

УДК 621.891:621.316

С.Ф. Філоненко, д.т.н., проф.
Т.М. Косицька, к.х.н., с.н.с.
О.П. Космач, асп.

МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ РУЙНУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ДІЄЮ ПОПЕРЕЧНОЇ СИЛИ

Національний авіаційний університет
E-mail: fils01@mail.ru

Проведено моделювання процесу руйнування композиційного матеріалу та сигналів акустичної емісії залежно від фізико-механічних характеристик матеріалу та умов навантаження. Показано основні закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії у разі зміни швидкості навантаження та фізико-механічних характеристик композиційного матеріалу.

Проведено моделирование разрушения композиционного материала и формируемого сигнала акустической эмиссии в зависимости от физико-механических характеристик материала и условий нагружения. Показаны основные закономерности изменения параметров сигналов акустической эмиссии при изменении скорости нагружения и физико-механических характеристик композиционного материала.

Modeling of composite material fracture and formed of acoustic emission signal is conducted depending on physical-mechanical properties of material, and also terms of loading. Basic conformities to the law of change of acoustic emission signal parameters of are rotined at a change of loading speed and physical-mechanical properties of composite material.

Постановка проблеми

Діагностиці виробів приділяється значна увага в науковій літературі. Це зумовлено не тільки старінням і зношуванням обладнання, але й упровадженням нових видів матеріалів, які набувають дедалі ширшого використання. До таких матеріалів відносяться композиційні матеріали, для дослідження та діагностики яких використовують різні методи, зокрема метод акустичної емісії (АЕ).

За останні десятиліття отримано великий обсяг даних про процеси руйнування матеріалів з використанням АЕ, які покладено в основу ряду стандартів. Увагу заакцентовано на теоретичні розробки, спрямовані на опис формованих сигналів АЕ та закономірностей акустичного випромінювання.

Складність подібних досліджень зумовлено не тільки наявністю різних концепцій руйнування, але й потребою враховувати специфіку структурного стану матеріалів, отриманих різними методами. Це передусім стосується композиційних матеріалів, інтенсивність досліджень яких з використанням методу АЕ постійно зростає.

Безумовно, що в проблемі АЕ діагностики композиційних матеріалів важливими є теоретичні дослідження процесів випромінювання та формування сигналів АЕ. Такі дослідження є основою пошуку взаємозв'язку АЕ з процесами руйнування композиційних матеріалів з урахуванням впливу різних факторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Під час дослідження процесів руйнування композиційних матеріалів широко використовують модель подання матеріалу у вигляді пучка волокон (FBM – fiber bundle model) [1–5].

Згідно з моделлю руйнування композиційного матеріалу має вигляд послідовного руйнування волокон у пучку з перерозподілом напружень на волокна, що залишилися (незруйновані волокна). Цю модель руйнування композиційного матеріалу покладено в основу моделі процесу АЕ випромінювання, тобто швидкості зміни нагромаджувальної енергії АЕ [6; 7].

Однак проведені дослідження не дозволили описати сигнал АЕ при руйнуванні волокон через невизначеність (розрив функцій) й момент повного руйнування композиційного матеріалу.

Аналітичний вираз для сигналу АЕ, формованого при руйнуванні композиційного матеріалу в умовах розтягу з використанням FBM, отримано в працях [8–10].

Проведені дослідження дозволили визначити основні закономірності зміни параметрів сигналів АЕ внаслідок дії різних факторів.

Дослідження процесу руйнування композиційного матеріалу в умовах прикладання поперечної сили розглянуто в працях [11; 12]. Були отримані основні співвідношення зміни напружень і деформацій на волокнах через їх руйнування для випадків незалежного рівномірного розподілу граничних значень міцності.

На основі отриманих результатів в [13] розроблено моделі сигналів АЕ, які формуються в процесі руйнування композиційного матеріалу, спричиненою дією поперечної сили. Ці моделі найпростіші. Однак АЕ може бути успішно використано для фіксації критичного напруження, за якого починається руйнування композиційного матеріалу.

Розвиток моделей отримано в роботі [14], де були враховані закономірності:

- зміни еквівалентного осьового напруження у процесі розвитку руйнування в умовах рівномірного розподілу щільності ймовірності елементів за міцністю в заданих межах;

- кінетики процесу руйнування.

Результати проведених досліджень дозволили отримати аналітичні вирази для опису кількості незруйнованих елементів у часі та формованого сигналу АЕ у вигляді

$$N(t) = N_0 e^{-\nu_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] dt} \quad (1)$$

$$U(t) = U_0 \nu_0 [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] \times e^{-\nu_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] dt} \quad (2)$$

де N_0 – вихідна (початкова) кількість волокон;

ν_0 , r – сталі, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу;

α – швидкість деформування (навантаження);

t, t_0 – поточний час і час початку руйнування волокон відповідно;

g – коефіцієнт, який залежить від геометричних розмірів волокон;

U_0 – максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні зразка композиційного матеріалу, що розглядається.

Згідно з рівняннями (1), (2) визначено закономірності зміни кількості залишених волокон і сигналів АЕ залежно від швидкості навантаження α .

Зі зростанням α відбувається:

- зменшення часу початку руйнування композиційного матеріалу;
- зростання амплітуди;
- зменшення тривалості сигналів АЕ.

У вирази (1), (2) входять також параметри, пов'язані з фізико-механічними характеристиками матеріалу, вплив яких на закономірності зміни параметрів сигналів АЕ становить інтерес.

Мета роботи – на основі розробленої моделі провести моделювання сигналів АЕ, сформованих у процесі руйнування композиційного матеріалу за зростання швидкості деформування, та за зміни фізико-механічних характеристик матеріалу, а також визначити закономірності зміни параметрів сигналів АЕ та закономірності трансформації їх форми.

Моделювання сигналів акустичної емісії

Дослідження, які проведено в праці [14], дозволили отримати основні закономірності зміни параметрів сигналів АЕ за малих швидкостей зростання поперечної (зсувної) сили, прикладеної до композиційного матеріалу.

Однак унаслідок динамічного впливу композиційні матеріали можуть зазнавати навантаження, які надто швидко змінюються.

Безумовно, що за таких умов навантаження швидко будуть змінюватися й еквівалентні осьові напруження.

Зміну напружень на волокнах композиційного матеріалу в часі у відносних одиницях для швидкостей навантаження α показано на рис. 1.

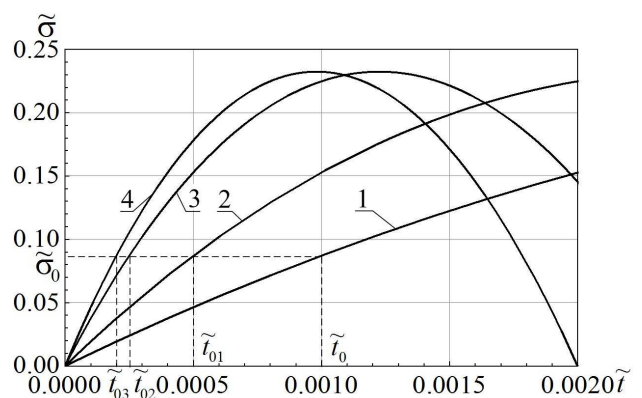


Рис. 1. Зміна напружень у разі деформування композиційного матеріалу під дією поперечної сили ($g = 0,1$, $\nu_0 = 100\,000$, $r = 10\,000$, $\bar{\sigma}_0 \approx 0,087$):

1 – $\alpha = 100$;

2 – $\alpha = 200$;

3 – $\alpha = 400$;

4 – $\alpha = 500$

Для побудови графіків швидкість навантаження α зведено до безрозмірних величин, а час нормовано на час уведення навантаження.

Із рис. 1 видно, що залежності зміни напружень на волокнах $\sigma(t)$ однотипні з залежностями, розглянутими в праці [14] для малих значень α .

Збільшення α в 10 разів, наприклад, з 10 до 100 призводить до зміщення за віссю часу в бік менших значень в 10 разів.

Якщо використовувати таке саме граничне напруження початку руйнування волокон, що й в праці [14], яка дорівнює

$$\bar{\sigma}_0 = 0,08715395010584848,$$

то за $\alpha = 100$ час початку руйнування \tilde{t}_0 зменшується з 0,01 до 0,001.

Час початку руйнування:

$$\tilde{t}_0 = 0,001;$$

$$\tilde{t}_{01} = 0,0005;$$

$$\tilde{t}_{02} = 0,00025;$$

$$\tilde{t}_{03} = 0,0002.$$

Як і в праці [14], проведемо моделювання закономірностей зміни кількості залишених елементів і сигналів АЕ згідно з виразами (1), (2) для заданих значень α . Значення параметрів g та r братимемо такими, як і у праці [14]:

$$g = 0,1;$$

$$r = 10\,000.$$

Параметр ν_0 згідно з працею [15] чутливий до фізико-хімічної природи та структури матеріалу, а також умов деформування.

Нехай $\nu_0 = 1000\,000$ з врахуванням того, що зростання швидкості навантаження призводить до зміни масштабного фактора за часом.

Результати моделювання у вигляді графіків

$$\tilde{N}(t) = N(t) / N_0;$$

$$\tilde{U}(t) = U(t) / U_0,$$

у відносних одиницях показано на рис. 2.

Під час моделювання всі параметри, які входять у вирази (1), (2), зведено до безрозмірних величин.

Час нормований на час уведення навантаження.

Граничне напруження руйнування у відносних одиницях, як і в праці [14], для всіх досліджуваних значень α беремо таким:

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

З урахуванням $\bar{\sigma}_0$ час початку руйнування композиційного матеріалу для заданих значень α згідно з рис. 1 буде становити:

$$\tilde{t}_0 = 0,001 \text{ для } \alpha = 100;$$

$$\tilde{t}_{01} = 0,0005 \text{ для } \alpha = 200;$$

$$\tilde{t}_{02} = 0,00025 \text{ для } \alpha = 400;$$

$$\tilde{t}_{03} = 0,0002 \text{ для } \alpha = 500.$$

З отриманих результатів (рис. 2, а, в, д, е) видно, що, як і для малих значень α , криві зміни залишених елементів у часі мають неперервний характер падіння.

Зі збільшенням α спостерігається зростання крутості їх падіння. При цьому відношення часу перебігу процесу руйнування до часу введення навантаження (часу початку руйнування) становить близько 10^{-4} .

Зі збільшенням α , як видно з (рис. 2, б, г, е, ж), спостерігається зростання амплітуди сигналів АЕ та зменшення їх тривалості, що відповідає прискоренню процесу руйнування елементів композиційного матеріалу.

Опрацювання отриманих даних показує, що за $\alpha = 100$ максимальна амплітуда сигналу АЕ дорівнює $\tilde{U}_{\max} = 38,1$.

Збільшення α в два рази, тобто з 100 до 200, приводить до зростання \tilde{U}_{\max} в 2,31 рази.

У разі збільшення α в чотири рази \tilde{U}_{\max} зростає в 5,67 рази, а за збільшення α в п'ять разів амплітуда зростає в 7,61 рази (рис. 2, б, г, е, ж).

Зі зростанням α спостерігається зміна й тривалості $\tilde{\tau}_0$ переднього фронту сигналу АЕ.

За $\alpha = 100$ тривалість переднього фронту сигналу АЕ дорівнює $\tilde{\tau}_0 = 0,00000087$.

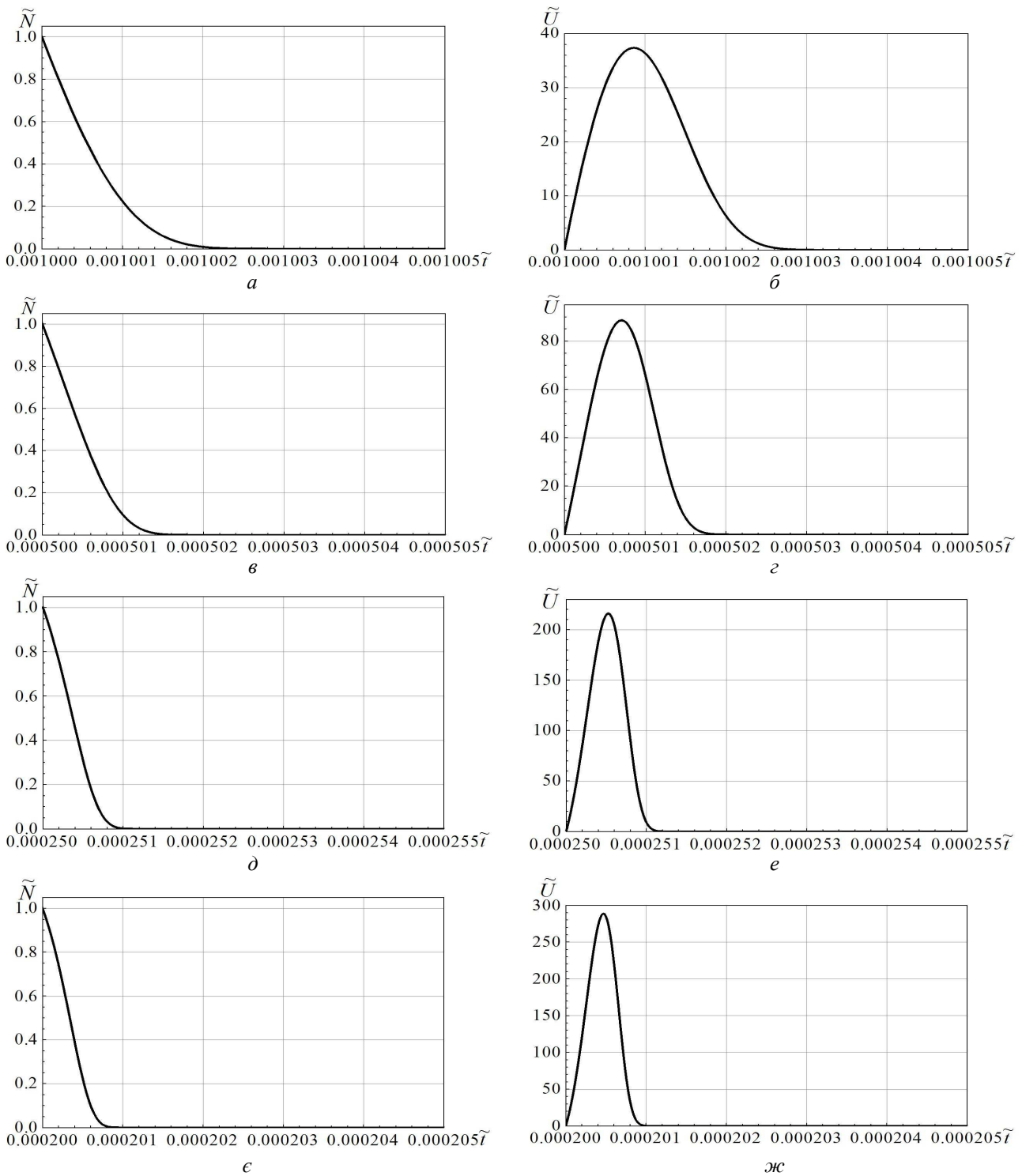


Рис. 2. Зміна кількості залишених елементів (a, \bar{b}, d, ϵ) і сигналів АЕ ($\bar{b}, z, e, \bar{ж}$) при руйнуванні композиційного матеріалу в часі під дією поперечної сили ($\nu_0 = 1\,000\,000, r = 10\,000, g = 0,1, \bar{\sigma}_0 \approx 0,087$):

$$a, \bar{b} - \alpha = 100, \tilde{t}_0 = 0,001;$$

$$\bar{b}, z - \alpha = 200, \tilde{t}_0 = 0,0005;$$

$$d, e - \alpha = 400, \tilde{t}_0 = 0,00025;$$

$$\epsilon, \bar{ж} - \alpha = 500, \tilde{t}_0 = 0,0002$$

Збільшення α в два рази приводить до зменшення $\tilde{\tau}_0$ в 1,21 рази.

За збільшення α в чотири рази $\tilde{\tau}_0$ зменшується в 1,67 рази, а за збільшення α в п'ять разів тривалість переднього фронту зменшується в 1,9 рази (рис. 2, б, г, е, ж). Також відбувається й зменшення тривалості $\tilde{\tau}$ сигналів АЕ, для якої можна записати вираз

$$\tilde{\tau} = m\tilde{\tau}_0, \quad (3)$$

де m – ціле число порядку декількох одиниць.

Величину m визначимо з умови відношення

$$\tilde{U}(\tilde{\tau} = \tilde{\tau}) \ll \tilde{U}_{\max}(\tilde{\tau} = \tilde{\tau}_0).$$

Для цього оцінимо m відповідно до результатів проведеного моделювання.

Так, за $\alpha = 100$ для $m = 2,5$ відношення амплітуд становить 0,062, а для $m = 3$ це відношення вже дорівнює 0,0026.

За $\alpha = 200$ для $m = 2,5$ відношення амплітуд становить 0,0011.

За $\alpha = 400$ для $m = 2$ відношення амплітуд становить 0,014, а для $m = 2,2$ це відношення вже дорівнює 0,003.

За $\alpha = 500$ для $m = 2$ відношення амплітуд становить 0,01, а для $m = 2,1$ воно дорівнює 0,0034.

Якщо обмежитися третім знаком після коми у відношеннях амплітуд, то за збільшення α в два рази $\tilde{\tau}$ зменшується в 1,45 рази, за збільшення α в чотири рази $\tilde{\tau}$ зменшується в 2,3 рази, а за збільшення α в п'ять разів $\tilde{\tau}$ зменшується в 2,7 рази.

З отриманих результатів, як і в роботі [14], видно, що за збільшення α зберігається загальна тенденція в зміні параметрів сигналів АЕ – зростання їх амплітуди і зменшення тривалості.

Закономірності зміни параметрів сигналів АЕ, розглянуті в роботі [14], були досліджені за постійних значень параметрів r та ν_0 , які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалів.

Зміна ν_0 згідно з працею [15] може бути зумовлена фізико-хімічною природою і структурою матеріалу, тоді як параметр r значною мірою залежить від неоднорідності фізико-механічних характеристик або дисперсності властивостей матеріалу за міцністю.

Результати моделювання кількості незруйнованих елементів і сигналів АЕ згідно з виразами (1), (2) при зміні значення ν_0 до 2 000 000 у вигляді графіків

$$\tilde{N}(t) = N(t) / N_0;$$

$$\tilde{U}(t) = U(t) / U_0,$$

поданих у відносних одиницях, показано на рис. 3.

Під час моделювання припускали

$$g = 0,1,$$

$$r = 10000,$$

а значення α змінювалося від 100 до 500.

Для всіх досліджуваних значень α величина

$\tilde{\sigma}_0$ становила

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

а час початку руйнування композиційного матеріалу дорівнював:

$$\tilde{t}_0 = 0,001 \text{ для } \alpha = 100;$$

$$\tilde{t}_0 = 0,0005 \text{ для } \alpha = 200;$$

$$\tilde{t}_0 = 0,00025 \text{ для } \alpha = 400;$$

$$\tilde{t}_0 = 0,0002 \text{ для } \alpha = 500.$$

Під час побудови графіків усі параметри, які входять у вирази (1) та (2), нормовано аналогічно графікам, показаним на рис. 2.

З отриманих результатів (рис. 3) видно, що зі збільшенням ν_0 до 2 000 000 при руйнуванні композиційного матеріалу згідно з застосовуваною моделлю закономірності зміни кількості незруйнованих елементів у часі і сигналів АЕ зберігаються.

Зі збільшенням α спостерігається зростання амплітуди сигналів АЕ і зменшення їх тривалості. Як показує опрацювання отриманих даних, зберігаються основні співвідношення зміни параметрів сигналів АЕ:

- амплітуди;
- тривалості переднього фронту;
- тривалості.

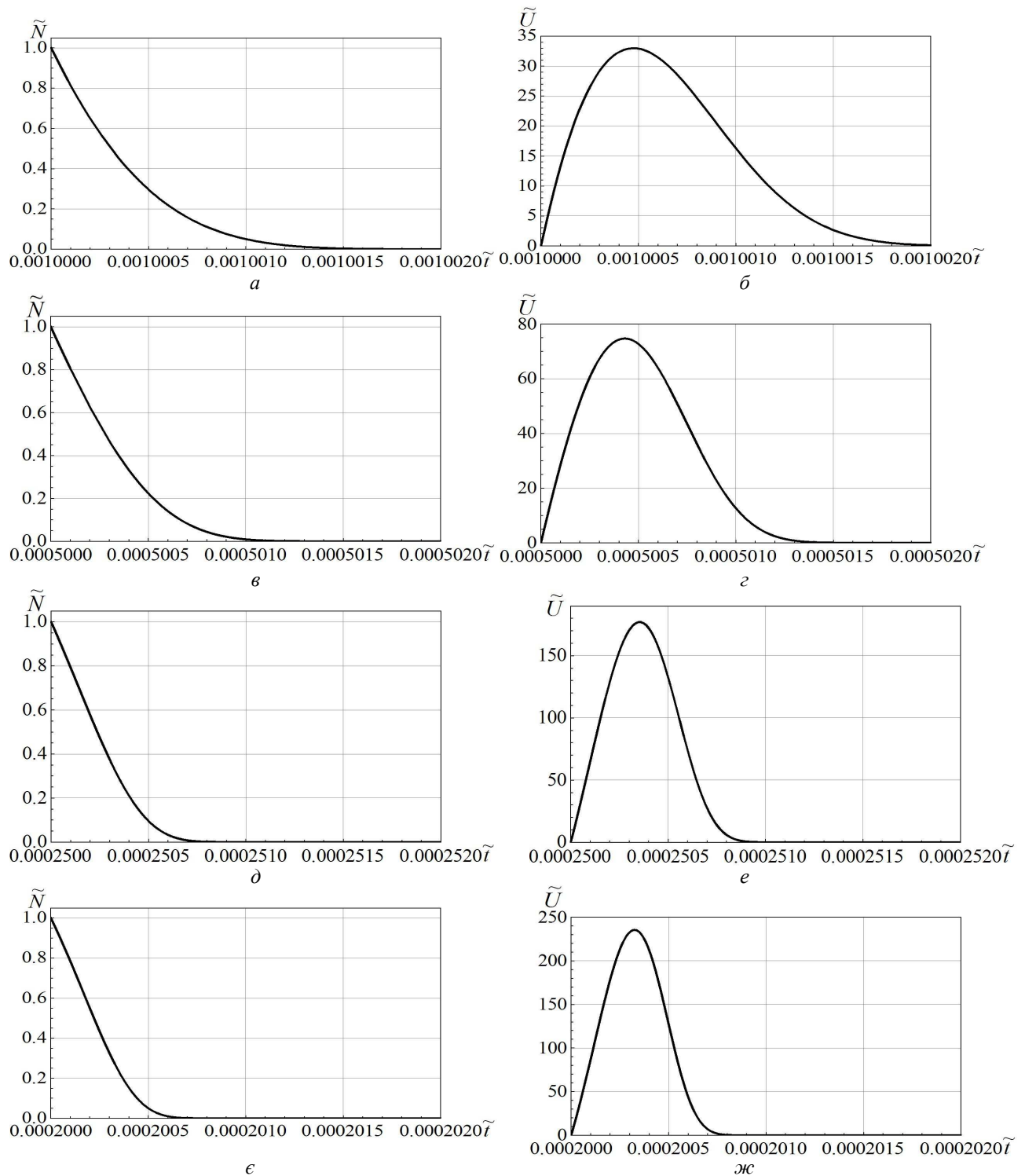


Рис. 3. Зміна кількості залишених елементів (a, b, d, e) і сигналів АЕ ($b, z, e, ж$) при руйнуванні композиційного матеріалу в часі під дією поперечної сили ($\nu_0 = 2\,000\,000$, $r = 10\,000$, $g = 0,1$, $\bar{\sigma}_0 = 0,08715395010584848$):

a, b – $\alpha = 100$, $\tilde{t}_0 = 0,00$;

b, z – $\alpha = 200$, $\tilde{t}_{01} = 0,0005$;

d, e – $\alpha = 400$, $\tilde{t}_{02} = 0,00025$;

$e, ж$ – $\alpha = 500$, $\tilde{t}_{03} = 0,0002$

Водночас параметри сигналів АЕ для всіх досліджуваних величин α мають менші значення, ніж для таких самих значень α при $\nu_0 = 1\,000\,000$ (рис. 2). Проте це зменшення параметрів сигналів незначне.

Параметр r у виразах (1), (2), зумовлений з неоднорідністю фізико-механічних характеристик матеріалу, має впливати на час перебігу процесу руйнування.

Чим більше значення r , тим менша неоднорідність властивостей матеріалу і тим менший час процесу руйнування.

Проведемо моделювання кількості незруйнованих елементів і сигналів АЕ згідно з виразами (1), (2) за умови зміни параметра r для заданого значення α .

Для параметрів g , α , $\tilde{\sigma}_0$, ν_0 візьмемо такі значення:

$$g = 0,1;$$

$$\alpha = 100;$$

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

$$\nu_0 = 1\,000\,000.$$

Параметр r буде змінюватися в межах від 12 000 до 20 000. Збільшення r відповідає зменшенню неоднорідності властивостей композиційного матеріалу.

Результати проведеного моделювання у вигляді графіків

$$\tilde{N}(t) = N(t) / N_0;$$

$$\tilde{U}(t) = U(t) / U_0$$

у відносних одиницях показано на рис. 4.

Для побудови графіків усі параметри, що входять у вирази (1), (2), нормовані аналогічно рис. 2, 3.

Із рис. 4 (а, в, д, е) видно, що зі збільшенням значення r спостерігається зростання крутизни зменшення кривих кількості незруйнованих елементів.

При цьому зменшення неоднорідності (зростання значення r) зменшує часу перебігу процесу руйнування.

Так, збільшення значення r з 12 000 до 20 000 приводить до зменшення часу перебігу процесу руйнування в 1,33 рази.

Такі зміни умов перебігу процесу руйнування зумовлюють зміну і параметрів сигналів АЕ. Спостерігається зростання амплітуди сигналів і зменшення їх тривалості (рис. 4, б, з, е, ж).

Амплітуда сигналу АЕ \tilde{U}_{\max} за $r=12\,000$ дорівнює $\tilde{U}_{\max} = 38,9$.

Збільшення r в 1,17 рази, тобто з 12 000 до 14 000, приводить до зростання \tilde{U}_{\max} в 1,03 рази.

За збільшення r в 1,25 рази амплітуда сигналу АЕ \tilde{U}_{\max} зростає в 1,05 рази, а за збільшення r в 1,67 рази \tilde{U}_{\max} – в 1,14 рази.

Опрацювання отриманих даних показує, що за $r = 12\,000$ тривалість переднього фронту сигналу АЕ $\tilde{\tau}_0 = 8,25$.

Збільшення r в 1,17 рази приводить до зменшення $\tilde{\tau}_0$ в 1,04 рази.

За збільшення r в 1,25 рази $\tilde{\tau}_0$ зменшується в 1,05 рази, а за збільшення r в 1,67 рази – в 1,16 рази.

Тривалість сигналів АЕ визначимо згідно з виразом (3). Для цього оцінимо m з урахуванням виконання раніше відзначеного відношення амплітуд.

Так, за $r = 12\,000$ для $m = 2,2$ відношення амплітуд становить 0,17, а для $m = 2,5$ це відношення вже дорівнює 0,059.

За $r = 14\,000$ для $m = 2,2$ відношення амплітуд становить 0,13, а для $m = 2,5$ воно має значення 0,035.

За $r = 15\,000$ для $m = 2$ відношення амплітуд становить 0,23, а для $m = 2,5$ це відношення дорівнює 0,025.

За $r = 20\,000$ для $m = 2$ відношення амплітуд становить 0,14, а для $m = 2,5$ це відношення має значення 0,0053.

Якщо обмежитися другим знаком після коми у відношенні амплітуд, то за збільшення r в 1,17 рази відбувається зменшення тривалості сигналу АЕ в 1,1 рази.

За збільшення r в 1,25 рази тривалість сигналу АЕ зменшується в 1,16 рази, а за збільшення r в 1,67 рази – в 1,4 рази.

Зі зростанням r спостерігається зростання крутизни падіння заднього фронту сигналу АЕ. При цьому відбувається трансформація форми сигналу, який поступово наближається до сигналу трикутної форми.

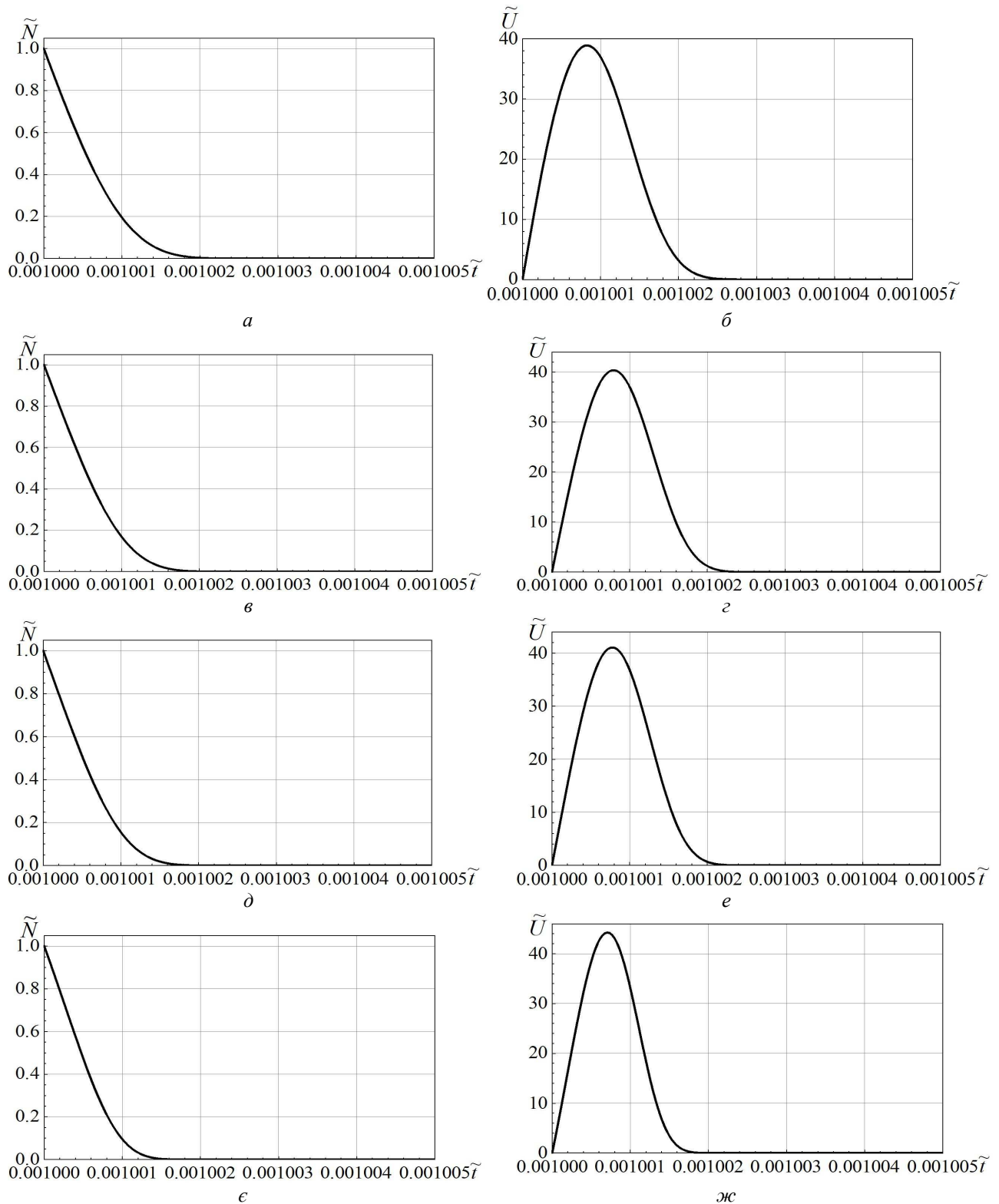


Рис. 4. Зміна кількості залишених елементів (*a, б, в, г*) і сигналів АЕ (*б, з, е, жс*) при руйнуванні композиційного матеріалу в часі під дією поперечної сили ($\nu_0 = 1\,000\,000$, $\alpha = 100$, $g = 0,1$, $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395010584848$, $\tilde{t}_0 = 0,001$):

a, б – $r = 12\,000$;

б, з – $r = 14\,000$;

д, е – $r = 15\,000$;

е, жс – $r = 20\,000$

Отримані закономірності зміни параметрів сигналів АЕ узгоджуються з уявленнями про те, що зменшення неоднорідності композиційного матеріалу (дисперсності його властивостей за міцністю) приводить до зменшення діапазону значень граничних деформацій руйнування $[\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}]$ і, як наслідок, до зменшення часу руйнування.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що збільшення швидкості навантаження композиційного матеріалу призводить до нелінійного зростання параметрів сигналів АЕ. Під час цього основні закономірності зміни форми і параметрів сигналів АЕ зберігаються такими ж, як і за малих швидкостей навантаження. Проте збільшення швидкості навантаження приводить до великих числових значень зміни параметрів сигналів АЕ. Спостерігається більше зростання амплітуди й більше зменшення часових параметрів сигналів.

Результати дослідження також показують, що зменшення неоднорідності композиційного матеріалу (зменшення дисперсності його властивостей за міцністю) скорочує час перебігу процесу руйнування. Під час цього спостерігається зростання амплітуди та зменшення тривалості формованих сигналів АЕ. Виявлено трансформацію форми сигналу АЕ з поступовим її наближенням до трикутного сигналу.

Отримані закономірності зміни параметрів сигналів АЕ узгоджуються з уявленнями про те, що зменшення дисперсності матеріалу за міцністю приводить до зменшення діапазону значень граничних деформацій, за яких відбувається руйнування, і, як наслідок, до скорочення часу руйнування. Інтерес становлять дослідження закономірностей зміни процесу руйнування і формованих сигналів АЕ за зміни геометричних розмірів волокон (елементів) композиційного матеріалу.

Література

1. Kun F. Damage in fiber bundle models / F. Kun, S. Zapperi, H. J. Herrmann // Eur. Phys. J. B. – 2000. – Vol.17, No 2. – P. 269–279.
2. Moreno Y. Self-organized criticality in a fibre bundle-type model / Y. Moreno, J. B. Gomez, A. F. Pacheco // Physics A. – 1999. – Vol.274. – P. 400–409.
3. Kun F. Damage development under gradual loading of composites / F.Kun, H. J. Herrmann // Journal of Materials Science. – 2000. – Vol.35, No 18. – P. 4685–4693.

4. Nechad H. Creep ruptures in heterogeneous materials / H. Nechad, A. Helmstetter, R.E. Guerjouna, D. Sornette // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol.94, No 4. – P. 4.

5. Hemmer P. C. The Distribution of Simultaneous Fiber Failures in Fiber Bundles / P.C. Hemmer, A. Hansen // J. Appl. Mech. – 1992. – Vol.59, No 4. – P. 909–914.

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, No 3. – P. 718–728.

7. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems / Robert Shcherbakov / A dissertation for degree of doctor of philosophy. – Cornell university. – 2002. – 209 p.

8. Филоненко С.Ф. Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала / С.Ф. Филоненко, В.М.Калита, Т.В. Нимченко // Технологические системы. – 2009. – №2(46). – С. 17–25.

9. Филоненко С.Ф. Закономерности изменения параметров акустической эмиссии при разрушении хрупких композиционных материалов / С.Ф. Филоненко, В.М.Калита, Т.В. Нимченко // Технологические системы. – 2009. – №3(47). – С. 27–33.

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

11. Raischel F. Simple beam model for the shear failure of interfaces / F. Raischel, F. Kun, H.J. Herrmann // Phys. Rev.E. – 2005. – Vol.72, No 4. – P. 11.

12. Raischel F. Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder / F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann // Phys. Rev. E. – 2006. – Vol.74(2), No 3. – P. 4.

13. Филоненко С.Ф. Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів / С.Ф. Филоненко, В.М. Каліта, О.П. Космач // Вісник НАУ. – 2010. – № 1. – С. 133–141.

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

15. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения материалов / В.В Федоров. – Ташкент: ФАН, 1985. – 175 с.