

УДК 621.891:621.316

**С.Ф. Філоненко**, д.т.н., проф.

**О.П. Космач**, м.н.с

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна (fils01@mail.ru)

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ РУЙНУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ**

*Встановлені закономірності зміни часових параметрів формованих сигналів акустичної емісії в залежності від швидкості навантаження, неоднорідності фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу, а також геометричних розмірів його елементів. Проведено опис отриманих залежностей з їх статистичними оцінками.*

### **Постановка проблеми**

Композиційні матеріали (КМ) мають широке використання в різних видах техніки завдяки своїм високим фізико-механічним властивостям - зносостійкість, жароміцність, теплостійкість тощо. Одним з напрямів забезпечення надійності виробів з КМ, якому приділяється значна увага, є застосування та розробка методів контролю та діагностики їх стану. Це обумовлено специфікою будови КМ і специфікою їх руйнування.

При дослідженні руйнування КМ використовують традиційні методи, а також методи, які мають високу чутливість до процесів, що розвиваються в структурі матеріалів при їх навантаженні. Одним з таких методів дослідження, контролю та діагностики стану виробів з КМ, який набуває все більшого застосування, є метод акустичної емісії (АЕ). У той же час, значні складнощі в інтерпретації АЕ інформації, що реєструється, приводять до складнощів практичного застосування методів АЕ контролю та діагностики. У даному аспекті, важливе значення набувають теоретичні дослідження процесів акустичного випромінювання, які безпосередньо пов'язані з дослідженнями процесів руйнування КМ. Такі дослідження повинні бути спрямовані на визначення факторів, що впливають на кінетику процесу руйнування КМ, а також формовані сигнали АЕ. Це, у свою чергу, надасть можливість визначати інформативність параметрів сигналів АЕ, визначати закономірності їх зміни, тобто отримувати інформацію, що є основою у розробці методів та критеріїв оцінки стану виробів із КМ.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

За останні десятиріччя, однією з найпоширеніших концепцій, що використовується при дослідженнях процесів руйнування КМ є концепція FBM (fibre bundle model). Згідно даної концепції, руйнування КМ представляється у вигляді руйнування його елементів або пучка волокон [1–4]. При цьому руйнування КМ з використанням концепції FBM досліджується у двох напрямках. Перший напрямок, пов'язаний з дослідженням пошкоджуваності КМ. У відповідності до даного напрямку, руйнування КМ при його навантаженні розглядається як процес неперервного накопичення пошкоджень. При цьому аналізується параметр пошкоджуваності, який характеризує відхилення характеристик пружності від їх початкових значень, тобто розглядається міра пошкоджуваності матеріалу в цілому. Другий напрямок, пов'язаний з дослідженням закономірностей руйнування елементів КМ, при умові безперервності його протікання, з урахуванням перерозподілу напружень на елементи, що залишаються [1–4]. При цьому вважається, що основне навантаження витримують елементи КМ, а руйнування КМ відбувається за рахунок руйнування його елементів.

При проведенні таких досліджень використовують і метод АЕ. Однак теоретичні дослідження процесів руйнування КМ з використанням методу АЕ, які проведені у ряді робіт [5, 6], не дозволили отримати математичний опис сигналу АЕ. Це було пов'язано

з існуванням невизначеності отриманих функцій у момент часу повного руйнування КМ.

В роботах [7, 8] отримано аналітичний вираз для сигналу АЕ, який формується при руйнуванні елементів КМ поперечною силою. При побудові моделі сигналу АЕ враховані закономірності зміни еквівалентного осьового напруження, яке описує макроскопічну поведінку КМ при розвитку процесу руйнування КМ його елементів, за умови [0, 1] рівномірного розподілу щільності ймовірності елементів за міцністю. При цьому враховано і кінетика розвитку процесу руйнування елементів КМ. Згідно отриманих результатів, математичний вираз, який описує формований сигнал АЕ  $U(t)$  у часі при руйнуванні елементів КМ поперечною силою, представлено у вигляді

$$\begin{aligned}
 U(t) = & U_0 v_0 [\alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1 - \alpha t_0)(1 - g\sqrt{\alpha t_0})] \times \\
 & \times e^{r[\alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1 - \alpha t_0)(1 - g\sqrt{\alpha t_0})]} \times \\
 & - v_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1 - \alpha t_0)(1 - g\sqrt{\alpha t_0})]} dt \\
 & \times e^{-rt_0}
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $U_0 = N_0 \beta \delta_s$  – максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні КМ, який складається з  $N_0$  елементів;  $v_0, r$  – параметри, які залежать від фізико-механічних характеристик КМ;  $\alpha$  – швидкість навантаження КМ поперечною силою;  $t, t_0$  – відповідно, поточний час та час початку руйнування елементів КМ;  $g$  – параметр, який залежить від геометричних розмірів елементів КМ;  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності між амплітудою одиночного збурення, яке виникає при руйнуванні одиночного елемента, та напруженням руйнування;  $\delta_s$  – параметр, чисельне значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення.

Згідно виразу (1), закономірності зміни параметрів формованого сигналу АЕ залежать від чинників, які пов'язані з умовами навантаження КМ, геометричними розмірами його елементів та їх фізико-механічними характеристиками. Безумовно, що визначення впливу даних чинників на формовані сигнали АЕ і закономірності зміни їх параметрів є важливим, з точки зору, розробки методів контролю та діагностики стану виробів із КМ.

### Формулювання мети статті

В роботі буде проведено моделювання формованих сигналів АЕ з визначенням їх часових параметрів в залежності від дії різних чинників, в умовах руйнування КМ поперечною силою. Буде проведено аналіз часових параметрів формованих сигналів АЕ з отриманням закономірностей їх зміни при зміні факторів, що впливають. Також буде проведено математичний опис отриманих закономірностей зміни часових параметрів сигналів АЕ та визначено їх статистичні характеристики.

### Результати досліджень

При проведенні досліджень сигналів АЕ в роботах [7, 8, 9], було показано, що при навантаженні КМ поперечною силою неперервності процесу руйнування його елементів відповідає неперервність формованого сигналу АЕ. При цьому сигнал АЕ представляє собою відео імпульс, який характеризується стрімким наростанням переднього фронту та релаксаційним падінням амплітуди його заднього фронту. Результати моделювання такого процесу руйнування КМ у вигляді графіку формованого сигналу АЕ  $\tilde{U}(t) = U(t)/U_0$  у відносних одиницях показано на рис. 1. При

проведенні розрахунків всі параметри, що входять у вираз (1), приведені до безрозмірних величин, а час представлено у нормованих одиницях. При моделюванні швидкість навантаження КМ  $\tilde{\alpha}$  у відносних одиницях була прийнята рівною  $\tilde{\alpha}=100$ . Час початку руйнування елементів КМ складав  $\tilde{t}_0=0,001$  у відносних одиницях. Граничне напруження руйнування у відносних одиницях, яке відповідає часу  $\tilde{t}_0$  початку руйнування елементів КМ, розраховувалося згідно методики, яку розглянуто у роботах [8, 9]. Розрахунки проводилися за виразом, що описує зміну еквівалентних напружень у КМ при його навантаженні поперечною силою з постійною швидкістю. Для прийнятого часу  $\tilde{t}_0$  початку руйнування елементів КМ граничне напруження руйнування становило  $\tilde{\sigma}_0 \approx 0,087$ . При моделюванні також було прийнято, що значення параметрів  $v_0$ ,  $r$  і  $g$  у відносних одиницях мали величини:  $\tilde{v}_0=1000000$ ,  $\tilde{r}=10000$ ,  $\tilde{g}=0,1$ .

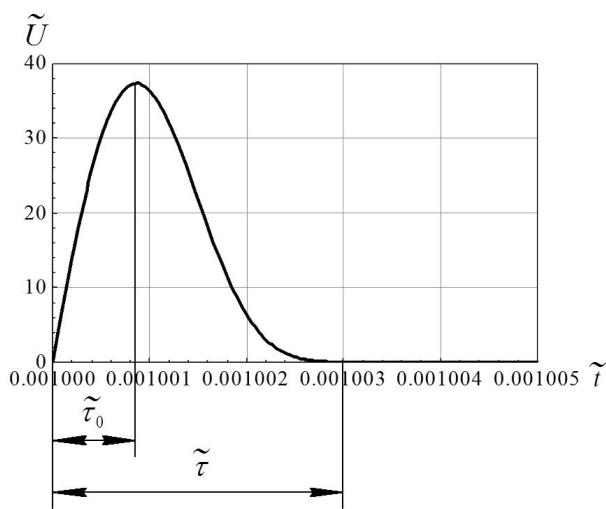


Рис. 1. Часові параметри сигналу акустичної емісії, який формується при руйнуванні елементів композиційного матеріалу поперечною силою. Значення параметрів моделювання:  $\tilde{\alpha}=100$ ;  $\tilde{\sigma}_0 \approx 0,087$ ;  $\tilde{g}=0,1$ ;  $\tilde{t}_0=0,001$ ;  $\tilde{v}_0=1000000$ ;  $\tilde{r}=10000$

З отриманих результатів (рис. 1) видно, що формований сигнал АЕ є відео імпульсом. Такий відео імпульс можна характеризувати часовими параметрами (рис. 1), а саме: тривалістю переднього фронту  $\tau_0$ , а також тривалістю  $\tau$ . Безумовно, що зміна параметрів, які входять до виразу (1), буде впливати на закономірності зміни процесу руйнування КМ, а також на часові параметри  $\tau_0$  і  $\tau$  формованих сигналів АЕ.

Згідно виразу (1), до таких параметрів відносять швидкість прикладення навантаження  $\alpha$ , неоднорідність фізико-механічних характеристик КМ за міцністю або дисперсність його властивостей, яка характеризується параметром  $r$ , а також геометричні розміри елементів КМ, які характеризуються параметром  $g$ . Проведемо дослідження впливу даних характеристик на закономірності зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ.

Методика досліджень складалася з двох етапів. На першому етапі, для початкових прийнятих умов моделювання, згідно виразу (1), проводяться розрахунки формованого сигналу АЕ. За результатами розрахунків, згідно отриманих табличних даних, проводиться визначення часових параметрів формованого сигналу АЕ в залежності від значення параметру, що впливає. Оскільки задній фронт формованих сигналів АЕ має релаксаційний характер падіння з поступовим асимптотичним наближенням до нуля, то визначення тривалості формованих сигналів АЕ будемо проводити, згідно [10], за виразу  $\tilde{\tau}_m = m \tilde{\tau}_{m0}$ , де  $m$  – деяке ціле число;  $\tilde{\tau}_{m0}$  – тривалість переднього фронту формованого сигналу. Тривалість  $\tilde{\tau}_{m0}$  переднього фронту сигналів АЕ визначається за табличними даними, згідно результатів моделювання сигналів АЕ, а значення  $m$  визначається виходячи з умови  $\tilde{U}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_m) \ll \tilde{U}_{\max}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_{m0})$ , де  $\tilde{U}_{\max}$  – максимальна амплітуда формованого сигналу АЕ. При проведенні розрахунків для визначення

тривалості сигналів АЕ співвідношення амплітуд приймемо рівним

$$\frac{\tilde{U}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_m)}{\tilde{U}_{\max}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_{m0})} \leq 0,001.$$

На другому етапі, за результатами визначених часових параметрів формованих сигналів АЕ будуються залежності їх зміни при дії різних факторів з відповідним математичним описом і наступним статистичним аналізом.

При дослідженні впливу швидкості навантаження на часові параметри формованих сигналів АЕ будемо вважати, що розглядається один і той же КМ, тобто матеріал, у якому однакові геометричні розміри його елементів, а також однакові фізико-механічні характеристики. При дослідженні впливу фізико-механічних характеристик КМ на часові параметри формованих сигналів АЕ будемо вважати, що розглядається КМ, у якому однакові геометричні розміри його елементів і він навантажується з однаковою постійною швидкістю. При дослідженні впливу геометричних розмірів елементів КМ на часові параметри формованих сигналів АЕ будемо вважати, що розглядається КМ, у якому однакові фізико-механічні характеристики і він навантажується з однаковою постійною швидкістю.

Швидкість прикладення навантаження впливає на швидкість зміни еквівалентних напружень і обумовлює зміну швидкості розвитку процесу руйнування КМ, що розглянуто у роботах [8, 9]. Це впливає із розрахунків залежностей зміни кількості елементів, що залишаються, при руйнуванні КМ поперечною силою, згідно моделі руйнування КМ, яка розглянута у роботі [8]. В [9] представлені результати моделювання сигналів АЕ в часі у відносних величинах для швидкостей навантаження  $\tilde{\alpha}$ , значення яких змінювалися у діапазоні величини від 100 до 500 із кроком прирощування  $\Delta\tilde{\alpha}=50$ . При цьому значення параметрів  $\tilde{\sigma}_0$ ,  $\tilde{\nu}_0$ ,  $\tilde{r}$  і  $\tilde{g}=0,1$  були прийняті рівними:  $\tilde{\sigma}_0 \approx 0,087$ ;  $\tilde{\nu}_0 = 1000000$ ;  $\tilde{r} = 10000$ ;  $\tilde{g} = 0,1$ . За результатами виконаних розрахунків, проведено визначення часових параметрів формованих сигналів АЕ для кожного прийнятого значення швидкості навантаження з побудовою закономірностей їх зміни. Залежності зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ від швидкості навантаження у відносних величинах показано на рис. 2.

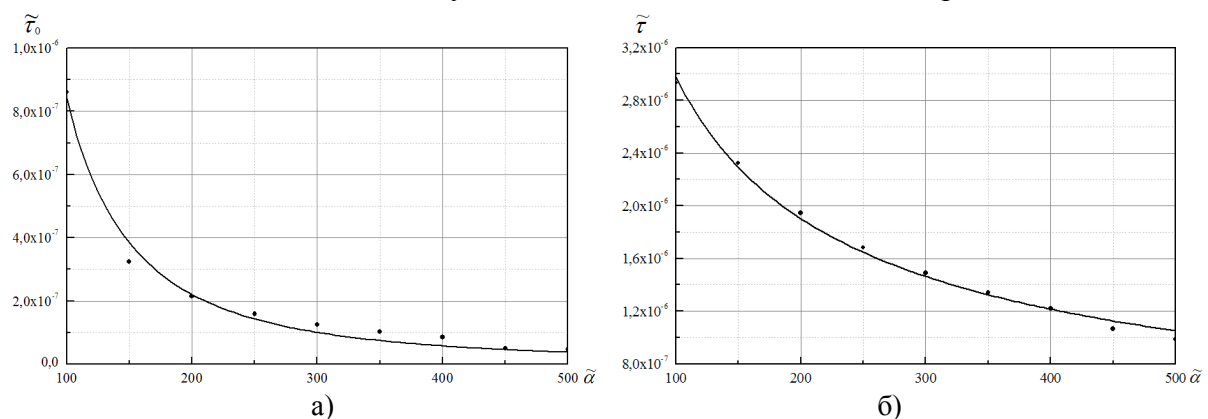


Рис. 2. Графіки зміни тривалості переднього фронту  $\tilde{\tau}_0$  (а) та тривалості  $\tilde{\tau}$  (б) сигналів акустичної емісії в залежності від швидкості  $\tilde{\alpha}$  навантаження композиційного матеріалу поперечною силою. Швидкості навантаження  $\tilde{\alpha}$  знаходяться в межах  $\tilde{\alpha} = 100 \dots 500$  з прирощенням  $\Delta\tilde{\alpha} = 50$ .  $\tilde{g} = 0,1$ ,

$$\tilde{\sigma}_0 \approx 0,087, \tilde{\nu}_0 = 1000000, \tilde{r} = 10000$$

З рис.2 видно, що при зростанні швидкості навантаження КМ поперечною силою спостерігається зменшення тривалості переднього та тривалості сигналів АЕ. Таке зменшення тривалості переднього та тривалості сигналів АЕ відбувається за не

лінійним законом. Обробка отриманих результатів показала, що при зростанні  $\tilde{\alpha}$  у 5 разів, тобто зі 100 до 500, тривалість переднього фронту формованих сигналів АЕ зменшується у 18,37 рази, а їх тривалість зменшується у 2,97 рази. Зменшення часових параметрів формованих сигналів АЕ свідчить про збільшення швидкості розвитку процесу руйнування елементів КМ.

Аналіз закономірностей зміни тривалості переднього та тривалості формованих сигналів АЕ при зростанні швидкості навантаження (рис. 2) показав, що вони добре описуються степеневою функцією виду

$$P_{\tau} = g\tilde{\alpha}^{\theta}, \quad (2)$$

де  $P_{\tau}$  - аналізований часовий параметр формованих сигналів АЕ (тривалість переднього фронту або тривалість формованих сигналів АЕ);  $g, \theta$  - коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Обробка отриманих результатів показала, що коефіцієнти  $g, \theta$  апроксимуючого виразу (2) мають наступні значення: для тривалості переднього фронту  $\tilde{\tau}_0$  формованих сигналів АЕ (рис. 2, а) -  $g=0,00617$ ,  $\theta=-1,93251$ ; для тривалості  $\tilde{\tau}$  формованих сигналів АЕ (рис. 2, б) -  $g=5,86919 \cdot 10^{-5}$ ,  $\theta=-0,64714$ . Статистичний аналіз даних показав, що достовірність опису отриманих залежностей зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ при зростанні швидкості навантаження апроксимуючим виразом (2) за мірою імовірності становить: для тривалості переднього фронту формованих сигналів АЕ -  $p=0,993$ ; для тривалості формованих сигналів АЕ -  $p=0,997$ .

Проведемо дослідження впливу неоднорідності фізико-механічних властивостей КМ на часові параметри формованих сигналів АЕ при його руйнуванні поперечною силою. Неоднорідність КМ за своїми фізико-механічними властивостями, як показали результати досліджень [8, 9], впливає на швидкість розвитку процесу його руйнування. Параметром, який пов'язаний з неоднорідністю фізико-механічних властивостей КМ, є параметр  $r$ . Збільшення значення параметру  $r$  у виразі (1) означає зменшення неоднорідності КМ за своїми фізико-механічними властивостями.

Визначимо закономірності зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ при зміні неоднорідності КМ за своїми фізико-механічними властивостями. При проведенні моделювання сигналів АЕ у відносних величинах значення параметру  $\tilde{r}$  у відносних одиницях будемо змінювати у діапазоні від 10000 до 20000 із кроком прирощування  $\Delta\tilde{r}=1000$ . При цьому будемо вважати, що навантаження КМ поперечною силою відбувається з постійною швидкістю. Її значення буде дорівнювати  $\tilde{\alpha}=\text{const}=100$ . При розрахунках параметри  $\tilde{\sigma}_0$ ,  $\tilde{\nu}_0$  та  $\tilde{g}$  приймемо такими ж, як і раніше, тобто:

$\tilde{\sigma}_0 \approx 0,087$ ;  $\tilde{\nu}_0 = 1000000$ ;  $\tilde{g} = 0,1$ . За результатами проведених розрахунків проведемо визначення часових параметрів формованих сигналів АЕ для кожного значення  $\tilde{r}$  з побудовою закономірностей їх зміни. Залежності зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ від неоднорідності КМ за своїми фізико-механічними властивостями у відносних величинах показано на рис. 3.

Отримані результати показують (рис. 3), що при зменшенні неоднорідності КМ (збільшенні значень параметру  $\tilde{r}$ ) також спостерігається нелінійне зменшення часових параметрів формованих сигналів АЕ. При цьому із зростанні  $\tilde{\alpha}$  у 5 разів, тобто зі 100 до 500, тривалість переднього фронту формованих сигналів АЕ зменшується у 1,21 рази, а тривалість формованого сигналу АЕ в 1,55 рази. Таке зменшення часових параметрів формованих сигналів АЕ зв'язане із зменшення часу протікання процесу руйнування елементів КМ при заданій швидкості його навантаження.

Аналіз закономірностей зміни тривалості переднього та тривалості формованих сигналів АЕ при зростанні параметру  $\tilde{r}$  (рис. 3) показав, що вони добре описуються степеневою функцією виду

$$T_{\tau} = \beta \tilde{r}^{\gamma}, \quad (3)$$

де  $T_{\tau}$  - аналізований часовий параметр формованих сигналів АЕ (тривалість переднього фронту або тривалість формованих сигналів АЕ);  $\beta, \gamma$  - коефіцієнти апроксимуючого виразу.

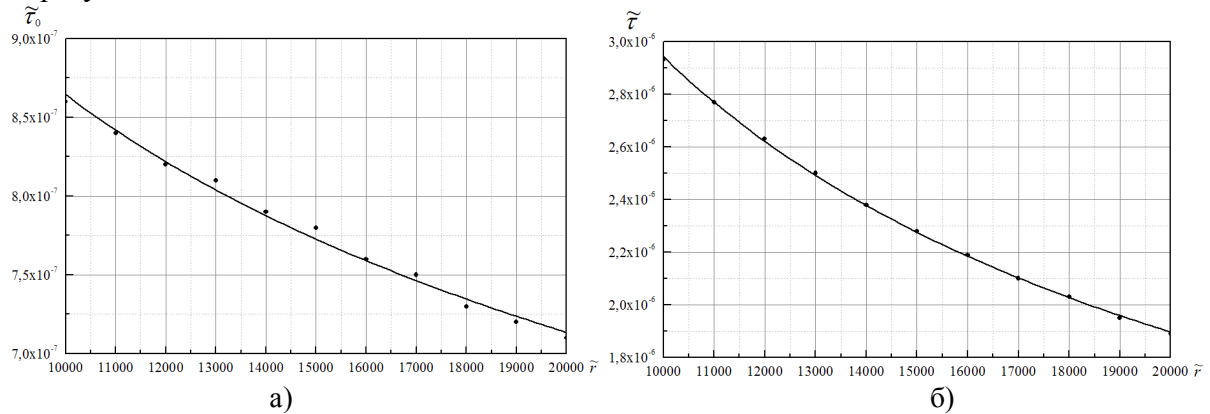


Рис. 3. Графіки зміни тривалості переднього фронту  $\tilde{\tau}_0$  (а) і тривалості  $\tilde{\tau}$  (б) формованих сигналів акустичної емісії в залежності від неоднорідності властивостей композиційного матеріалу за міцністю (параметру  $\tilde{r}$ ).  $\tilde{\alpha} = 100$ ,  $\tilde{g} = 0,1$ ,  $\tilde{\sigma}_0 \approx 0,087$ ,  $\tilde{v}_0 = 1000000$ . Значення параметра  $\tilde{r}$  знаходяться в межах  $\tilde{r} = 10000 \dots 20000$  з припущенням  $\Delta\tilde{r} = 1000$

Обробка отриманих результатів показала, що коефіцієнти  $\beta, \gamma$  апроксимуючого виразу (3) мають наступні значення: для тривалості переднього фронту  $\tilde{\tau}_0$  формованих сигналів АЕ (рис. 3, а) -  $\beta = 1,10662 \cdot 10^{-5}$ ,  $\gamma = -0,27681$ ; для тривалості  $\tilde{\tau}$  формованих сигналів АЕ (рис. 3, б) -  $\beta = 0,00101$ ,  $\gamma = -0,63362$ . Статистичний аналіз даних показав, що достовірність опису отриманих залежностей зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ при зменшенні неоднорідності фізико-механічних властивостей КМ апроксимуючим виразом (3) за мірою імовірності становить: для тривалості переднього фронту формованих сигналів АЕ -  $r = 0,996$ ; для тривалості формованих сигналів АЕ -  $r = 0,999$ .

Збільшення геометричних розмірів елементів КМ також впливають на характер його руйнування. Як відмічено у роботах [8, 9], такий вплив аналогічний впливу зменшення швидкості навантаження КМ. При моделюванні сигналів АЕ будемо вважати, що час початку руйнування є не змінною величиною. За таких умов, при зміні геометричних розмірів елементів КМ, тобто зростанні параметру  $\tilde{g}$ , згідно розрахунків еквівалентних напружень [8, 9], буде відбуватися зменшення граничного напруження руйнування, тобто напруження початку руйнування елементів КМ. При проведенні розрахунків приймемо, що швидкість навантаження КМ є постійною величиною і дорівнює  $\tilde{\alpha} = \text{const} = 100$ . Значення параметрів  $\tilde{v}_0$  і  $\tilde{r}$  приймемо рівними:  $\tilde{v}_0 = 1000000$ ;  $\tilde{r} = 10000$ . Значення параметра  $\tilde{g}$  будемо змінювати у діапазоні величини від 0,1 до 0,4 із кроком припущування  $\Delta\tilde{g} = 0,05$ . При такому зростанні параметру  $\tilde{g}$ , як показали розрахунки еквівалентних напружень, граничне напруження руйнування  $\tilde{\sigma}_0$  буде зменшуватися у діапазоні величин від 0,087 до 0,078.

За результатами проведених розрахунків, проведемо визначення часових параметрів формованих сигналів АЕ для кожного значення параметра  $\tilde{g}$  з побудовою

закономірностей їх зміни. Залежності зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ від геометричних розмірів елементів КМ (значень параметра  $\tilde{g}$ ) у відносних величинах показано на рис. 4.

З рис.4 видно, що при збільшенні геометричних розмірів елементів КМ (збільшенні значень параметра  $\tilde{g}$ ) спостерігається лінійне зростання тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ. При цьому із зростанням параметру  $\tilde{g}$  у чотири рази, тобто із 0,1 до 0,4, тривалість переднього фронту формованих сигналів АЕ зростає в 1,03 рази, а їх тривалість зростає у 1,105 рази. Зростання тривалості переднього фронту і тривалості формованих сигналів АЕ при зростанні параметру  $\tilde{g}$  свідчить про зменшення швидкості розвитку процесу руйнування елементів КМ.

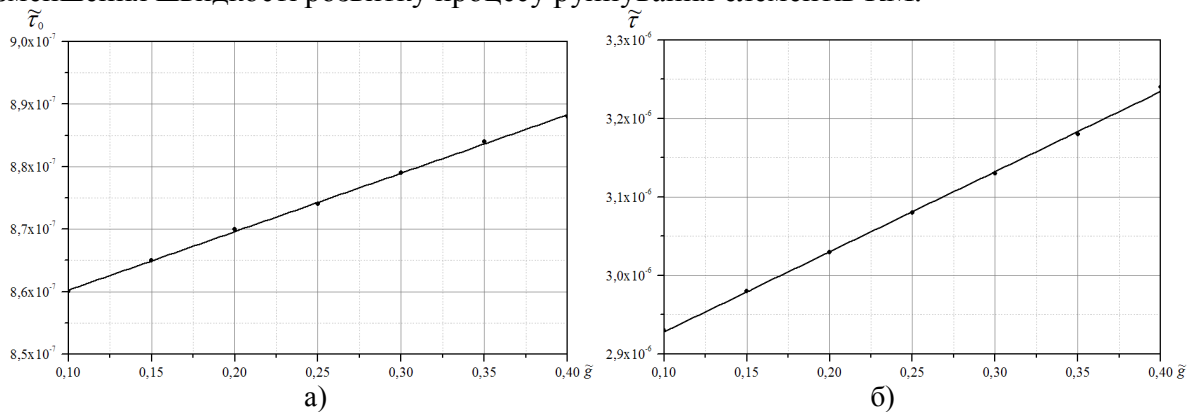


Рис. 4. Графіки зміни тривалості переднього фронту  $\tilde{\tau}_0$  (а) і тривалості  $\tilde{\tau}$  (б) сигналів акустичної емісії в залежності від геометричних розмірів елементів композиційного матеріалу (параметру  $\tilde{g}$ ).

$\tilde{\alpha} = 100$ ,  $\tilde{\nu}_0 = 1000000$ ,  $\tilde{r} = 10000$ . Значення параметра  $\tilde{g}$  знаходяться в межах  $\tilde{g} = 0,1 \dots 0,4$  з припущенням  $\Delta\tilde{g} = 0,05$ . Значення  $\tilde{\sigma}_0$  знаходяться в межах  $\Delta\tilde{\sigma}_0 = 0,078 \dots 0,087$ . Час початку руйнування елементів  $\tilde{t}_0 = 0,001$

Аналіз закономірностей зміни тривалості переднього та тривалості формованих сигналів АЕ при зростанні геометричних розмірів елементів КМ (рис. 4) показав, що вони добре описуються лінійною функцією виду

$$D_\tau = a + b\tilde{g}, \quad (4)$$

де  $D_\tau$  - аналізований часовий параметр формованих сигналів АЕ (тривалість переднього фронту або тривалість формованих сигналів АЕ);  $a, b$  - коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Обробка отриманих результатів показала, що коефіцієнти  $a, b$  апроксимуючого виразу (4) мають наступні значення: для тривалості переднього фронту  $\tilde{\tau}_0$  формованих сигналів АЕ (рис. 4, а) -  $a = 8,50893 \cdot 10^{-7}$ ,  $b = 9,35714 \cdot 10^{-8}$ ; для тривалості  $\tilde{\tau}$  формованих сигналів АЕ (рис. 4, б) -  $a = 2,826 \cdot 10^{-6}$ ,  $b = 1,02143 \cdot 10^{-6}$ . Статистичний аналіз даних показав, що достовірність опису отриманих залежностей зміни часових параметрів формованих сигналів АЕ при зростанні геометричних розмірів елементів КМ апроксимуючим виразом (4) за мірою імовірності становить: для тривалості переднього фронту формованих сигналів АЕ -  $p = 0,999$ ; для тривалості формованих сигналів АЕ -  $p = 0,999$ .

Отримані результати показали, що найбільший вплив на зміну часових параметрів формованих сигналів АЕ (тривалості і тривалості переднього фронту) при руйнуванні КМ поперечною силою має швидкість навантаження. При цьому найменший вплив спостерігається від зміни геометричних розмірів елементів КМ.

## Висновки

Результати проведених досліджень показали, що зміна швидкості навантаження, неоднорідності за фізико-механічними характеристиками, а також геометричних розмірів елементів впливає на розвиток процесу руйнування КМ, а також часові параметри формованих сигналів АЕ.

Встановлено, що при зростанні швидкості навантаження на КМ поперечною силою відбувається зменшення тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ. Таке зменшення часових параметрів формованих сигналів АЕ відбувається за нелінійним законом. Зменшення неоднорідності КМ також приводить до не лінійного зменшення часових параметрів формованих сигналів АЕ. В обох випадках зменшення тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ добре описуються степеневими функціями. В той же час, збільшення геометричних розмірів елементів КМ приводить до зростання тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ. Таке зростання тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ, як показує обробка результатів моделювання, відбувається за лінійним законом. Проведені дослідження також показали, що найбільший вплив на зміну часових параметрів формованих сигналів АЕ (тривалості переднього фронту та тривалості) при руйнуванні КМ поперечною силою має швидкість навантаження, а найменший вплив - зміна геометричних розмірів елементів КМ.

У той же час інтерес представляє визначення закономірностей зміни накопичення енергії формованих сигналів АЕ в часі при зміні факторів, які впливають на розвиток процесу руйнування елементів КМ.

## Список літературних джерел

1. Hemmer P. C. The Distribution of Simultaneous Fiber Failures in Fiber Bundles/ P. C. Hemmer, A. Hansen //J. Appl. Mech. – 1992. –vol.59. –№4. – P.909–914.
2. Kun F. Extensions of Fibre Bundle Models/F. Kun, F. Raischel, R.C. Hidalgo, H.J. Herrmann //Modelling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience. Lecture Notes in Physics–2007.–vol.705.–P.57–92.
3. Pradhan S. Energy bursts in fiber bundle models of composite materials /S. Pradhan, C. Hemmer //Phys. Rev. E.–2008.–vol. 77.–№1.–4 p.
4. Kovács K. Pagonabarraga Critical ruptures in a bundle of slowly relaxing fibers /K. Kovács, S. Nagy, R. C. Hidalgo, F. Kun , H. J. Herrmann// Phys. Rev. E.–2008.–vol. 77.–№3.–8 p.
5. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems /R. Shcherbakov // A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university).–2002.–209 p.
6. Turcotte D.L. Micro and macroscopic models of rock fracture/ D.L. Turcotte, W.I. Newman, R. Shcherbakov//Geophes. J. Intern.–2003.–vol.152.–№3.–P.718–728.
7. Філоненко С.Ф. Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів/ С.Ф. Філоненко, В.М. Каліта, О.П. Космач // Вісник НАУ. – 2010. – № 1.–С.133–141.
8. Філоненко С.Ф. Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы/ С.Ф. Філоненко, В.М. Каліта, А.П. Космач, Т.Н. Косицкая // Технологические системы.–2010.–№ 2.–С.23–32.
9. Філоненко С.Ф. Моделювання сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів під дією поперечної сили /С.Ф. Філоненко, О.П. Космач, Т.М.Косицька//Вісник НАУ.–2010.–№2.–С.85–93.
10. Філоненко С.Ф. Влияние неравномерности процесса разрушения композиционного материала на сигналы акустической эмиссии/ С.Ф. Філоненко//Технологические системы.–2011.–№1(54).–С.24–31.