



Філоненко С. Ф., Космач О. П., Косицька Т. М.
Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА АМПЛІТУДНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ РУЙНУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПОПЕРЕЧНОЮ СИЛОЮ

Анотація

Проведено моделювання сигналів акустичної емісії при змін швидкості навантаження композитного матеріалу поперечною силою. Визначено закономірності зміни амплітудних і енергетичних параметрів формованих сигналів акустичної емісії в залежності від швидкості навантаження. Проведено опис отриманих залежностей з їх статистичними оцінками. Показано, що параметром, який не залежить від швидкості навантаження, є площа під обвідною формованих сигналів.

Abstract

The modeling of acoustic emission signals at change of loading speed of the composite material at shear load was conducted. the regularities of changes in amplitude and energy parameters of forming acoustic emission signals at depending of loading speed were obtained. the description of obtained dependences with their statistical estimates was conducted. it is shown that area under the waveform envelope is the independent parameter of the forming signals at destruction of composite materials.

Постановка проблеми

Значні переваги властивостей композиційних матеріалів (КМ) обумовили їх широке використання у різних видах техніки. КМ є багатокомпонентними матеріалами, які мають широкий спектр фізико-механічних характеристик. У той же час, на відміну від традиційних кристалічних матеріалів, КМ мають специфіку їх будови. Така будова КМ обумовлює і специфіку процесів їх руйнування. При дослідженні даних процесів застосовуються різноманітні концепції і методи. Результати досліджень, що проводяться, спрямовані не тільки на визначення оптимальних умов експлуатації виробів з КМ, але й на розробку методів їх контролю, діагностики та моніторингу стану.

Одним із методів, що використовується при дослідженні процесів руйнування КМ є метод акустичної емісії (АЕ). Однак його застосування має певні складнощі, які пов'язані з інтерпретацією акустичного випромінювання, що реєструється в процесі виконання експериментальних досліджень. Отримані ек-

периментальні закономірності акустичного випромінювання складні і значно змінюються при дії різних чинників. Їх обґрунтування потребує, перш за все, розвитку теоретичних досліджень з формуванням уявлень про фізичні аспекти акустичного випромінювання, яке виникає при руйнуванні КМ. Безумовно, що визначення теоретичних закономірностей акустичного випромінювання при руйнуванні КМ з урахуванням дії різних чинників, визначення інформативності параметрів сигналів АЕ є основою для розробки методів контролю, діагностики та моніторингу стану виробів з КМ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Теоретичні дослідження акустичного випромінювання, яке формується при руйнуванні КМ, базуються на використанні моделі представлення КМ матеріалу у вигляді пучка волокон (FBM — fiber bundle model) [1–6]. Така модель КМ передбачає, що втрата несучої здатності матеріалу відбувається за рахунок його елементів або волокон, тобто основне навантаження на КМ витримують елементи КМ. За таких умов, в моделі FBM вважається, що вплив матриці, а також вплив взаємодії матриці-наповнювач (елементи) на процес руйнування КМ не розглядається.

Модель FBM використовується при розгляді процесу руйнування КМ в умовах розтягу та дії поперечної сили [1–6]. При цьому процес руйнування КМ представляється у вигляді послідовного руйнування його елементів з врахуванням перерозподілу напружень на елементи, що залишилися. В дослідженнях процесу руйнування КМ з урахуванням законів розподілу елементів за міцністю і прийнятих припущень або правил, які стосуються визначення еквівалентних напружень, вивчаються закономірності зміни елементів, що залишаються до повної втрати несучої здатності КМ.

Однак теоретичні дослідження процесів руйнування КМ з використанням АЕ, які проводяться за кордоном, стосуються умов навантаження матеріалу розтягом [7, 8]. Результати досліджень не дозволили отримати математичний опис сигналу АЕ, який формується при руйнуванні елементів КМ, що пов'язано з відсутністю застосування фізичних представлень про акустичне випромінювання. В наслідок цього, у за-

пропонованій моделі виникає невизначеність або розрив функцій, що розглядаються, у момент часу повного руйнування КМ.

В роботах [9, 10] розглянуто моделі сигналів АЕ, які формуються при руйнуванні КМ поперечною силою. При побудові моделей використана концепція ФВМ при умові [0, 1] рівномірного розподілу елементів КМ за міцністю. Однак при розгляді процесу руйнування елементів КМ, згідно кінетичної теорії, було враховано кінетику процесу, що розвивається. За результатами проведених досліджень було отримано вираз, який описує формований сигнал АЕ при руйнуванні елементів КМ у вигляді

$$U(t) = U_0 v_0 [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} \times e^{-v_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] dt} \quad (1)$$

де N_0 — вихідна кількість елементів КМ; v_0 , r — коефіцієнти, які залежать від фізико-механічних характеристик КМ; α — швидкість зміни зовнішнього навантаження, яке прикладається до КМ; t , t_0 — відповідно, поточний час і час початку руйнування елементів КМ; g — коефіцієнт, який залежить від геометричних розмірів елементів КМ; $U_0 = N_0 \beta \delta_s$ — максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні зразка композиційного матеріалу, який складається з N_0 елементів; β — коефіцієнт пропорційності між амплітудою одиночного збурення, яке виникає при руйнуванні одиночного елемента і напруженням руйнування; δ_s — параметр, чисельне значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення (має розмірність часу).

В роботі [11] проведено моделювання процесу руйнування КМ та формованих сигналів АЕ із дослідженням впливу швидкості навантаження на видозміну сигналів АЕ. При цьому показано, що при зростанні швидкості навантаження відбувається поступово збільшення амплітуди, крутості зростання переднього та крутості падіння заднього фронтів, що обумовлено зменшенням часу протікання процесу руйнування, а також поступова трансформація форми сигналу АЕ в сигнал трикутної форми.

В той же час, важливим є визначення закономірностей зміни амплітудних та енергетичних параметрів формованих сигналів АЕ при зміні швидкості навантаження із визначенням аналітичних виразів для опису даних закономірностей.

Формулювання мети статті

В роботі буде проведено аналіз амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ, які формуються при руйнуванні КМ поперечною силою, в залежності від швидкості навантаження. Буде прове-

дено опис закономірностей зміни амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ та визначено їх статистичні характеристики.

Результати досліджень

Результати досліджень, які проведено в роботі [10], показали, що при руйнуванні КМ поперечною силою неперервності процесу руйнування його елементів відповідає неперервність формованого сигналу АЕ. При цьому сигнал АЕ представляє собою відео імпульс, який характеризується стрибком на ростанням переднього фронту та має акселераційне

падіння амплітуди заднього фронту. На рис. 1 наведено модельний сигнал АЕ у вигляді графіку зміни амплітуди в часі $\tilde{U}(t) = U(t)/U_0$ у відносних одиницях. При розрахунках всі параметри, які входять у вираз (1) приведені до безрозмірних величин, а час нормований на час введення навантаження. Швидкість навантаження $\tilde{\alpha}$ дорівнювала $\tilde{\alpha} = 100$. Час початку руйнування елементів КМ становив $\tilde{t}_0 = 0,001$ у відносних одиницях. Граничне напруження руйнування у відносних одиницях, яке відповідає часу \tilde{t}_0 початку руйнування елементів КМ, розраховувалося згідно виразу, що описує зміну еквівалентних напружень в КМ при його навантаженні поперечною силою з постійною швидкістю

$$\sigma(t) = \alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}). \quad (2)$$

Для заданого часу початку руйнування граничне значення напруження дорівнювало

$$\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395010584848.$$

При моделюванні також було прийнято, що значення параметрів v_0 , r і g дорівнюють: $v_0 = 1000000$, $r = 10000$, $g = 0,1$.

При цьому відношення часу протікання процесу руйнування до часу введення навантаження (часу початку руйнування) складає величину порядку $\sim 10^{-4}$.

Безумовно, що зміна параметрів, що входять до виразу (1), буде впливати на розвиток процесу руйнування КМ і формований сигнал АЕ. Одним з таких параметрів є швидкість навантаження КМ. Вона впливає на швидкість зміни еквівалентних напружень і обумовлює зміну швидкості розвитку процесу руйнування КМ. Це впливає із розрахунків залежностей зміни кількості елементів, що залишаються, при руйнуванні КМ поперечною силою, згідно моделі руйнування КМ, яка розглянута у роботі [10]. Такі розрахунки для швидкостей навантаження $\tilde{\alpha}$ КМ, величини яких змінюються від 100 до 400 із кроком прирощування $\Delta\tilde{\alpha} = 50$, у вигляді залежнос-

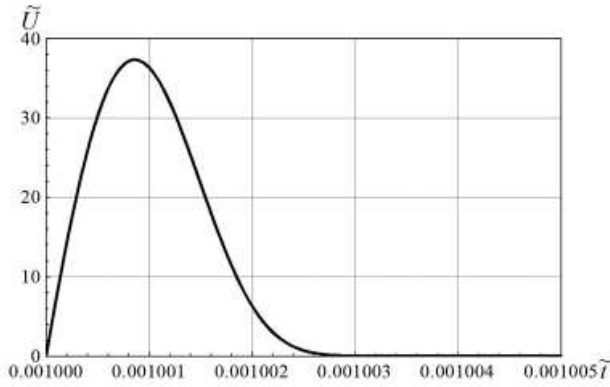


Рис. 1. Залежність зміни сигналу АЕ, згідно (1), у відносних одиницях при руйнуванні композиційного матеріалу в часі під дією поперечної сили:
 $\tilde{\alpha} = 100, \nu_0 = 1000000, r = 10000, g = 0,1, \tilde{\sigma}_0 \approx 0,087, \tilde{t}_0 = 0,001$

тей зміни кількості елементів \tilde{N} , що залишаються, у часі наведено на рис. 2 у відносних величинах. При розрахунках параметри $\tilde{\sigma}_0, \nu_0, r$ і g прийняті такими ж, як і при побудові графіку рис. 1, тобто:
 $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395010584848; \nu_0 = 1000000; r = 10000; g = 0,1.$

З рис. 2 видно, що при зростанні швидкості навантаження КМ поперечною силою відбувається зменшення часу початку руйнування його елементів, тобто залежності зміни кількості елементів, що залишаються, мають зсув за віссю часу у бік менших значень. При цьому із збільшенням швидкості навантаження спостерігається і збільшення крутості падіння отриманих залежностей, тобто зменшення часу між початком і кінцем руйнування елементів на заданих швидкостях. Це свідчить про збільшення швидкості розвитку процесу руйнування елементів КМ. Результати розрахунків часу початку руйнування, кінця руйнування і часу руйнування елементів КМ у

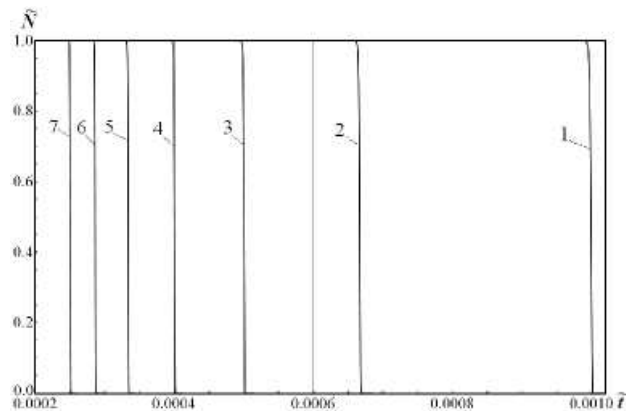


Рис. 2. Закономірності зміни кількості елементів КМ, що залишаються при його руйнуванні поперечною силою, згідно [10], у відносних одиницях в часі при зміні швидкості $\tilde{\alpha}$ навантаження:
 1 – $\tilde{\alpha} = 100$; 2 – $\tilde{\alpha} = 150$; 3 – $\tilde{\alpha} = 200$; 4 – $\tilde{\alpha} = 250$; 5 – $\tilde{\alpha} = 300$;
 6 – $\tilde{\alpha} = 350$; 7 – $\tilde{\alpha} = 400$. $\tilde{\alpha} = 100, \nu_0 = 1000000, r = 10000,$
 $g = 0,1, \tilde{\sigma}_0 \approx 0,087$

Таблиця 1

Розрахунки часових параметрів руйнування елементів КМ

$\tilde{\alpha}$	\tilde{t}_H	\tilde{t}_K	$\Delta\tilde{t}_p$
100	0,0010000	0,00100241	$2,41 \cdot 10^{-6}$
150	0,0006667	0,00066858	$1,913 \cdot 10^{-6}$
200	0,0005000	0,00050160	$1,6 \cdot 10^{-6}$
250	0,0004000	0,00040139	$1,39 \cdot 10^{-6}$
300	0,0003334	0,00033457	$1,237 \cdot 10^{-6}$
350	0,0002857	0,00028683	$1,1157 \cdot 10^{-6}$
400	0,0002500	0,00025102	$1,02 \cdot 10^{-6}$
450	0,0002226	0,00022316	$9,37 \cdot 10^{-7}$
500	0,0002000	0,00020087	$8,7 \cdot 10^{-7}$

відносних одиницях для заданих швидкостей навантаження наведено у табл. 1. У табл. 1 прийняті наступні позначення: \tilde{t}_H – час початку руйнування елементів КМ у відносних одиницях; \tilde{t}_K – час кінця руйнування елементів КМ; $\Delta\tilde{t}_p$ – час руйнування елементів КМ; $\tilde{\alpha}$ – швидкість навантаження КМ. Всі величини, які наведено у табл. 1 представлені у відносних одиницях.

Результати проведених розрахунків (табл. 1) показують, що при збільшенні швидкості $\tilde{\alpha}$ навантаження КМ відбувається поступове зменшення часу початку руйнування і тривалості протікання процесу руйнування. Так, при збільшенні швидкості навантаження у 1,5 рази, тобто із $\tilde{\alpha} = 100$ до $\tilde{\alpha} = 150$, тривалість $\Delta\tilde{t}_p$ процесу руйнування зменшується у 1,26 рази. Зростання $\tilde{\alpha}$ у 2 рази приводить до зменшення $\Delta\tilde{t}_p$ у 1,51 рази. При подальшому зростанні швидкості $\tilde{\alpha}$ навантаження у 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5 і 5 разів тривалість $\Delta\tilde{t}_p$ процесу руйнування елементів композиційного матеріалу зменшується, відповідно, у 1,74, 1,95, 2,16, 2,36, 2,72 і 2,77 рази.

Таке зменшення часу протікання процесу руйнування елементів КМ, тобто збільшення його швидкості, безумовно, буде впливати на параметри формованих сигналів АЕ. Тому проведемо розрахунки амплітудних і енергетичних параметрів сигналів АЕ з визначенням та описом закономірностей їх зміни при зміні швидкості навантаження композиційного матеріалу поперечною силою. До таких параметрів відносяться максимальна амплітуда формованого сигналу АЕ \tilde{U}_{mC} , його потужність \tilde{W}_C , енергія \tilde{E}_C і площа під обвідною \tilde{S}_C [12]. Теоретичні розрахунки даних параметрів з визначенням їх аналітичних виразів, з урахуванням (1), не представляється за можливе. Тому їх значення, згідно визначень даних параметрів [12], будемо розраховувати, з урахуванням (1), чисельними методами. Процедура розрахунків полягає у наступному. Спочатку проводимо розрахунки зміни амплітуди сигналу АЕ в часі для заданої

швидкості навантаження із збереженням розрахункових даних. За отриманими даними, проводяться розрахунки \tilde{U}_{mc} , \tilde{W}_c , \tilde{E}_c і \tilde{S}_c , згідно прийнятих визначень. При проведенні розрахунків параметри $\tilde{\sigma}_0$, v_0 , r і g були прийняті такими ж, як і при побудові графіку, що показаний на рис. 1. Швидкість навантаження $\tilde{\alpha}$ змінювалася у діапазоні значень від $\tilde{\alpha} = 100$ до $\tilde{\alpha} = 500$ із шагом прирощування $\Delta\tilde{\alpha} = 50$. Розрахунки \tilde{W}_c , \tilde{E}_c і \tilde{S}_c проводили, у відповідності до виразів

$$\tilde{W}_c = \frac{1}{n\Delta\tilde{t}} \sum_{i=1}^n \tilde{U}_i^2, \quad (3)$$

$$\tilde{E}_c = \Delta t \sum_{i=1}^n \tilde{U}_i^2, \quad (4)$$

$$\tilde{S}_c = \Delta t \sum_{i=1}^n \tilde{U}_i, \quad (5)$$

де $\tilde{\tau} = n\Delta\tilde{t}$ — тривалість сигналу АЕ у відносних одиницях; $\Delta\tilde{t}$ — інтервал часу у відносних одиницях для розрахунку амплітуди сигналу АЕ; n — кількість розрахункових значень амплітуди сигналу АЕ на його тривалості (кількість розрахункових значень амплітуди сигналу АЕ, величини яких більше нуля).

При розрахунках амплітуд сигналів АЕ для заданих швидкостей навантаження КМ, які в подальшому використовувалися при розрахунках потужності, енергії і площі під обвідною сигналів АЕ, значення $\Delta\tilde{t}$ у відносних одиницях було постійним і дорівнювало $\Delta\tilde{t} = 5 \cdot 10^{-9}$.

Згідно виразів (3), 4 і (5), потужність, енергія і площа під обвідною формованих сигналів АЕ визначаються з урахуванням тривалості сигналів. Оскільки, згідно (1), задній фронт формованого сигналу АЕ (рис. 1) має експоненціальне падіння з поступовим наближенням до нуля, то тривалість сигналів визначалася за методикою, яка розглянута у роботі [13].

Результати проведених розрахунків у вигляді графіків зміни максимальної амплітуди \tilde{U}_{mc} сигналів АЕ, які формуються при руйнуванні КМ, їх потужності \tilde{W}_c , енергії, \tilde{E}_c і площі \tilde{S}_c під обвідною сигналів в залежності від швидкості навантаження $\tilde{\alpha}$ КМ наведено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що при зростанні швидкості навантаження КМ характер закономірностей зміни параметрів формованих сигналів АЕ різниться між собою. Для максимальної амплітуди сигналів АЕ спостерігається лінійна залежність її зростання при зростанні швидкості навантаження. У той же час, потуж-

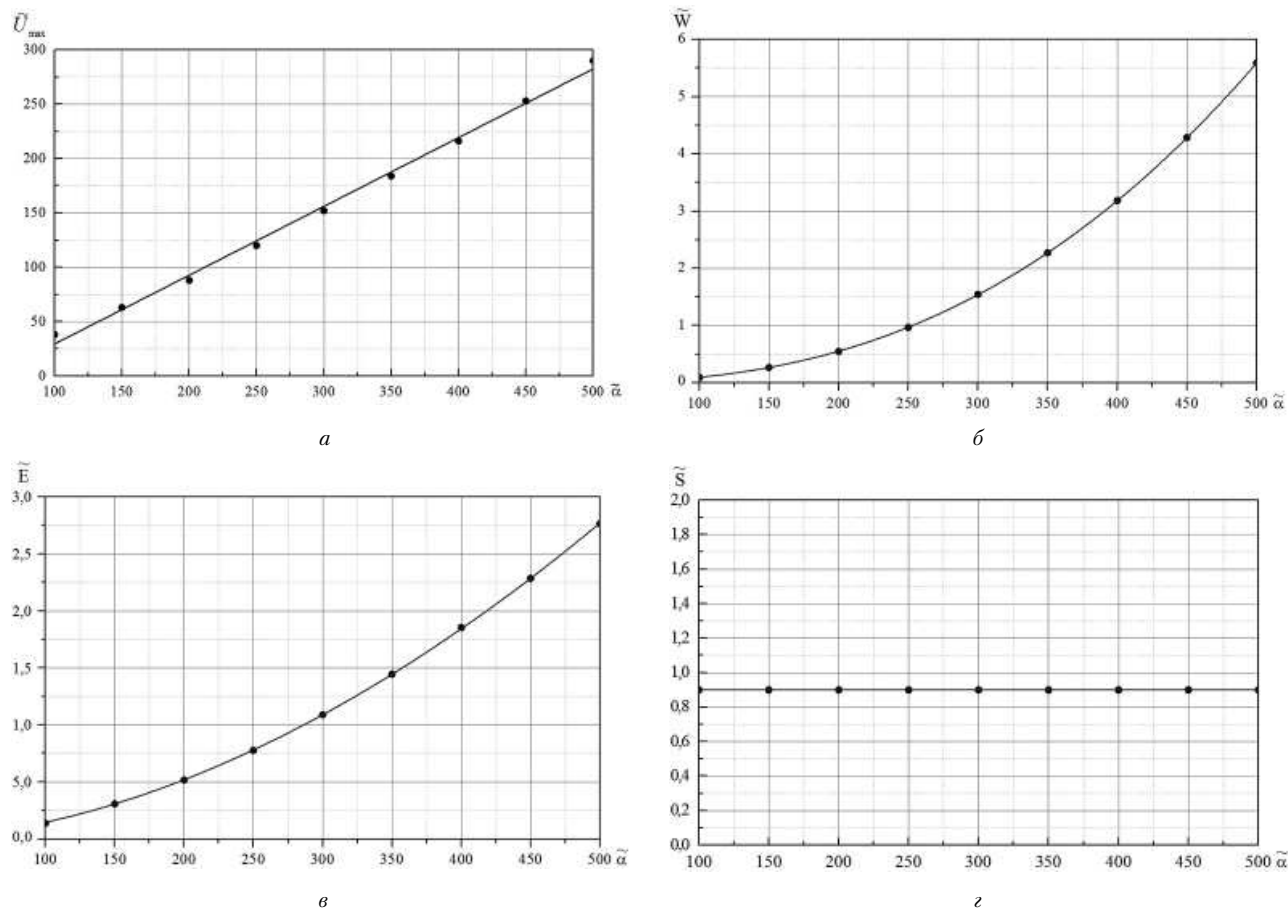


Рис. 3. Графіки залежностей зміни максимальної амплітуди \tilde{U}_{mc} (а), потужності $\tilde{W}_c \cdot 10^{12}$ (б), енергії \tilde{E}_c (в) та площі \tilde{S}_c під обвідною (г) модельних сигналів АЕ в залежності від швидкості $\tilde{\alpha}$ навантаження КМ поперечною силою



ність і енергія формованих сигналів АЕ зростають за не лінійним законом.

Дійсно, аналіз отриманих залежностей (рис. 3, а, б, в) з математичним їх описом показав наступне. Залежність зміни максимальної амплітуди формованих сигналів АЕ від швидкості навантаження КМ добре описуються нелінійною функцією виду

$$\tilde{U}_{mc} = d + z \tilde{\alpha}, \quad (6)$$

де d, z — коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Коефіцієнти апроксимуючого виразу (6), що описує залежність зміни амплітуди формованих сигналів АЕ (рис. 3, а) дорівнюють $d = -33,69945$, $z = 0,6324$. При цьому ймовірність p опису отриманої закономірності із визначеною дисперсією $s_{\tilde{U}_{mc}}^2$, відповідно, складають $p = 0,99819$, $s_{\tilde{U}_{mc}}^2 = 5,58284$.

При зростанні швидкості навантаження закономірності зміни потужності і енергії формованих сигналів АЕ (рис. 3, б, в) добре описуються степеневою функцією виду

$$P_A = \vartheta \tilde{\alpha}^\theta, \quad (7)$$

де P_A — аналізований параметр сигналів АЕ — потужність або енергія формованих сигналів; ϑ, θ — коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Аналіз отриманих даних показав, що для залежності зміни потужності \tilde{W}_c сигналів АЕ (рис. 3, б) коефіцієнти апроксимуючого виразу дорівнюють: $\vartheta = 858876,09646$, $\theta = 2,52445$. Для енергії \tilde{E}_c сигналів АЕ коефіцієнти ϑ і θ мають наступні значення: $\vartheta = 3,24893 \cdot 10^{-7}$, $\theta = 1,82696$. При цьому ймовірність p опису закономірностей зміни потужності та енергії формованих сигналів АЕ із визначеними дисперсіями $s_{P_A}^2$ складають: для потужності \tilde{W}_c сигналів АЕ — $p = 0,999$, $s_{\tilde{W}_c}^2 = 4,0477 \cdot 10^9$; для енергії \tilde{E}_c сигналів АЕ — $p = 0,999$, $s_{\tilde{E}_c}^2 = 6,144 \cdot 10^{-5}$.

При лінійному зростанні максимальної амплітуди формованих сигналів АЕ в залежності від швидкості навантаження не лінійне зростання їх потужності і енергії, імовірно, обумовлено не лінійним зменшенням тривалості сигналів.

В той же час, результати проведених досліджень показують, що не залежно від швидкості навантаження КМ, тобто не залежно від зростання швидкості руйнування елементів, площа під обвідною формованих сигналів АЕ залишається практично постійною величиною (рис. 3, з). Це узгоджується і з результатами, які розглянуто у роботах [13, 14], при переважному механічному та термоактиваційному руйнуванні КМ матеріалу розтягом.

Висновки

Результати досліджень впливу швидкості навантаження КМ на амплітудні та енергетичні параметри

формованих сигналів АЕ показали наступне. При збільшенні швидкості навантаження КМ закономірності зміни максимальної амплітуди, потужності, енергії та площі під обвідною сигналів АЕ різняться між собою. Визначено, що зростання максимальної амплітуди формованих сигналів АЕ відбувається за лінійним законом. В той же час, потужність та енергія сигналів АЕ збільшуються за не лінійним законом і добре описуються степеневою функцією. Таке зростання енергії і потужності сигналів АЕ, імовірно, обумовлено не лінійним зменшення тривалості формованих сигналів АЕ. Проведено аналіз отриманих залежностей із визначенням імовірності їх опису та дисперсії. Показано, що загальне зростання максимальної амплітуди, потужності та енергії сигналів АЕ обумовлено зростанням швидкості руйнування елементів КМ. Також визначено, що параметром, якій не залежить від швидкості навантаження КМ, є площа під обвідною формованих сигналів АЕ. В той же час, у вираз, якій описують формований сигнал АЕ входять параметри, що характеризують фізико-механічні властивості КМ. Безумовно, їх зміна буде впливати на розвиток процесу руйнування КМ та формований сигнал АЕ, що потребує проведення подальших досліджень.

Література

1. Hemmer P. C. The Distribution of Simultaneous Fiber Failures in Fiber Bundles / P. C. Hemmer, A. Hansen // J. Appl. Mech. — 1992. — v. 59. — № 4. — P. 909–914.
2. Moreno Y. Self-organized criticality in a fibre bundle-type model / Y. Moreno, J. B. Gomez, A. F. Pacheco // Physics A. — 1999. — v. 274. — P. 400–409.
3. Sornette D. Scaling with respect to disorder in time-to-failure / D. Sornette, J. V. Andersen. // European Physical Journal B. — 1998. — v. 1. — P. 353–357.
4. 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. — v. 705. — P. 57–92.
5. Pradhan S. Energy bursts in fiber bundle models of composite materials / S. Pradhan, C. Hemmer // Phys. Rev. E. — 2008. — v. 77. — No1, 031138 (4 p.).
6. 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. — v. 77. — No. 3, 036102 (8 p.).
7. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems / R. Shcherbakov // A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university). — 2002. — 209 P.
8. Turcotte D.L. Micro and macroscopic models of rock fracture / D.L. Turcotte, W.I. Newman, R. Shcherbakov // Geophes. J. Intern. — 2003. — v. 152. — No 3. — P. 718–728.

9. Філоненко С.Ф. Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів / С.Ф. Філоненко, В.М. Калита, О.П. Космач // Вісник НАУ. — 2010. — № 1. — С.133–141.

10. Філоненко С.Ф. Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы / С.Ф. Філоненко, В.М.Калита, А.П. Космач, Т.Н. Косицька // Технологические системы. — 2010. — № 2. — С. 23–32.

11. 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.

12. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]. — М. : Высшая школа, 1983. — 536 с.

13. Косицька Т.М. Закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії при механічному руйнуванні композиційних матеріалів / Т.М. Косицька // Вісник інженерної академії України. — 2010. — № 3–4. — С. 184–189.

14. Філоненко С.Ф. Информативность параметров сигналов акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов / С.Ф. Філоненко, Т.В. Нимченко, Т.Н. Косицька // Технологические системы. — 2009. — № 4(48). — С. 22–28.