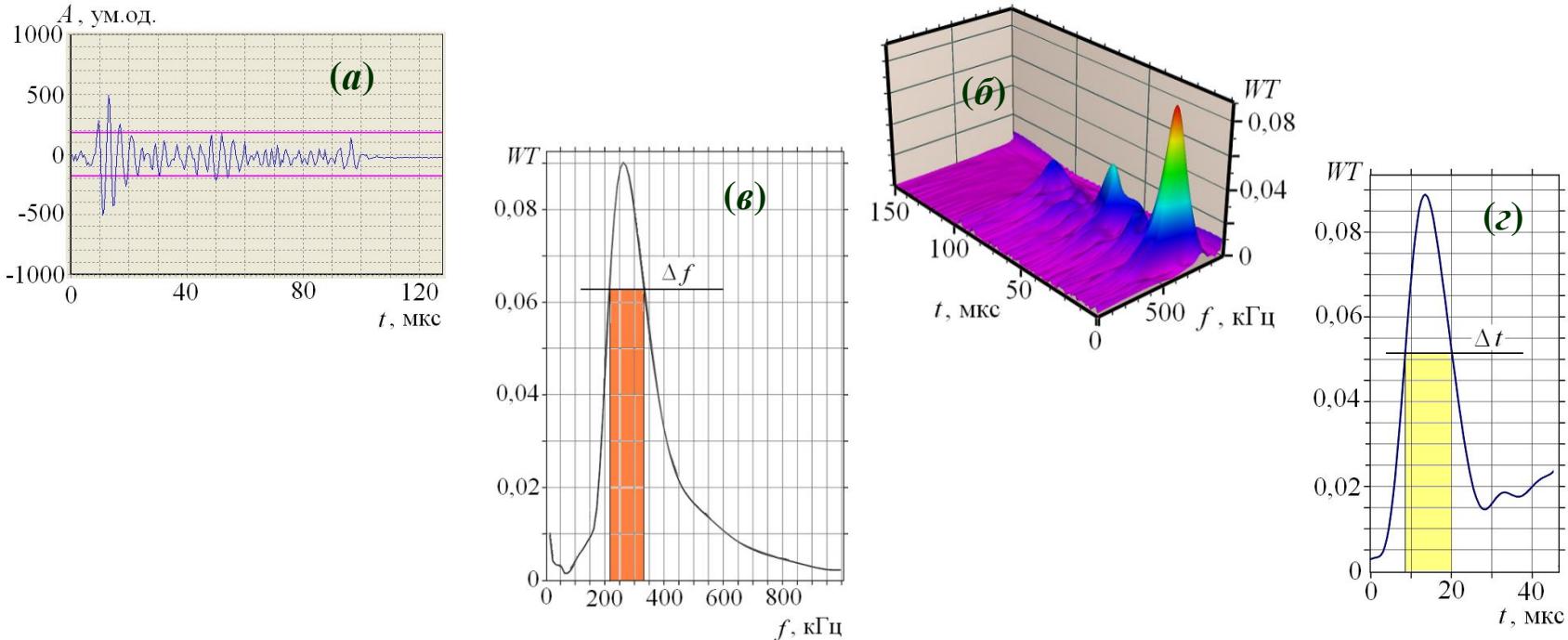


Схема неармованого
цементного каменю:
1 – пори; 2 – тріщини



Типовий сигнал АЕ під час навантаження неармованого цементного каменю:
***а* – хвильове відображення; *б* – 3D-зображення НВП сигналу; *в* – 2D-проекція НВП сигналу на площину “WT – f ”; *г* – 2D-проекція НВП сигналу на площину “WT – t ”)**



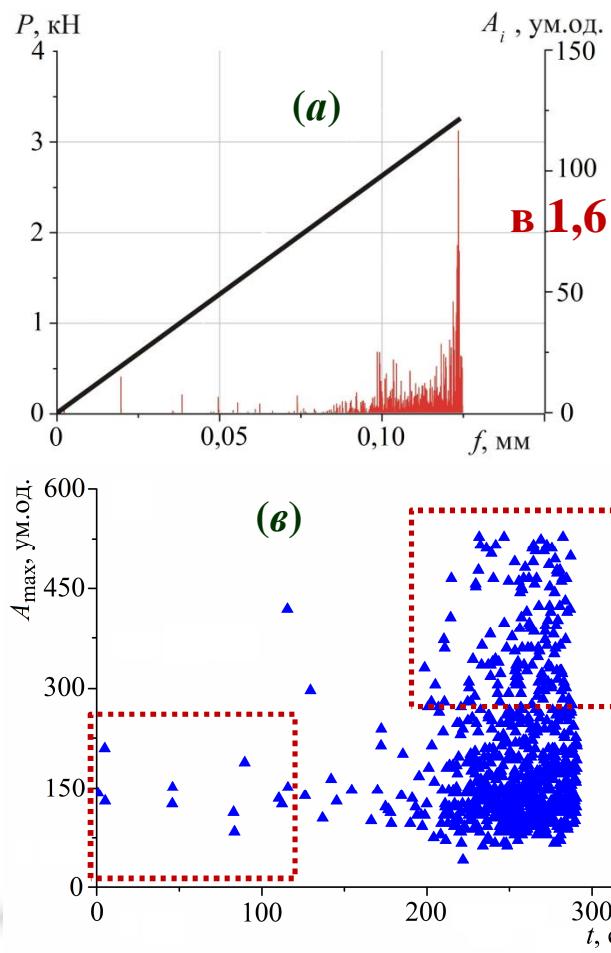
Параметри сигналів АЕ, які супроводжували ймовірні різні механізми руйнування зразка цементного каменю

Механізм руйнування	WT_{\max}	f_{\max} , кГц	Δt , мкс	E_{WT}
Мікророзтріскування	0,065...0,09	250...310	10...13	0,03...0,089
Поширення макротріщини	0,126...0,16	250...270	15...18	0,15...0,213

2. Дослідження цементного каменю, армованого базальтовою фіброю (тип II)

Механічні та АЕ властивості фібробетону з 1% базальтової фібри:

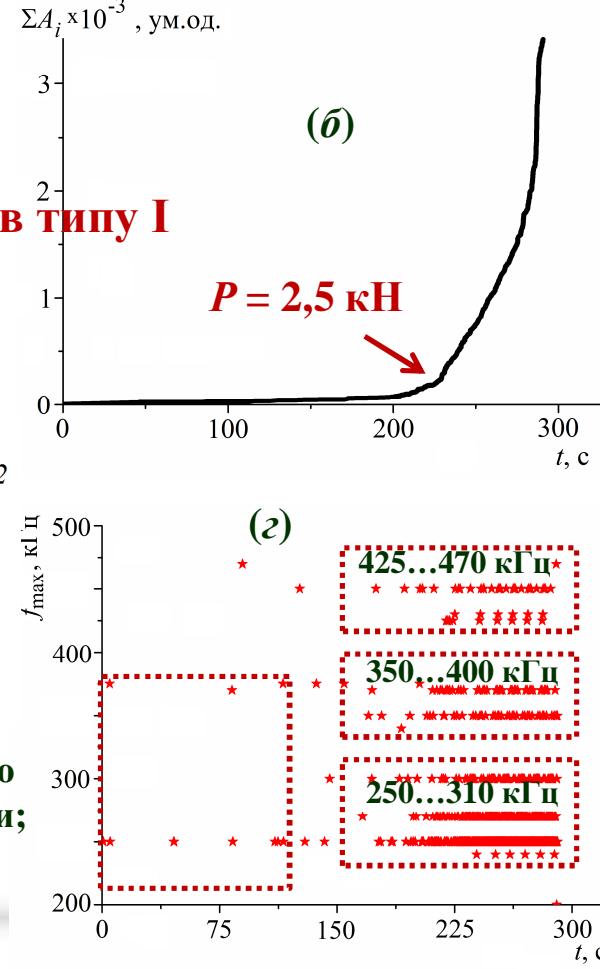
a – типова діаграма “навантаження – прогин” та розподіл амплітуд сигналів АЕ; кумулятивна сума амплітуд (*б*), максимальна частота (*в*) та максимальна амплітуда (*г*) сигналів АЕ залежно від часу



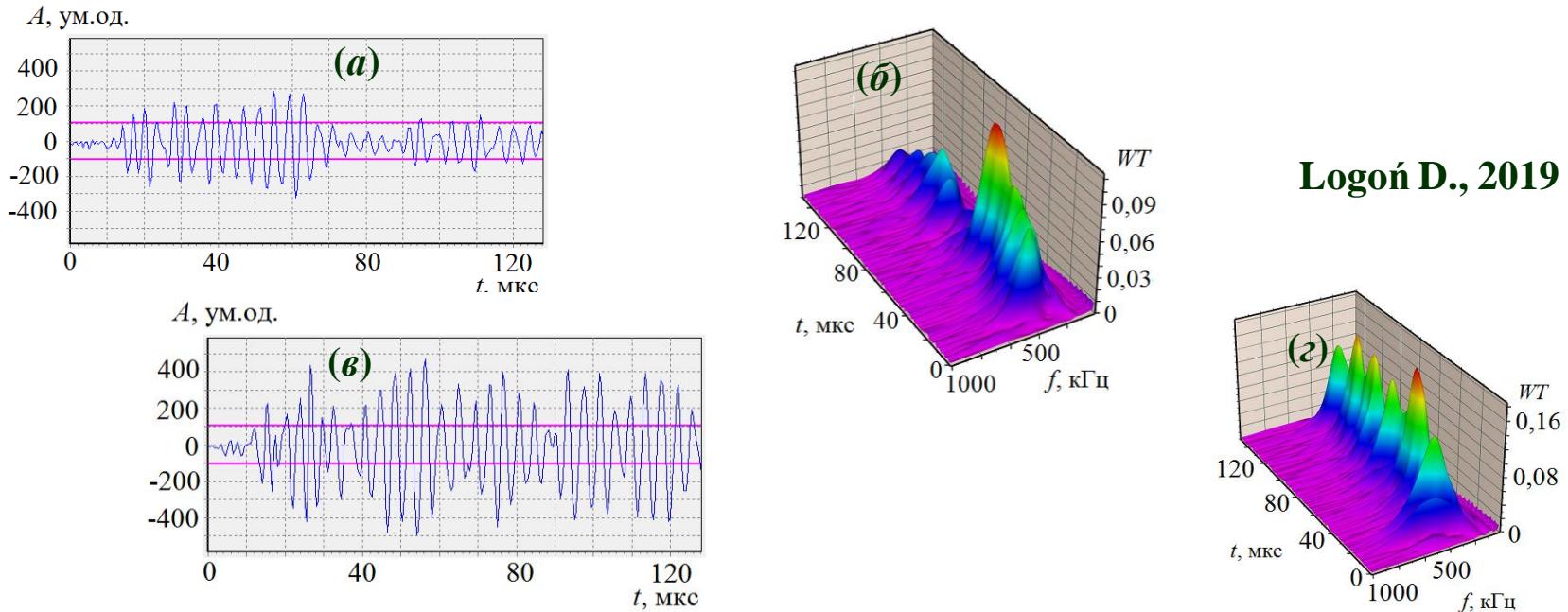
**Граничне
навантаження
358...400 кг**



Схема армованого цементного каменю: 1 – пори; 2 – тріщини;
3 – мікроволокна



Хвильові відображення типових сигналів АЕ (*a, b*) та їх НВП (*б, г*), які супроводжували різні типи руйнування: мікророзтріскування (*a, б*) та ріст макротріщини (*b, г*)



Logo D., 2019

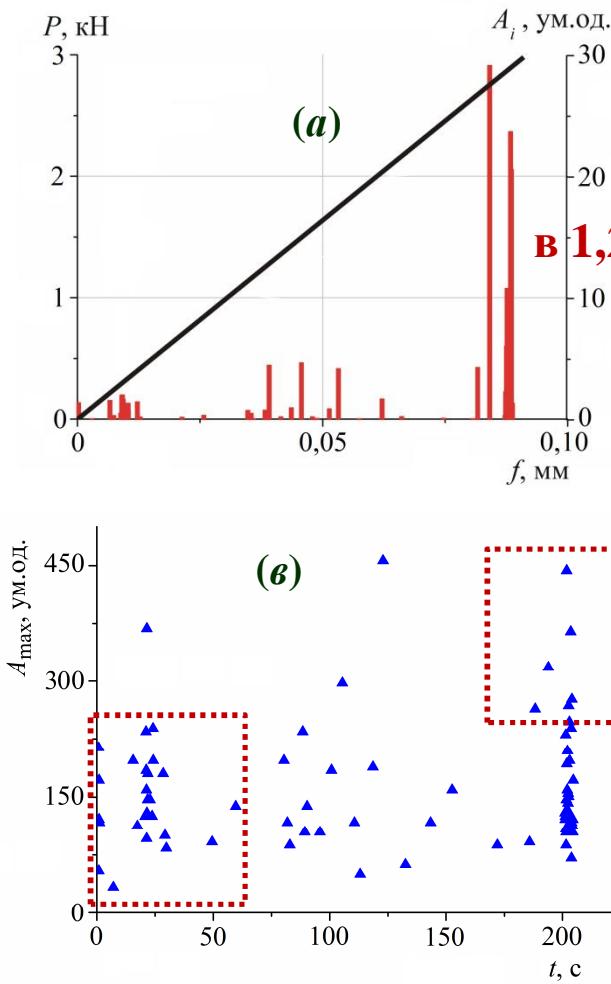
Параметри сигналів АЕ, які супроводжували ймовірні різні механізми руйнування зразка базальтового фіробетону

Механізм руйнування	f_{\max} , кГц	Δt , мкс	E_{WT}
Мікро-/макророзтріскування	250...310	15...25	0,019...0,5
Пластична деформація	350...400	5...9	0,005...0,0086
Руйнування/витягування волокна	425...470	8...10	0,015...0,11

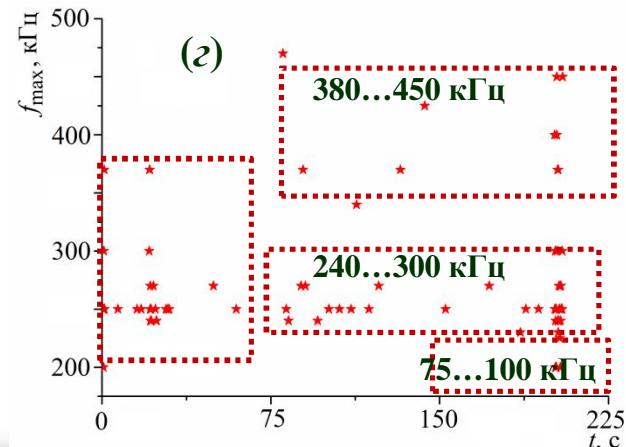
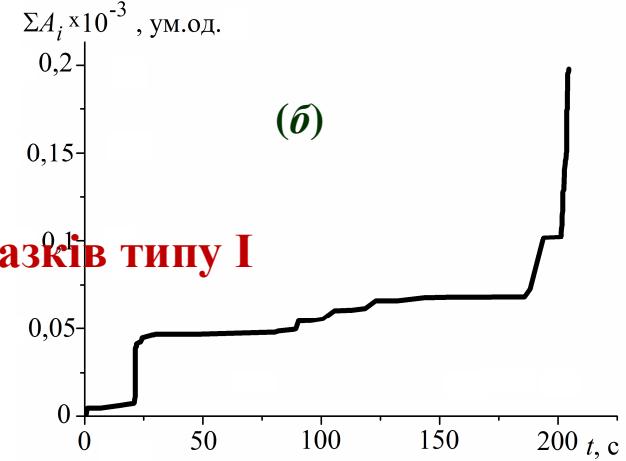
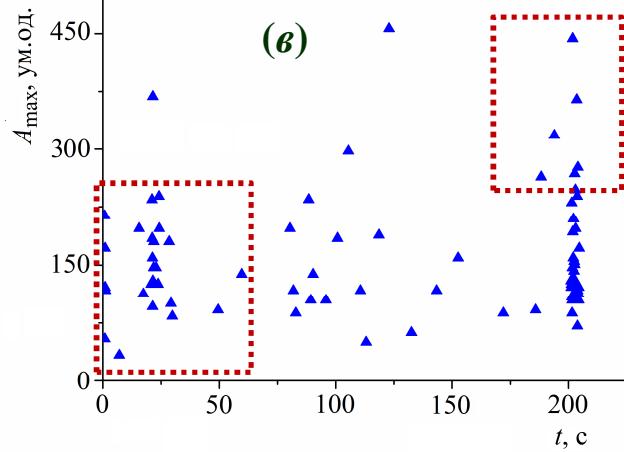
3. Дослідження поліпропіленового фібробетону (тип III)

Механічні та АЕ властивості фібробетону з 1% поліпропіленової фібри:

*a – типова діаграма “навантаження – прогин” та розподіл амплітуд сигналів АЕ; кумулятивна сума амплітуд (*б*), максимальна частота (*в*) та максимальна амплітуда (*г*) сигналів АЕ залежно від часу*



**Граничне
навантаження
280...320 кг
в 1,2 раза більше, ніж зразків типу I**



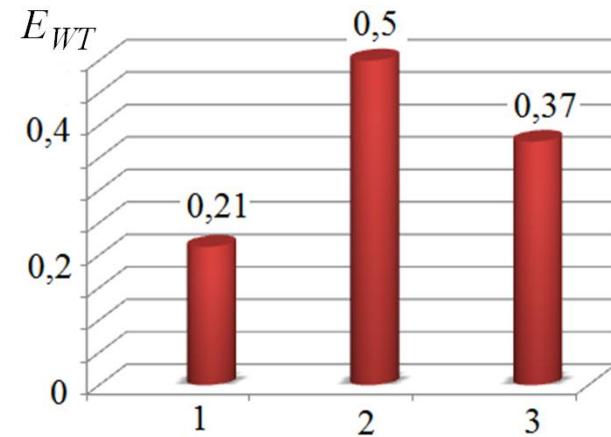
Параметри сигналів АЕ, які супроводжували різні механізми руйнування зразка поліпропіленового фіробетону

Механізм руйнування	f_{\max} , кГц	Δt , мкс	E_{WT}
Мікро-/маクロрозвідка	200...300	10...22	0,015...0,357
Пластична деформація	370...400	4...8	0,0036...0,007
Руйнування/витягування волокна	420...470	7...9	0,092...0,1

Середнє граничне навантаження неармованого цементного каменю та фіробетону



Середнє значення енергетичного показника E_{WT} сигналів АЕ під час руйнування неармованого цементного каменю та фіробетону



1 – неармований цементний камінь; 2 – базальтовий фіробетон; 3 – поліпропіленовий фіробетон

ВИСНОВКИ

- 1. Додавання фіброволокна до цементної матриці сприяє зростанню міцності матеріалу: для базальтового волокна в 1,6 рази, для поліпропіленового в 1,2 рази. Водночас базальтовий фібробетон має більшу міцність, ніж поліпропіленовий, що пов'язано з різними механічними та фізичними властивостями волокон.**
- 2. На акустичні властивості досліджуваних матеріалів впливає дефектність матриці та властивості різних типів фібри. Високоміцна базальтова фібра, яка має добру адгезію з цементною матрицею, краще стримує розвиток дефектів за малого навантаження, однак за досягнення його високих значень руйнування розвивається стрімко. Поліпропіленова фібра через її більшу деформативність забезпечує рівномірний розвиток руйнування, який пришвидшується уже з наближенням до граничного навантаження.**
- 3. Найбільшу енергію мали сигнали АЕ, які генерувались під час руйнування базальтового фібробетону.**
- 4. Запропоновано методику аналізу сигналів АЕ за їхніми спектральними та енергетичними параметрами, яка дала змогу створити критерій ідентифікування механізмів руйнування неармованих та армованих фіброволокнами композитів із цементною матрицею.**

Дякуємо за увагу!