

ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 620.179:534.6

С.Ф. Філоненко, д.т.н., проф.
В.М. Каліта, д.ф.-м.н., проф.
О.П. Космач, асп.

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний авіаційний університет

Описано руйнування композиційного матеріалу і формованого сигналу акустичної емісії залежно від виду руйнування волокон. Отримано залежності зміни осьового напруження, кількості волокон, що залишилися, і формованих сигналів акустичної емісії. Проведено аналіз закономірностей їх зміни.

акустична емісія, волокна, деформація, діагностика, згин, композиційний матеріал, напруження, розтяг, руйнування

Постановка проблеми

Діагностика матеріалів і конструкцій є важливою науково-технічною проблемою, яка пов'язана з забезпеченням їх експлуатаційної надійності. Для вирішення цієї проблеми використовують розрахункові й експериментальні методи, які ґрунтуються на аналізі різноманітної фізичної інформації.

Одним із найбільш перспективних методів, який відображає кінетику процесів, що виникають у твердих тілах під дією навантажень, є метод акустичної емісії (АЕ). Незважаючи на суттєві переваги методу (високу чутливість до процесів, які виникають у структурі матеріалів унаслідок їх деформування і руйнування на мікрорівні) його використання обмежено. Це зумовлено неоднозначною інтерпретацією АЕ інформації, яку отримують під час випробувань матеріалів.

Наслідком цього є й «обмеженість» розроблених критеріїв оцінювання стану виробів – критеріїв безпеки джерел випромінювання, які використовуються в стандартах на метод АЕ. В цьому аспекті важливе значення мають теоретичні дослідження процесів випромінювання і формованих сигналів АЕ внаслідок деформування та руйнування матеріалів.

Такі дослідження дозволяють моделювати сигнали АЕ залежно від впливових факторів, аналізувати інформативність і закономірності зміни їх параметрів та розробляти критерії оцінювання безпеки процесів, що розвиваються в структурі матеріалів і впливають на втрату несучої здатності виробів.

Складність подібних досліджень зумовлено наявністю широкого класу матеріалів, які виготовляють за різними методами і перебувають у

різному структурному стані. Деформування пластичних, крихких, кристалічних, композиційних матеріалів може перебігати за різноманітними механізмами нагромадження пошкоджень і руйнування, які супроводжуються випромінюванням сигналів АЕ. Тому розроблення моделей сигналів АЕ із врахуванням особливостей будови твердих тіл і концепцій їх руйнування є важливим напрямом досліджень проблеми технічної діагностики виробів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для розроблення моделей сигналів АЕ, які формуються в процесі деформування і руйнування матеріалів, використовують три основні підходи [1–5]:

– моделі, які ґрунтуються на визначенні зміни полів напружень зі зростанням в матеріалі тріщин з використанням розрахунково-аналітичних методів;

– моделі, які ґрунтуються на випадковості процесів, що призводять до формування акустичного випромінювання, коли сигнал АЕ розглядається як стохастичний сигнал на виході приймального перетворювача, передусім визначають параметри, які характеризують випадковий процес, що розвивається в структурі матеріалу;

– моделі, які засновані на фізичних уявленнях про процеси перебігу пластичної деформації і зростання тріщин (руйнування матеріалів).

Фізичні моделі становлять найбільший інтерес, оскільки вони дозволяють визначати взаємозв'язки параметрів сигналів АЕ з параметрами процесів, що розвиваються, а також враховувати різноманітні фактори, які впливають на перебіг цих процесів [6; 7].

Проте під час побудови моделей не розглядаються особливості структурного стану матеріалів, виготовлених різноманітними способами, наприклад, литтям, спіканням та ін.

Особливим класом матеріалів є композиційні матеріали, які широко використовують у процесі виготовлення конструкцій авіаційної та автомобільної промисловості, суднобудуванні, будівництві, металообробці та інших галузях. Досліджуючи процеси руйнування таких матеріалів, використовують концепцію, яка ґрунтується на поданні матеріалу в вигляді пучка волокон (fiber bundle model) [8–12].

Згідно з концепцією, руйнування композиційного матеріалу являє собою процес послідовного руйнування волокон у пучку з певним перерозподілом напружень на волокна, що залишилися. Припущення, що основне навантаження витримують волокна і руйнування композиційного матеріалу відбувається за рахунок руйнування волокон, дійсне за таких умов.

По-перше, матриця є еластичною або має меншу міцність і її руйнування не призводить до руйнування матеріалу, оскільки зовнішнє навантаження витримує зв'язка (волокна). По-друге, матриця має більшу міцність ніж зв'язка. Тоді при пружному деформуванні руйнування починається з руйнування зв'язки, тобто волокон. Поступове накопичення зруйнованих волокон або субмікро-, мікротріщин призводить до повного руйнування матеріалу. Тобто руйнування зв'язки розглядається як основний процес, що веде до втрати несучої здатності й руйнування матеріалу. За таких умов властивості зв'язки, вплив поверхні розділу матриця-зв'язка та взаємодія окремих волокон (наприклад, тертя) на процеси руйнування композиційного матеріалу не розглядаються.

У результаті дослідження отримано аналітичні вирази, що описують зміну кількості волокон, які залишилися (незруйнованих), під час розвитку процесу їх руйнування [13–15].

З урахуванням експериментальних залежностей швидкості перебігу процесу руйнування волокон (швидкості зміни залишкових волокон, розроблено модель процесу АЕ випромінювання [16; 17]. Однак у цих працях не вдалося змоделювати самий сигнал АЕ. Це зумовлено тим, що згідно з моделлю в момент часу протягом повного руйнування композиційного матеріалу виникає невизначеність, яка зумовлена розривом функції зміни нагромадженної енергії АЕ подій (функція прямує до нескінченності).

Аналітичний вираз для сигналу АЕ, який формується у процесі руйнування композиційного матеріалу, у вигляді пучка волокон, отримано в праці [18]. Дослідження основних закономірностей зміни параметрів сигналів АЕ [19] показали, що, крім термоактиваційного механізму руйнування [18], необхідно враховувати і механічне руйнування волокон.

Модель руйнування композиційного матеріалу у вигляді пучка волокон, експериментальні дослідження [19–21], як відзначає автор праці [22], розглядають руйнування матеріалу в умовах розтягу. При цьому вважається, що деформація волокон є пружною до початку руйнування, а напруження на волокнах $\sigma(t)$ змінюється за лінійним законом згідно з законом зміни прикладеного навантаження. Значний інтерес становить аналіз руйнування композиційного матеріалу в умовах дії поперечного навантаження (зсув, зріз), які характерні для різноманітних виробів, що працюють в циклічних і динамічних режимах (вібрації, тертя, різання, шліфування та ін.). Модель руйнування композиційного матеріалу за таких умов побудована на розгляді напружень згину і розтягу, які виникають у разі прикладення до матеріалу поперечної сили [22; 23]. При цьому припускають, що волокна можуть руйнуватися з досягненням граничного значення або окремо деформації згину чи розтягу, або сумісного їх впливу одне на одного. Розроблена модель може бути покладена в основу аналізу АЕ при руйнуванні композиційного матеріалу в умовах прикладання поперечної сили, що важливо для розроблення методів діагностики виробів на основі композиційних матеріалів.

Мета дослідження – розглянути модель сигналу АЕ для процесу руйнування композиційного матеріалу, який має вигляд пучка волокон, при прикладенні до нього поперечної сили, визначити основні закономірності зміни кількості незруйнованих волокон у разі переваги руйнування згином, розтягом і одночасним згином з розтягом, а також закономірності зміни форми сигналів АЕ.

Модель руйнування композиційного матеріалу під дією поперечної сили

Для аналізу процесу руйнування композиційного матеріалу як вихідні умови припускаємо умови, які розглянуто в праці [22]. Будемо вважати, що композиційний матеріал складається з матриці та зв'язки, яка має N_0 волокон (елементів) однакового розміру. Волокна паралельні між

собою і рівномірно розподілені за об'ємом зразка. Припустимо, що до зразка прикладається поперечна сила ω , яка перпендикулярна до волокон. Вважатимемо, що за розглянутих умов втрата несучої здатності зразка композиційного матеріалу відбувається за рахунок руйнування волокон без урахування впливу матриці.

Припустимо, що при прикладанні до зразка поперечної сили ω волокна деформуються пружно, а відстань ℓ між площинами закріплення кожного волокна не змінюється (рис. 1).

За таких умов волокна зазнають згинального моменту m і піддані дії сили розтягу P , яка спричиняє деяке видовження волокон. Це видовження характеризується осьовою (поздовжною) деформацією ε . Розглянуті умови розширюються на окремі волокна (рис.1, а) і в цілому на весь зразок композиційного матеріалу (рис.1, б).

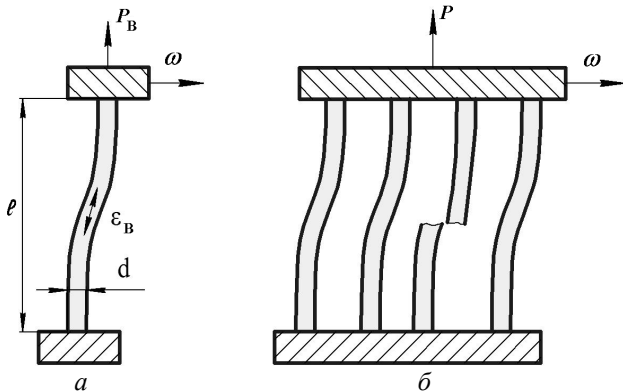


Рис. 1. Схема навантаження одного волокна (а) та групи волокон (б):

d – товщина волокна;
 P_σ – сила розтягу волокон

Будемо вважати, що волокна руйнуються послідовно. При цьому зовнішнє прикладене навантаження перерозподіляється рівномірно на волокна, що залишилися, які зазнають однакової зростаючої деформації. Взаємну механічну дію волокон одне на одного не будемо враховувати.

Відповідно до прийнятих умов у зразку можуть відбуватися два види руйнування волокон – через згин і розтяг. Автори праці [22] згин і розтяг, які виникають в результаті прикладення поперечної сили ω , пов'язують з осьовою деформацією волокон ε .

Припустимо, що міцність волокон визначається двома граничними значеннями деформації: розтягу ε_1 та згину ε_2 . Вони характеризуються деякою функцією щільності ймовірності $p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$. При цьому порогові значення ε_1 та ε_2

для волокон будуть мати випадкові значення між нижньою та верхньою межами відповідно $[\varepsilon_{1\min}, \varepsilon_{1\max}]$ і $[\varepsilon_{2\min}, \varepsilon_{2\max}]$ з деякою функцією щільності ймовірності $p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$. Тоді загальною умовою руйнування волокна буде вираз

$$\int_{\varepsilon_{2\min}}^{\varepsilon_{2\max}} d\varepsilon_2 \int_{\varepsilon_{1\min}}^{\varepsilon_{1\max}} d\varepsilon_1 p(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = 1,$$

який фіксує руйнування всіх волокон композиційного матеріалу.

Будемо вважати, що руйнування волокон згинном або розтягом відбувається незалежно.

Згідно з працею [22] умови руйнування волокна при розтягу та згині будуть мати вигляд

$$\frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon_1} \geq 1,$$

або

$$\frac{q(\varepsilon)}{\varepsilon_2} \geq 1,$$

де $f(\varepsilon)$, $q(\varepsilon)$ – функції відмови волокон.

Якщо волокно деформується пружно до руйнування, то функції відмови [22] будуть мати вигляд

$$f(\varepsilon) = \varepsilon, \quad q(\varepsilon) = \vartheta\sqrt{\varepsilon}, \quad (1)$$

де ϑ – коефіцієнт пропорційності.

Вираз (1) записаний в нормованому вигляді, вважаючи, що модуль Юнга дорівнює одиниці: $E=1$.

Кількість волокон, що залишаються в процесі руйнування, визначається зіставленням деформації до її граничного значення $f(\varepsilon) \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1\max}$ та $q(\varepsilon) \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{2\max}$. З урахуванням цих умов кількість незруйнованих волокон N_i буде описуватися виразом

$$\frac{N_i}{N_0} = \int_{\frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon_1}}^{\varepsilon_{2\max}} d\varepsilon_2 \int_{\frac{q(\varepsilon)}{\varepsilon_2}}^{\varepsilon_{1\max}} d\varepsilon_1 p(\varepsilon_1, \varepsilon_2). \quad (2)$$

За пружного деформування кожного волокна й умови того, що напруження на всіх волокнах однакові, загальне осьове напруження на волокнах можна отримати шляхом множення напруження на одному волоконі ($\sigma_i = \varepsilon$, якщо $E=1$) на відносну кількість цілих волокон (2). Тоді можна записати:

$$\sigma = \varepsilon \int_{\frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon_1}}^{\varepsilon_{2\max}} d\varepsilon_2 \int_{\frac{q(\varepsilon)}{\varepsilon_2}}^{\varepsilon_{1\max}} d\varepsilon_1 p(\varepsilon_1, \varepsilon_2). \quad (3)$$

Вираз (3) є загальним виразом, що описує макроскопічну поведінку зразка, механізми руйнування волокон якого визначаються розподілом щільності ймовірності граничних рівнів за міцністю $p(\epsilon_1, \epsilon_2)$. У наближенні незалежного руйнування волокон можна записати

$$p(\epsilon_1, \epsilon_2) = p_1(\epsilon_1) p_2(\epsilon_2), \quad (4)$$

де $p_1(\epsilon_1)$ та $p_2(\epsilon_2)$ – щільності ймовірності, які характеризують міцність волокон за їх граничною деформацією відповідно у разі розтягу та згині.

З урахуванням (4) можна записати вираз для кількості незруйнованих волокон у вигляді

$$\frac{N_i}{N_0} = \int_{q(\epsilon)}^{\epsilon_{2max}} d\epsilon_2 \int_{f(\epsilon)}^{\epsilon_{1max}} d\epsilon_1 p(\epsilon_1, \epsilon_2) = [1 - P_2(q(\epsilon))][1 - P_1(f(\epsilon))], \quad (5)$$

де $P_2(q(\epsilon))$, $P_1(f(\epsilon))$ – функції розподілу.

Із виразу (8) випливає, що врахування руйнування волокон приводить до нелінійної залежності напруження на волокнах, незважаючи на те, що деформування самих волокон відбувається лінійним шляхом (з виконанням закону Гука). Дійсно, з урахуванням рівняння (5) у загальному випадку для напруження можна записати

$$\sigma = \epsilon \int_{q(\epsilon)}^{\epsilon_{2max}} d\epsilon_2 \int_{f(\epsilon)}^{\epsilon_{1max}} d\epsilon_1 p(\epsilon_1, \epsilon_2) = \epsilon [1 - P_2(q(\epsilon))][1 - P_1(f(\epsilon))]. \quad (6)$$

Якщо волокна руйнуються незалежно, то вираз (6) в інтервалі деформацій на перетині діапазонів $[\epsilon_{1min}, \epsilon_{1max}]$ та $[\epsilon_{2min}, \epsilon_{2max}]$ набуває вигляду

$$\sigma = \epsilon \frac{\epsilon_{1max} - f(\epsilon) \quad \epsilon_{2max} - q(\epsilon)}{\epsilon_{1max} - \epsilon_{1min} \quad \epsilon_{2max} - \epsilon_{2min}}.$$

Тоді вираз для кількості волокон, що залишилися, буде мати вигляд

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{\epsilon_{1max} - f(\epsilon) \quad \epsilon_{2max} - q(\epsilon)}{\epsilon_{1max} - \epsilon_{1min} \quad \epsilon_{2max} - \epsilon_{2min}}.$$

З урахуванням виразу (4) та граничних значень деформацій, величини яких визначаються закономірностями зміни $f(\epsilon)$ та $q(\epsilon)$, отримуємо рівняння

$$\sigma = \epsilon \frac{\epsilon_{1max} - \epsilon \quad \sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon_{1max} - \epsilon_{1min} \quad \sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\epsilon_{2min}}}, \quad (7)$$

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{\epsilon_{1max} - \epsilon \quad \sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon_{1max} - \epsilon_{1min} \quad \sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\epsilon_{2min}}}. \quad (8)$$

Вирази (7) і (8) дозволяють виконати розрахунки залежності для напруження та кількості незруйнованих волокон при деформуванні композиційного матеріалу, коли відбуваються два процеси руйнування волокон розтягом і згином. Руйнування волокон буде супроводжуватися процесом акустоемісійного випромінювання, амплітуду якої можна розрахувати, використовуючи вираз (8).

Модель сигналу акустичної емісії

Для отримання часового ходу сигналу АЕ будемо вважати, що деформування зразка композиційного матеріалу відбувається з постійною швидкістю, тобто залежність зміни деформації в часі має вигляд

$$\epsilon = \alpha t \quad (9)$$

де $\alpha = \text{const}$ – швидкість навантаження.

Основні умови формування сигналу АЕ будуть такими ж, як у праці [18]. Будемо вважати, що руйнування кожного волокна композиційного матеріалу приводить до формування одиничного імпульсу збурення. Припустимо, що одиничний імпульс збурення, який поширюється в матеріалі у вигляді імпульсу зміщення, має вигляд, показаний на рис.2.

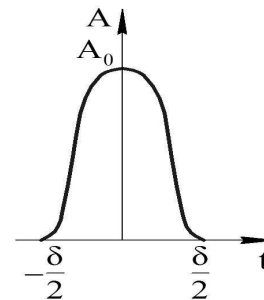


Рис. 2. Імпульс збурення при руйнуванні волокна (елементарного об'єму) композиційного матеріалу: A_0 – амплітудне значення одиничного імпульсу збурення; δ – тривалість збурення

Будемо вважати, що тривалість імпульсу збурення δ мала і набагато менша від часу руйнування зразка. Релаксаційні процеси, що виникають у разі поширення імпульсу збурення у вигляді імпульсу зміщення враховувати не будемо, тобто вважаємо, що імпульс зміщення поширюється без загасання.

За таких умов результуюче зміщення, яке формується в процесі руйнування волокон, буде визначатися кількістю імпульсів, що виробляються за одиницю часу, тобто пропорційно швидкості руйнування волокон $D(t)$, яку визначимо у вигляді

$$D(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dN_P(t)}{dt} = -\frac{1}{N_0} \frac{dN_i(t)}{dt}, \quad (10)$$

де N_P – кількість зруйнованих волокон, яке дорівнює $N_P = N_0 - N_i$, що враховано у виразі (10).

Оскільки кожне волокно руйнується за деякого граничного значення осової деформації, то амплітуда імпульсу збурення буде визначатися його величиною. Чим більша граничне значення, тим більша амплітуда імпульсу збурення. Тому будемо вважати, що $A_0(t) \sim \varepsilon(t)$.

Зауважимо, що до досягнення граничного напруження (руйнування) деформування волокна відбувається пружно. Тоді в загальному випадку імпульс збурення буде мати вигляд

$$A(t, \tau) = A_0(t) a(\tau), \quad (11)$$

де $a(\tau)$ – функція, яка визначає форму імпульсу збурення, яку будемо вважати однаковою для всіх зруйнованих волокон.

При цьому будемо вважати, що функція $a(\tau)$ має одиничну амплітуду. З врахуванням рівняння (9) вираз (11) перепишемо у вигляді

$$A(t, \tau) = \beta \varepsilon(t) a(\tau), \quad (12)$$

де A_0 – амплітуда одиничного імпульсу збурення; β – коефіцієнт пропорційності.

Руйнування волокон на відрізку часу $[t - \delta/2, t + \delta/2]$ формує сумарне зміщення $U(t)$, яке визначається інтегралом вигляду

$$U(t) = \int_{t-\frac{\delta}{2}}^{t+\frac{\delta}{2}} A_0(t) a(\tau) D(t+\tau) d\tau. \quad (13)$$

Оскільки тривалість збурення δ набагато менша від часу перебігу процесу руйнування зразка, то для інтервалу $[t - \delta/2, t + \delta/2]$ зміною величин $D(t)$ і $A_0(t)$ можна знехтувати. Тоді вираз (13) набуде вигляду

$$U(t) = N_0 D(t) A_0(t) \int_{t-\frac{\delta}{2}}^{t+\frac{\delta}{2}} a(\tau) d\tau. \quad (14)$$

Інтеграл у виразі (14) позначимо δ_s . Його числове значення визначається формою одиничного імпульсу збурення і має розмірність часу.

У результаті часовий хід результуючого зміщення буде мати вигляд

$$U(t) = U_0 \alpha t D(t), \quad (15)$$

де $U_0 = N_0 \beta \delta_s$ – постійна величина.

Якщо перетворювач для реєстрації сигналу АЕ є широкосмуговий, то електричний сигнал на його виході буде повністю повторяти імпульс зміщення, згідно з виразом (15).

Для розрахунку сигналу АЕ необхідно виконати розрахунки швидкості руйнування волокон $D(t)$, яку містить вираз (15). Для проведення таких розрахунків розглянемо ряд випадків перебігу процесу руйнування.

Спочатку розглянемо випадок переважного руйнування волокон за рахунок розтягу, припускаючи, що інтервали $[\varepsilon_{1\min}, \varepsilon_{1\max}]$ і $[\varepsilon_{2\min}, \varepsilon_{2\max}]$ не перетинаються. При цьому перший інтервал має менші граничні значення. З урахуванням залежності (9) для напруження на волокнах і відносного числа незруйнованих волокон можна записати:

$$\sigma = \alpha t \frac{\varepsilon_{1\max} - \alpha t}{\varepsilon_{1\max} - \varepsilon_{1\min}}, \quad (16)$$

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{\varepsilon_{1\max} - \alpha t}{\varepsilon_{1\max} - \varepsilon_{1\min}}. \quad (17)$$

У виразах (16) і (17) поточний час повинен мати значення на відрізку $[t_{1\min}, t_{1\max}]$, який відповідає інтервалу деформацій, тобто

$$t_{1\min} = \frac{\varepsilon_{1\min}}{\alpha}, \quad t_{1\max} = \frac{\varepsilon_{1\max}}{\alpha}.$$

З урахуванням рівняння (16) вираз (15) для сигналу АЕ набуває вигляду

$$U(t) = U_0 \frac{\alpha t}{t_{1\max} - t_{1\min}}. \quad (18)$$

Із виразу (18) випливає, що амплітуда сигналу АЕ буде зростати в процесі руйнування волокон зразка. При цьому потужність сигналу АЕ буде пропорційна квадрату часу, тобто має зростати за параболічного закону.

Якщо ширина інтервалу $[t_{1\min}, t_{1\max}]$ набагато менша від часу введення навантаження, тобто $t \ll t_{1\max} - t_{1\min}$, то вираз для сигналу АЕ набуде вигляду

$$U(t) \approx U_0 \frac{\alpha t_{1\min}}{t_{1\max} - t_{1\min}}. \quad (19)$$

Із рівняння (19) випливає, що при руйнуванні волокон з рівно розподіленою міцністю (мінімальним інтервалом граничних значень ε_1) сигнал АЕ матиме прямокутну форму.

При цьому тривалість сигналу буде обернено пропорційною швидкості деформування, а амплітуда сигналу навпаки – прямо пропорційною швидкості деформування.

Результати моделювання зміни напруження згідно з виразом (16), кількості залишених (незруйнованих) волокон згідно з (17) і сигналу АЕ згідно з (18) у відносних одиницях показано на рис. 3 (швидкість деформування $\alpha=100$, $\epsilon_{1min} = 10$, $\epsilon_{1max} = 50$, $t_{1min} = 0,1$, $t_{1max} = 0,5$).

Для побудови графіків всі параметри, що входять у вирази (16), (17), (18), зведено до безрозмірних величин, а час подано в нормованих одиницях.

Отримані результати показують, що руйнування композиційного матеріалу характеризується виникненням нелінійності в залежності зміни напруження від деформації і супроводжується випромінюванням АЕ. Очевидно, що реєструвати відхилення від лінійного ходу в залежності для осьового напруження $\sigma(t)$ на волокнах складно, особливо в умовах експерименту. Водночас початку процесу руйнування відповідає виникнення потоку імпульсів збурення, що формують сигнал АЕ. У цьому випадку визначення досягнення критичного навантаження, починаючи з якого руйнується композиційний матеріал, значно спрощується. Якщо $t_{1max}/2 > t_{1min}$, то максимум залежності $\sigma(t)$ буде в момент часу t_{1min} , де хід $\sigma(t)$ буде зазнавати зламу.

У разі переважного руйнування волокон за рахунок згину будемо припускати, що інтервали $[\epsilon_{1min}, \epsilon_{1max}]$ і $[\epsilon_{2min}, \epsilon_{2max}]$ не перетинаються. Однак значення другого інтервалу менше за значення першого. Тоді для напруження на волокнах і відносного числа незруйнованих волокон можна записати

$$\sigma = \alpha t \frac{\sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\alpha t}}{\sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\epsilon_{2min}}}, \tag{20}$$

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{\sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\alpha t}}{\sqrt{\epsilon_{2max}} - \sqrt{\epsilon_{2min}}}. \tag{21}$$

У виразах (20) і (21) поточний час має набувати значення на відрізку $[t_{2min}, t_{2max}]$, який відповідає інтервалу деформацій, тобто $t_{2min} = \frac{\epsilon_{2min}}{\alpha}$,

$$t_{2max} = \frac{\epsilon_{2max}}{\alpha}.$$

Якщо $t_{2max} > (9t_{2min}/4)$, то максимум залежності $\sigma(t)$ досягається в момент часу, значення якого дорівнює $(4t_{2max}/9)$. В іншому випадку максимум для залежності $\sigma(t)$ буде в момент часу t_{2min} , де хід $\sigma(t)$ буде зазнавати зламу. З урахуванням рівності (20) сигнал АЕ (15) набудатиме вигляду

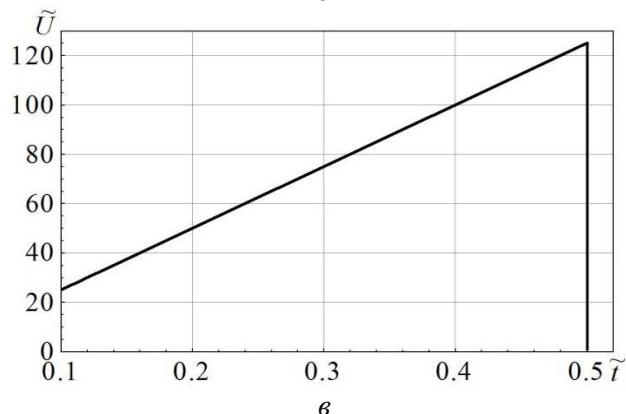
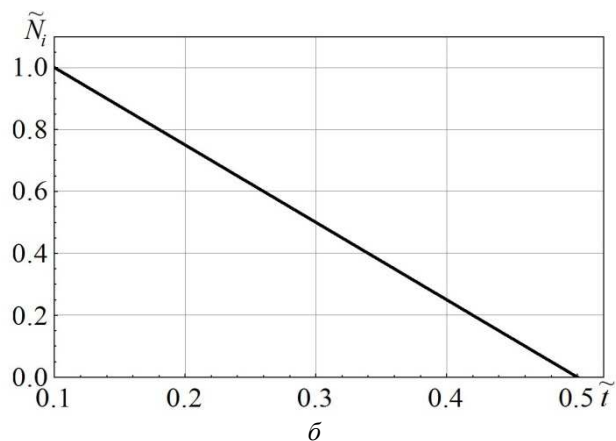
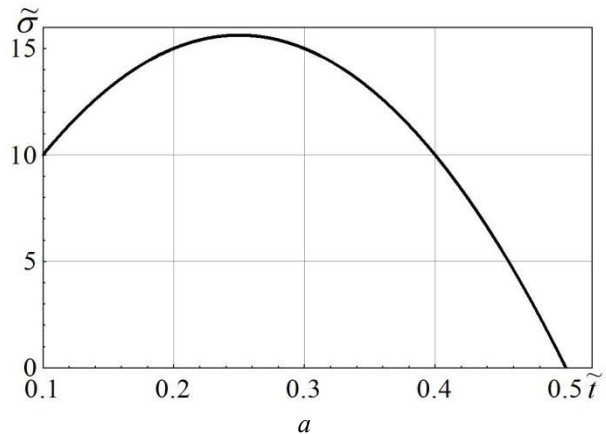


Рис. 3. Залежності зміни напруження (а), кількості незруйнованих волокон (б) і сигналу АЕ (в) у відносних одиницях при руйнуванні композиційного матеріалу за рахунок розтягу

$$U(t) = \frac{1}{2} U_0 \alpha \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t_{2\max}} - \sqrt{t_{2\min}}} \quad (22)$$

Із виразу (22) видно, що в процесі руйнування волокон амплітуда формованого сигналу АЕ зростає пропорційно кореню квадратному від часу. Відповідно потужність сигналу АЕ збільшується лінійно в часі.

Якщо ширина інтервалу $[t_{2\min}, t_{2\max}]$ менша від часу введення навантаження, тобто $t \ll t_{2\min} - t_{2\max}$, то вираз (22) можна записати у вигляді

$$U(t) \approx \frac{1}{2} U_0 \alpha \frac{\sqrt{t_{2\min}}}{\sqrt{t_{2\max}} - \sqrt{t_{2\min}}} \quad (23)$$

Згідно з виразом (23) сигнал АЕ теж має прямокутну форму. При цьому, як і в першому випадку, тривалість сигналу буде обернено пропорційна швидкості деформування, а амплітуда сигналу прямо пропорційна швидкості деформування.

Результати моделювання напруження згідно з рівнянням (20), кількості незруйнованих волокон згідно з (21) і сигналу АЕ згідно з (22) у відносних одиницях показано на рис. 4 (швидкість деформування $\alpha = 100$, $\epsilon_{2\min} = 2$, $\epsilon_{2\max} = 30$, $t_{2\min} = 0,02$, $t_{2\max} = 0,3$). При побудові графіків усі параметри, які входять у вирази (20), (21) і (22), зведено до безрозмірних величин, а час подано в нормованих одиницях.

Третій випадок – коли руйнування волокон відбувається, як за рахунок розтягу, так і за рахунок згину, тобто починається в один і той же час, тобто $t_{1\min} = t_{2\min}$. За таких умов з урахуванням (9) вирази (7) і (8) запишемо у вигляді

$$\sigma = \epsilon \frac{\epsilon_{1\max} - \alpha t}{\epsilon_{1\max} - \epsilon_{1\min}} \frac{\sqrt{\epsilon_{2\max}} - \sqrt{\alpha t}}{\sqrt{\epsilon_{2\max}} - \sqrt{\epsilon_{2\min}}}, \quad (24)$$

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{\epsilon_{1\max} - \alpha t}{\epsilon_{1\max} - \epsilon_{1\min}} \frac{\sqrt{\epsilon_{2\max}} - \sqrt{\alpha t}}{\sqrt{\epsilon_{2\max}} - \sqrt{\epsilon_{2\min}}}. \quad (25)$$

Тоді згідно з виразом (15) часова залежність сигналу АЕ набуде вигляду

$$U(t) = \frac{1}{2} U_0 \alpha \frac{t_{1\max} \sqrt{t} + 2t \sqrt{t_{2\max}} - 3t \sqrt{t}}{(t_{1\max} - t_{\min})(\sqrt{t_{2\max}} - \sqrt{t_{\min}})}, \quad (26)$$

де $t_{1\min} = t_{2\min} = t_{\min}$.

Максимум залежності $\sigma(t)$ згідно з виразом (24) буде в точці $\frac{4^2}{15^2} (\sqrt{t_{2\max}} + \sqrt{t_{2\max} + \frac{25}{16} t_{2\max}})^2$, якщо вона попадає в інтервал, який відповідає граничним напруженням.

Якщо ця точка лежить за межами цього інтервалу, то максимум $\sigma(t)$ буде відповідати моменту часу t_{\min} , коли напруження зазнає зламу, але залишається неперервним в часі. Крім того, вираз (26) виконується, починаючи з моменту $t = t_{\min}$ на інтервалі часу $[t_{\min}, t_{2\max}]$, якщо $t_{2\max} < t_{1\max}$, або на інтервалі $[t_{\min}, t_{1\max}]$, якщо $t_{1\max} < t_{2\max}$.

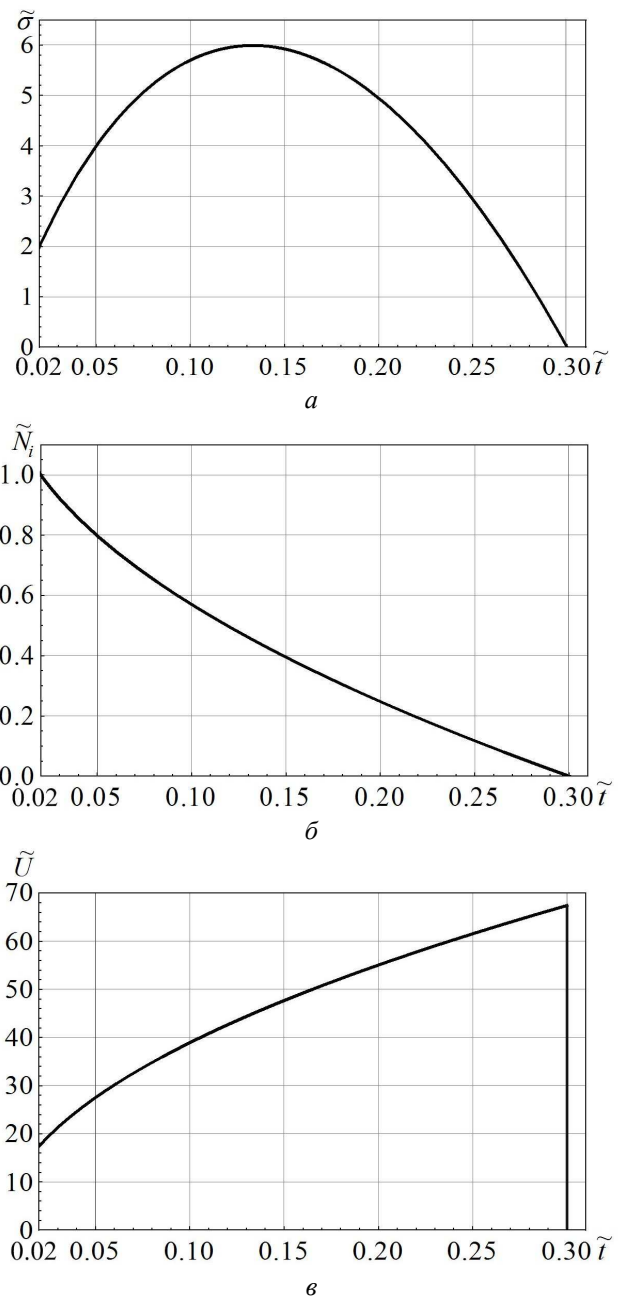


Рис. 4. Залежності зміни напруження (а), кількості незруйнованих волокон (б) і сигналу АЕ (є) у відносних одиницях при руйнуванні композиційного матеріалу за рахунок згину

Результати моделювання зміни напруження згідно з виразом (24), кількості незруйнованих волокон згідно з (25) і сигналу АЕ згідно з (26) у відносних одиницях показано на рис. 5 (швидкість деформування $\alpha=100$, $\varepsilon_{1\min}=5$, $\varepsilon_{1\max}=30$, $\varepsilon_{2\min}=5$, $\varepsilon_{2\max}=20$, $t_{1\min}=0,05$, $t_{1\max}=0,3$, $t_{2\min}=0,05$; $t_{2\max}=0,2$). При побудові графіків всі параметри, які входять у вирази (24), (25) і (26), зведено до безрозмірних величин, а час подано в нормованих одиницях.

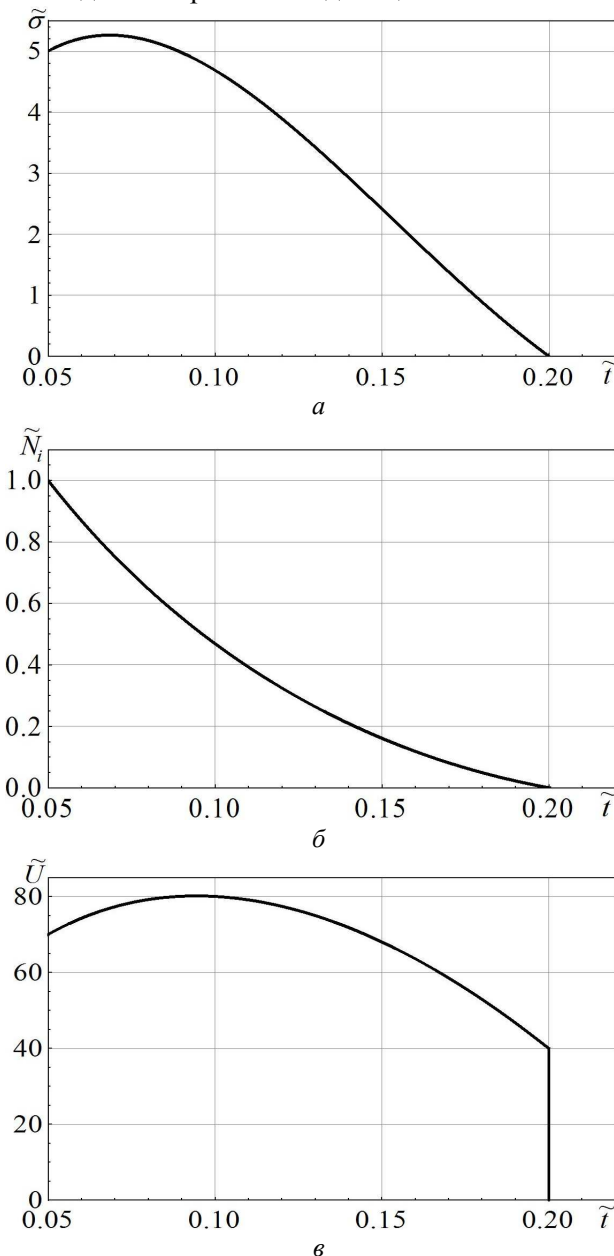


Рис. 5. Залежності зміни напруження (а), кількості залишених волокон (б) і сигналу АЕ (в) у відносних одиницях при руйнуванні композиційного матеріалу, за рахунок згину і розтягу

Сигнал АЕ згідно з виразом (26), отриманий за одночасного руйнування волокон розтягом і згином, не являє собою пряму суму двох сигналів від цих процесів. Про це свідчить поява в чисельнику виразу (26) третього доданка, який має від'ємний знак.

Із виразу (26) випливає, що руйнування композиційного матеріалу, що навантажується, за більш складного сценарію руйнування також супроводжується виникненням сигналу АЕ. Сигнал починається безпосередньо в момент часу початку руйнування волокон за рахунок або розтягу, або згину. Це означає, що незалежно від того, як саме руйнується матеріал АЕ, що реєструється, є показником досягнення критичного навантаження на волокнах композиційного матеріалу.

Висновки

У роботі виконано аналіз сигналів АЕ, формованих під час руйнування композиційного матеріалу, який навантажується поперечною силою. Проведений опис процесів є модельним і найпростішим. Однак якісно він дозволяє оцінити, яким чином змінюються пружні властивості зразка залежно від прикладеного навантаження. Показано, що основне напруження на волокнах змінюється під час їх руйнування в результаті досягнення критичних навантажень розтягу та згину. Це напруження змінюється безперервно. Однак на початку процесу руйнування напруження може мати злам або уповільнить зростання.

З таким характером зміни залежності осьового напруження в часі визначити (зафіксувати) початок процесу руйнування волокон зразка можна лише за умови виконання повного циклу навантаження, тобто або здійснивши його повне руйнування, або зруйнувавши більшу частину волокон у зразку композиційного матеріалу.

Водночас сигнали АЕ виникають (починають формуватися) безпосередньо в точці початку руйнування зразка незалежно від виду руйнування волокон (розтягом або згином). При цьому реєстрація сигналів АЕ в процесі навантаження композиційного матеріалу може бути використана для контролю досягнення граничнодопустимих навантажень, починаючи з яких відбувається незворотне руйнування композиційного матеріалу.

Однак реальні сигнали АЕ, які реєструються при випробовуваннях композиційних матеріалів мають більш складні форми, на відміну від розглянутих. Це зумовлено передусім найпростішим описом моделей, які передбачають поступове достатньо повільне руйнування волокон.

Крім того, при описі акустичного випромінювання не враховано більш складного характеру перерозподілу напружень в композиційному матеріалі, а також кінетику процесу руйнування, що потребує подальших досліджень.

Література

1. *Иванов В.И.* Акусто-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В.И. Иванов, В.М. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
2. *An information-measuring system for an acoustic emission signal selection and processing* / О. Bukhalo, В.Клим, Е.Почапский et al. // 15th World conf. On Non-Destr. Testing (15–21 October 2000 in Roma) 2000. – P. 78–82.
3. *Аки К.* Количественная сейсмология. Теория и методы / К. Аки, П. Ричардс. – М.: Мир, 1983. – Т.2. – 360 с.
4. *Бабак В.П.* Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Калита // Технологические системы. – 2002. – №1(12). – С. 26–34.
5. *Моделі сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів пар тертя* / В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Стадніченко, А.П. Стахова // Проблеми тертя та зношування. – 2007. – Вип.47. – С. 1–8.
6. *Бабак В.П.* Моделирование сигналов акустической эмиссии при скачкообразном развитии процессов разрушения / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Калита // Технологические системы. – 2005. – № 3(29). – С. 30–37.
7. *Filonenko S.F.* Modelling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers / S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova // Aviation. – 2008. – Vol. 12, No3. – P. 87–94.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *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.
13. *Newman W. I.* Time dependent fiber-bundles with local load sharing / W.I. Newman, S.L. Phoenix // Phys. Rev. E. – 2001. – Vol. 63, No 2. – P. 20.
14. *Coleman B.D.* Time dependence of mechanical breakdown phenomena / B.D. Coleman // J. Ap. Phys. – 1956. – Vol. 27, No 8. – P. 862–866.
15. *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.
16. *Shcherbakov R.* On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of philosophy / Robert Shcherbakov. – Cornell university. – 2002. – 209 p.
17. *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.
18. *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.
19. *Guarino A.* An experimental test of the critical behavior of fracture precursors / A. Guarino, A. Garcimartin, S. Ciliberto // Eur. Phys. J.B. – 1998. – Vol.6, No 1. – P. 13–24.
20. *Guarino A.* Failure time and microcrack nucleation / S. Ciliberto, A. Garcimartin // Europhys. Lett. – 1999. – Vol. 47, No4. – P. 456–461.

22. *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.

23. *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.

Стаття надійшла до редакції 12.01.10.

С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, О.П. Космач

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Национальный авиационный университет

акустическая эмиссия, волокна, диагностика, деформация, изгиб, композиционный материал, напряжения, разрушение, растяжение

Выполнен анализ сигналов акустических эмиссий, формируемых при разрушении композиционного материала под действием сдвигающего нагружения. Проведенное описание процессов является модельным и самым простым. Рассмотрено, каким образом изменяются упругие свойства образца в зависимости от прилагаемой нагрузки. Показано, что изменение осевого напряжения на волокнах происходит при их разрушении в результате критических нагрузок растяжения и изгиба. Установлено непрерывное изменение напряжения. Однако в начале процесса разрушения это напряжение может иметь излом или продолжать расти, но с меньшей скоростью. При таком характере изменения зависимости осевого напряжения во времени определить (зафиксировать) начало процесса разрушения волокон образца возможно лишь при условии выполнения полного цикла нагружения. Сигналы акустической эмиссии возникают (начинают формироваться) непосредственно в точке начала разрушения образца, независимо от вида разрушения волокон (растяжением или изгибом). Регистрация сигналов акустической эмиссии в процессе нагружения композиционного материала может быть выполнена для контроля предельно допустимых нагрузок, начиная с которых происходит необратимое разрушение композита. Реальные сигналы акустической эмиссии, которые регистрируются при испытаниях композиционных материалов, имеют более сложные формы, которые отличаются от рассмотренных. Это обусловлено, прежде всего, простым описанием представленных моделей, предусматривающих постепенное достаточно медленное разрушение волокон. Кроме того, при описании акустического излучения необходимо учитывать более сложный характер перераспределения напряжений в композиционном материале, а также кинетику процесса разрушения.

Sergiy F. Filonenko, Viktor M. Kalita, Oleksandr P. Kosmach

ACOUSTIC EMISSION AT LOADING OF COMPOSITE MATERIALS

National Aviation University

acoustic emission, bend, composite material, deformation, diagnostics, fibres, fracture, stress, stretch

The analysis of AE signals is executed, mouldable at destruction of composition material under the action of loading of change. Description of processes is conducted is model and simplest. It is considered, how resilient properties of standard change depending on the enclosed loading, and also it is rotined that the change of axial tension on fibres takes a place at their destruction as a result of achievement of the critical loadings of stretching and bending. This tension changes continuously. However at the beginning of process of destruction this tension can have breaking or continue to grow, but with less speed. At such character of change of dependence of axial tension in time to define (to fix) beginning of process of destruction of fibres of standard possibly only subject to the condition implementation of complete cycle of loading. It is rotined that the AE signals arise (begin to be formed) up directly in the point of beginning of destruction of standard, regardless of type of destruction of fibres (stretch or bend). Registration of AE signals in the process of loading of composite material can be executed for control of achievement of the maximum possible loadings, beginning which irreversible destruction of composite. It is marked, that the AE signals, which are registered at the tests of composite materials have pain composition forms which differ from considered, are real. It is conditioned, foremost, by the simplest description of the presented models which foresee gradual slow enough destruction of fibres. In addition, at description of acoustic radiation it is necessary to take into account more difficult character of redistribution of tensions in composite material, and also kinetics of process of destruction.