

УДК 620.179.534.6

УДК 620.179:534.6

С.Ф. Філоненко

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ В МАТЕРІАЛАХ ТА ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА СИГНАЛАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Подано короткий огляд використання методу акустичної емісії для класифікації джерел випромінювання сигналів.

Дослідження явища акустичної емісії (АЕ) при деформуванні і руйнуванні матеріалів та пошук основних закономірностей процесу випромінювання, з позицій практичного застосування, націлені на розробку методів, які дозволять провести діагностику стану матеріалів та виробів на початкових стадіях їх руйнування. У даному аспекті важливим є означення кінетики розвитку дефектів, що призводять до руйнування матеріалів.

В ряді робіт показана можливість використання АЕ для визначення моменту початку руху тріщини. В процесі проведення випробувань зразків зі сталі 65Г та алюмінієвого сплаву АМГ6 на позацентрове розтягування в роботі [1] побудовані діаграми змін параметрів сигналів АЕ та навантажень, прикладених до зразків. При аналізі отриманих залежностей відмічено відносне співпадіння моменту появи максимальної інтенсивності імпульсів АЕ з моментом початку руху тріщини, який визначали з використанням відомих методів аналізу діаграм деформування матеріалів. Присутність подібної закономірності показує, що метод АЕ – це метод раннього виявлення моменту початку руху тріщини, яке визначається по досягненню максимальної інтенсивності сигналів АЕ. Аналогічний висновок зроблено в роботі [2], де відмічено, що за навантаженням, яке відповідає максимальній інтенсивності сигналів АЕ, можна визначити коефіцієнт інтенсивності напруг. При цьому АЕ дозволяє отримувати більш повну інформацію про параметри тріщин та характер їх розвитку, ніж за допомогою традиційних методів, про що свідчать результати випробувань зразків з алюмінієвого сплаву Д16Т, які наведені в роботі [3]. В процесі статичного розриву зразків, з боковим надрізом та утомлено зрощеною тріщиною, записувались діаграми навантаження ÷ розкриття тріщини ($P-\Delta$), інтенсивність ÷ розкриття тріщини ($N-\Delta$) та амплітуда ÷ розкриття тріщини ($A-\Delta$) (рис.1). Проаналізувавши отримані діаграми, було показано, що за звичайною методикою навантаження, яке відповідає моменту початку руху тріщини, визначається 5%-ним відхиленням від прямої залежності ($P-\Delta$), що відмічено на рис.1 точкою P_Q . Однак різке зростання параметрів імпульсних потоків АЕ виникає при значно менших значеннях прикладених навантажень, що на рис.1 відмічено точкою P_N . Припускається, що P_N відповідає моменту початку руху тріщини і з записів АЕ цей момент визначається точніше, ніж із діаграми ($P-\Delta$).

Разом з тим визначення кількісного критерію для оцінки моменту початку руху тріщини є складною задачею. Після проведення дослідження процесу руйнування зразків зі сталі 12ХН4Д2МФЛ авторами роботи [4] було зроблено висновок, що єдиним припустимим

є визначення початку руху тріщини не з появи сигналів АЕ, а з моменту якісної зміни характеру випромінювання сигналів АЕ. Типові діаграми деформування зразків з реєстрацією сигналів АЕ наведені на рис.2. Поява могутнього безперервного випромінювання великої інтенсивності та амплітуди пов'язують з утворенням та розвитком тріщини.

В роботі [5] запропоновано підхід, заснований на відмінностях в параметрах сигналів, які реєструються при виникненні тріщин та при протіканні процесу пластичної деформації. При цьому для конкретного матеріалу емпіричним шляхом визначаються амплітуди сигналів АЕ, які відповідають протіканню процесу пластичної деформації, а потім при деформуванні матеріалів відбувається відстеження сигналів з даними амплітудами. Як тільки припиняється їх надходження, а загальна кількість сигналів різко збільшується, то цей момент можна вважати моментом початку руху тріщини.

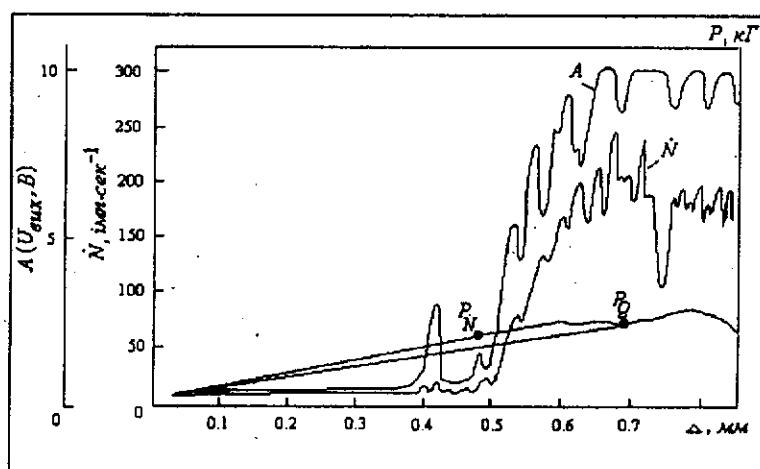


Рис.1.Інтенсивність та амплітуда сигналів АЕ при статичному зростанні тріщини

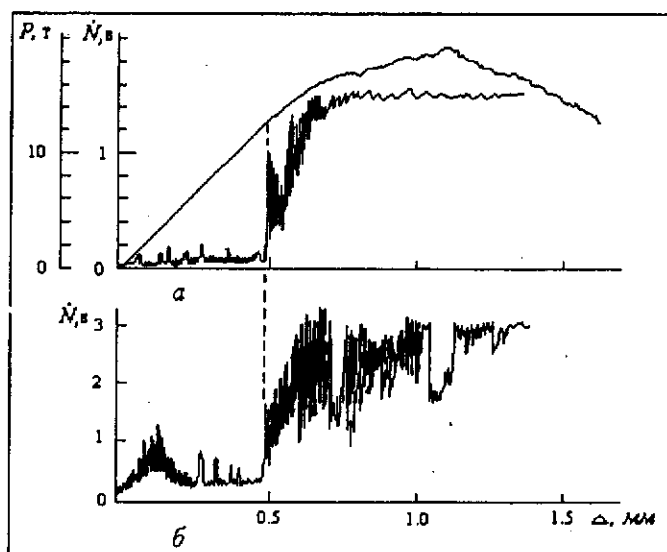


Рис.2. Типові поєднані діаграми навантаження $P \div \Delta$ - зміщення; інтенсивність $N \div \Delta$ - зміщення отримані в процесі випробувань зразків із сталі 12ХН4Д2МФЛ, товщиною 40 мм. Сигнали АЕ реєструвались приладами: а - АВН1-М; б - АФ-10

є визначення початку руху тріщини не з появи сигналів АЕ, а з моменту якісної зміни характеру випромінювання сигналів АЕ. Типові діаграми деформування зразків з реєстрацією сигналів АЕ наведені на рис.2. Поява могутнього безперервного випромінювання великої інтенсивності та амплітуди пов'язують з утворенням та розвитком тріщини.

В роботі [5] запропоновано підхід, заснований на відмінностях в параметрах сигналів, які реєструються при виникненні тріщин та при протіканні процесу пластичної деформації. При цьому для конкретного матеріалу емпіричним шляхом визначаються амплітуди сигналів АЕ, які відповідають протіканню процесу пластичної деформації, а потім при деформуванні матеріалів відбувається відстеження сигналів з даними амплітудами. Як тільки припиняється їх надходження, а загальна кількість сигналів різко збільшується, то цей момент можна вважати моментом початку руху тріщини.

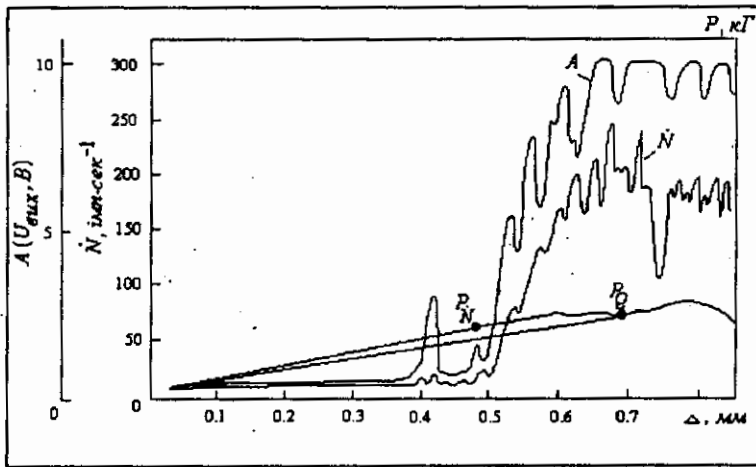


Рис. 1. Інтенсивність та амплітуда сигналів АЕ при статичному зростанні тріщини

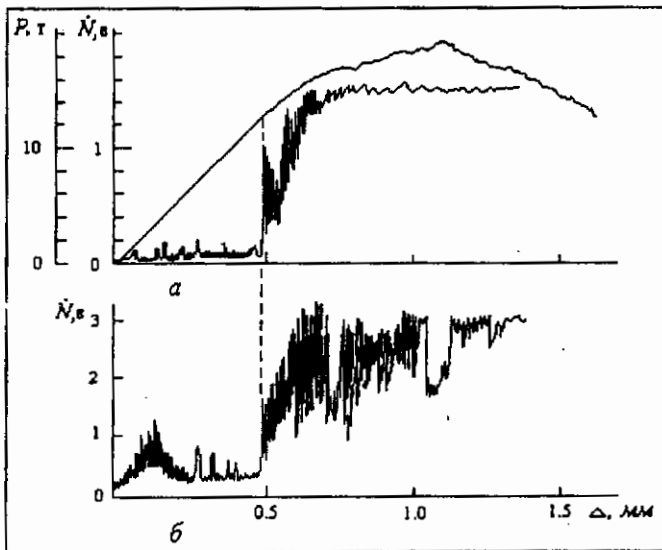


Рис.2. Типові поєднані діаграми навантаження $P \div \Delta$ - зміщення; інтенсивність $N \div \Delta$ - зміщення отримані в процесі випробувань зразків із сталі 12ХН4Д2МФЛ, товщиною 40 мм. Сигнали АЕ реєструвались приладами: а - АВН1-М; б - АФ-10

Розглянуті критерії визначення моменту початку руху тріщини - якісні. Вони засновані на контролі зміни характеру випромінювання сигналів АЕ і можуть призводити до різного роду помилок. Розглядаючи напівнескінченну тріщину нормального відриву в нескінченній пластині товщиною B , за умови пропорційності середньої кількості імпульсів АЕ та прирощення об'єму області пластичної деформації (що розглянуто в роботі [6]), тобто

$$N \sim V_n, \quad (1)$$

авторами роботи [7] отримано вираз зміни кількості імпульсів АЕ при відсутності зростання тріщини:

$$N_1 = \frac{\pi^2 a^* b^* B \delta}{16 \sigma_T^4} (K_I^4 - K_{I0}^4), \quad (2)$$

де a^* , b^* - розміри зони пластичної деформації, відображеної прямокутником; σ_T - межа текучості матеріалу; K_{I0} , K_I - межі зміни коефіцієнту інтенсивності напруг; δ - густина АЕ.

Залежність (2), як відмічено в роботі [6], витікає з виразу:

$$N = a K_I^m, \quad (3)$$

де a - константа, яка залежить від матеріалу та чутливості апаратури, що використовується для реєстрації сигналів АЕ; K_I - коефіцієнт інтенсивності напруг, при заданих аналогічних умовах.

При розвитку тріщини на деяку величину $\Delta \ell$

$$N_2 = \frac{\pi a^* b^* B \delta (K_{I0}^2 + K_I^2)}{8 \sigma_T^2} \left[\frac{\Delta \ell}{8 \sigma_T^2} (K_I^2 - K_{I0}^2) \right],$$

тобто зростання тріщини викликає випромінювання додаткової кількості імпульсів АЕ. Таким чином, можливе виявлення моменту початку руху тріщини при реєстрації АЕ по відхиленню кривої зміни кількості імпульсів від залежності, що описується виразом (2).

На реальних об'єктах, на відміну від модельних експериментів, які виконуються на спеціально підготовлених зразках, проблема інтерпретації інформації, яку отримано, залишається основною проблемою. Дослідження в даному напрямку зв'язані з аналізом параметрів індивідуальних сигналів АЕ для визначення механізму протікаючого процесу і оцінки стану матеріалів та виробів.

Аналіз процесів деформування та руйнування матеріалів, наведений в роботі [8], показує, що сигнали АЕ з низькими значеннями амплітуди та частоти свідчать про протікання процесу ковзання. Появі високочастотних гармонік відповідає виникнення та протікання процесу пластичної течії матеріалу, а їх зникнення пов'язане з розвитком процесу руйнування. Протікання розглянутих процесів аналізуються як джерела колективізованих випромінювань, обробку яких можна здійснити з використанням математичного апарату, наведеного в роботі [9], близького до теорії розпізнання образів. Даний апарат працює за умови статистичної репрезентативності сигналів АЕ та їх відповідності одному механізму деформування матеріалу. Обробка модельних даних, з використанням даного апарату, показує хороше розподілення джерел за спектральними компонентами. Однак в зв'язку з відсутністю еталонного атласу дефектів це розподілення відносне.

Інформацію про виникнення та розвиток тріщин в матеріалах, як відмічено в роботі [10], може нести і амплітудне розподілення сигналів, що реєструються. При цьому із зміною

характеру руйнування відбувається зміна не тільки вигляду амплітудного розподілу (рис.3), але й зміна місцезнаходження піків у розподілі. Аналогічні зміни спостерігаються і в характері розподілу тривалості сигналів АЕ, які розглянуті в роботах [11, 12].

Набір параметрів АЕ широкий та різноманітний. Разом з тим необхідні кількісні співвідношення, які дозволять оцінити стан об'єктів. В роботі [13] відмічено, що одним з найбільш вдалих параметрів вважається сумарний рахунок АЕ, оскільки він пов'язаний з амплітудою та тривалістю імпульсів АЕ, отже і з енергією процесу. Крім того, даний параметр легко реєструється та обробляється. Сумарний рахунок був вперше застосований в стандарті ASTM для класифікації джерел трьох груп: *C* – неактивні джерела – це джерела, для яких за час спостереження кількість імпульсів АЕ збільшується незначно; *B* – активні – це джерела, для яких залежність сумарного рахунку АЕ від навантаження умовно лінійна; *A* – критично активні – це джерела, для яких кількість імпульсів АЕ збільшується більш активними темпами (рис. 4). Ці означення та відсутність зростання параметрів сигналів АЕ в процесі навантаження об'єктів використовуються для проведення їх контролю у відповідності з кодами ASME.

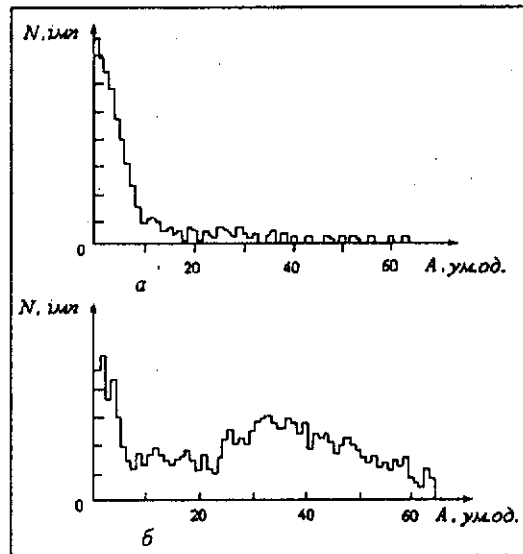


Рис.3. Амплітудний розподіл імпульсів АЕ: *a* – пластичного руйнування $Mo <110>$; *b* – крихкого руйнування при запізненому руйнуванні сколюванням $Mo <100>$; $T=273 K$, $\epsilon = 1.1 \cdot 10^{-4} c^{-1}$

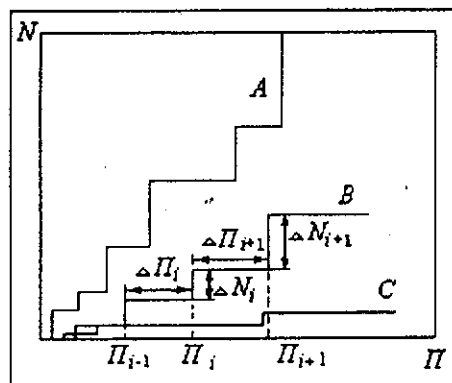


Рис.4. До класифікації джерел АЕ

Причому для кожного конкретного об'єкту та типу апаратури, що використовується (фірма виробник, модифікація апаратури), встановлюються граничні значення параметрів. Наприклад, при проведенні контролю посудин високого тиску і резервуарів з використанням апаратури та технології MONPAC (див. роботу [14]) критеріями оцінки є відсутність перевищення визначених значень параметрів, що контролюються: емісії в процесі витримки виробу під навантаженням, швидкості рахування, кількості імпульсів, амплітуди імпульсів та їх зростання в процесі зростання навантаження, активності. Контроль за параметрами відбувається при визначених рівнях встановлених порогів обмеження.

Розглядаючи залежність сумарної кількості викидів сигналів АЕ від коефіцієнту інтенсивності напруг в роботі [13] вираз (3) наводиться в більш загальній трактовці:

$$N = a\Pi^m, \quad (4)$$

де Π – може бути будь-яким параметром, наприклад: напругою, тиском, кількістю циклів, часом спостереження та таке інше. При аналізі виразу (4), відмічено, що у випадку в'язкого статичного руйнування довжина тріщини, на докритичній стадії, залишається постійною і вся зовнішня енергія витрачається на утворення пластичної зони у вершині тріщини. Якщо справедливе співвідношення (1), то показник ступеню $m = 4$. Оскільки збільшення довжини тріщини супроводжується розривом суцільності та притягненням нових об'ємів матеріалів в пластичну зону, то показник ступеню повинен зростати (аналогічний підхід використовується в роботі [7]). Базуючись на даному підході та аналізуючи вираз (4) з урахуванням приросту числа осциляцій ΔN_i при зростанні параметра Π на $\Delta\Pi_i$, на двох послідовних кроках $i+1$ та i (рис.4), запропоновано ряд критеріїв оцінки розвитку тріщини в матеріалах:

$$\frac{\Delta N_{i+1}}{\Delta N_i} > \left(1 + \frac{\Delta\Pi_{i+1}}{\Delta\Pi_i}\right)^3 \frac{\Delta\Pi_{i+1}}{\Delta\Pi_i}, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta N_{i+1}}{\Delta N_i} > \left(1 + \frac{\Delta\Pi_{i+1}}{\Delta\Pi_i}\right)^4 - 1, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta N_{i+1}}{\Delta N_i} > \left(1 + \frac{3\Delta\Pi_{i+1}}{\Delta\Pi_i}\right). \quad (7)$$

Співвідношення (5 ÷ 7) покладені в основу локально-динамічного критерію класифікації джерел випромінювання АЕ (дивись роботу [14]), у відповідності з прийнятими означеннями класу джерела випромінювання сигналів АЕ:

- джерело I класу – пасивне (реєструють для аналізу динаміки його наступного розвитку);

- джерело II класу – активне (реєструють і слідкують за розвитком ситуації в процесі виконання даного контролю);

- джерело III класу – критично активне (реєструють та слідкують за розвитком ситуації в процесі виконання даного контролю);

- джерело IV класу катастрофічно активне (роблять миттєве зменшення тиску до 0, або величини, при якій клас джерела знизиться до рівня I або II).

Технологія контролю побудована так. Для кожної зареєстрованої події АЕ вираховуються параметри W_{i+1} (відношення кількості викидів в наступній події до кількості викидів в попередній події АЕ) та

$$V_{i+1} = \left(1 + \frac{P_{i+1} - P_i}{P_{i+1}}\right)^4 - 1,$$

де P_{i+1} - значення зовнішнього параметра в момент реєстрації наступної події АЕ (якщо як параметр використовується час, то це відрізок часу від початку інтервалу спостереження); P_i - значення зовнішнього параметра в момент реєстрації попередньої події АЕ (якщо як параметр використовується час, то це відрізок часу від початку інтервалу спостереження).

Замість кількості викидів можна використовувати енергію події або квадрат амплітуди. За співвідношенням параметрів W_{i+1} та V_{i+1} здійснюється класифікація типу джерела випромінювання. Локально-динамічний критерій використовується як оцінка для кожного джерела сигналів АЕ.

Інтегральний критерій використовується для оцінки джерел на визначених інтервалах спостереження. Весь інтервал спостереження розбивається на K - інтервалів та визначається активність джерела сигналів АЕ по подіях:

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{k+1}}{N_k}, \quad (8)$$

де N_k - кількість подій на k -му інтервалі оцінки параметрів; N_{k+1} - кількість подій на $(k+1)$ -му інтервалі оцінки параметрів; $k=1, 2, 3, \dots, K$ - номер інтервалу оцінки параметрів.

Вираховується відносна сила J_k джерела АЕ на кожному інтервалі реєстрації параметрів:

$$J_k = A_k / W \sum_{k=1}^K A_k, \quad (9)$$

де A_k - середня амплітуда джерела на інтервалі k ; A_K - середня амплітуда всіх джерел АЕ, за виключенням джерел, які аналізуються на інтервалі k ; W - коефіцієнт, визначений в попередніх експериментах.

За співвідношенням параметрів F та J_k відбувається класифікація типу джерела випромінювання.

В стандарті NDIS 2412-80 (дивись роботу [15]) застосовується інтегрально-динамічний критерій, у відповідності з яким визначається ранг джерела випромінювання за розташуванням точки на площині в координатах $lgC \div lgE$ (C - коефіцієнт концентрації джерела; E - сумарна енергія джерела на інтервалі спостереження) та параметр P - характеризуючий динаміку енерговиділення джерела на інтервалі спостереження:

$$\begin{aligned} C &= N_i / R, \\ E &= \sum_{k=1}^K (A_k)^2 N_k, \\ P &= \frac{\sum_{k=1}^K \left(\frac{A_{k+1}}{A_k}\right)^2}{\sum_{k=1}^K k}, \end{aligned}$$

де R - середній радіус джерела.

За співвідношенням рангу джерела (використовуються чотири ранги) та параметра P проводиться класифікація джерел випромінювання.

В технології MONPAC для конкретних виробів встановлюються значення параметрів, які контролюються, а класифікацію джерел випромінювання здійснюють за таблицею значень "силового" та "історичного" індексів у відповідності з визначеннями:

A – незначне джерело, реєструється для урахування в майбутніх випробуваннях;

B – джерело, реєструється для урахування в майбутніх випробуваннях;

C – джерело, свідчить про наявність дефекту, що вимагає подальшого аналізу даних АЕ контролю;

D – джерело, свідчить про наявність значного дефекту, що вимагає наступного контролю з використанням інших методів;

E – джерело, свідчить про наявність великого дефекту, який вимагає термінового припинення навантаження та контролю іншими методами.

Якщо локально-динамічний критерій розглядає приріст параметрів в наступній події АЕ по відношенню до попередньої, то в технології MONPAC аналізується тонка структура всередині події АЕ, тобто аналізується зміна енергії в події АЕ в залежності від форми зареєстрованої події (початкова частина – "силовий індекс", кінцева частина – "історичний індекс").

Більш прості – це амплітудний або енергетичний критерії, які засновані на контролі за перевищенням амплітуди або енергії сигналів АЕ визначеного наперед заданого рівня. Дані критерії використовуються в усіх технологіях контролю для конкретних матеріалів та виробів.

Розглянуті критерії класифікації джерел випромінювання АЕ – це фактично критерії визначення моменту початку руху тріщини в матеріалі, в основі яких лежать результати спостережень поведінки АЕ при деформуванні та руйнуванні матеріалів: параметри сигналів АЕ від тріщин перевищують параметри сигналів від пластичної деформації (амплітудний, енергетичний, інтегральний, інтегрально-динамічний критерії); наявність залежності (3) та зміна показника ступеню - m при розвитку тріщин в матеріалі (локально-динамічний критерій); різниця в характері сигналів, що реєструються при протіканні процесів пластичної деформації та розвитку тріщин. В доповнення до цього відбувається контроль за загальною тенденцією в зміні параметрів сигналів.

В той же час необхідно враховувати, що значення критеріальних оцінок або клас джерела випромінювання є функцією одного з трьох або одночасно трьох взаємозв'язаних параметрів у відповідності з описанням критеріїв при незмінності параметрів електронної апаратури, яка використовується, тобто

$$K_u = f(t_k, U_p, W),$$

де t_k – інтервал аналізу (усереднення) інформації; U_p – поріг обмеження сигналів АЕ.

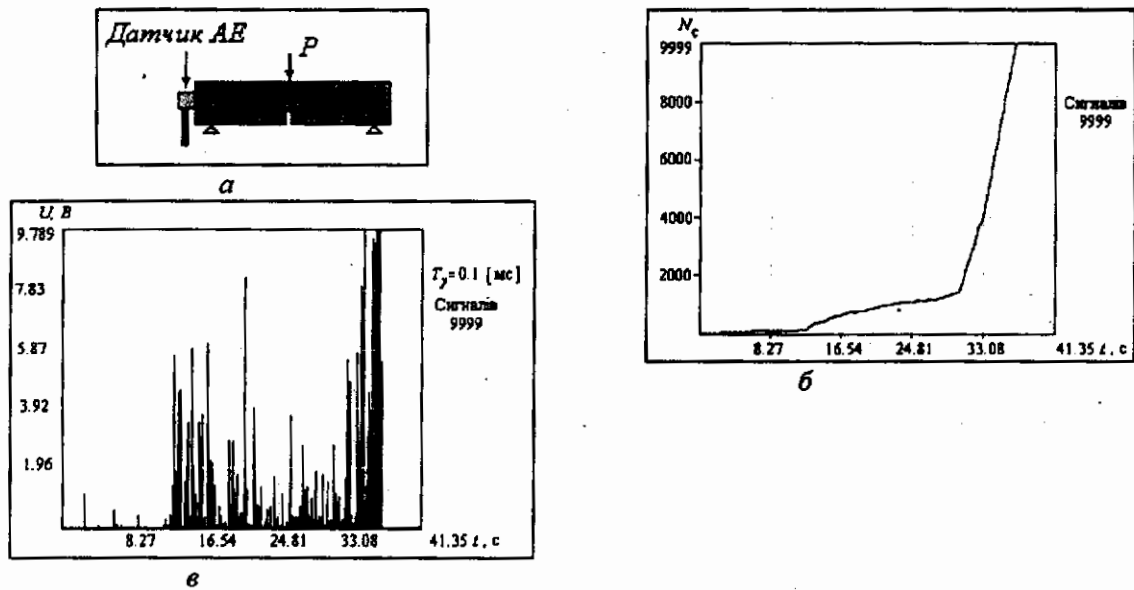


Рис.5. Випробування бруска с надрізом: а – схема навантаження; б – накопичення сигналів АЕ; в – усереднена амплітуда сигналів АЕ

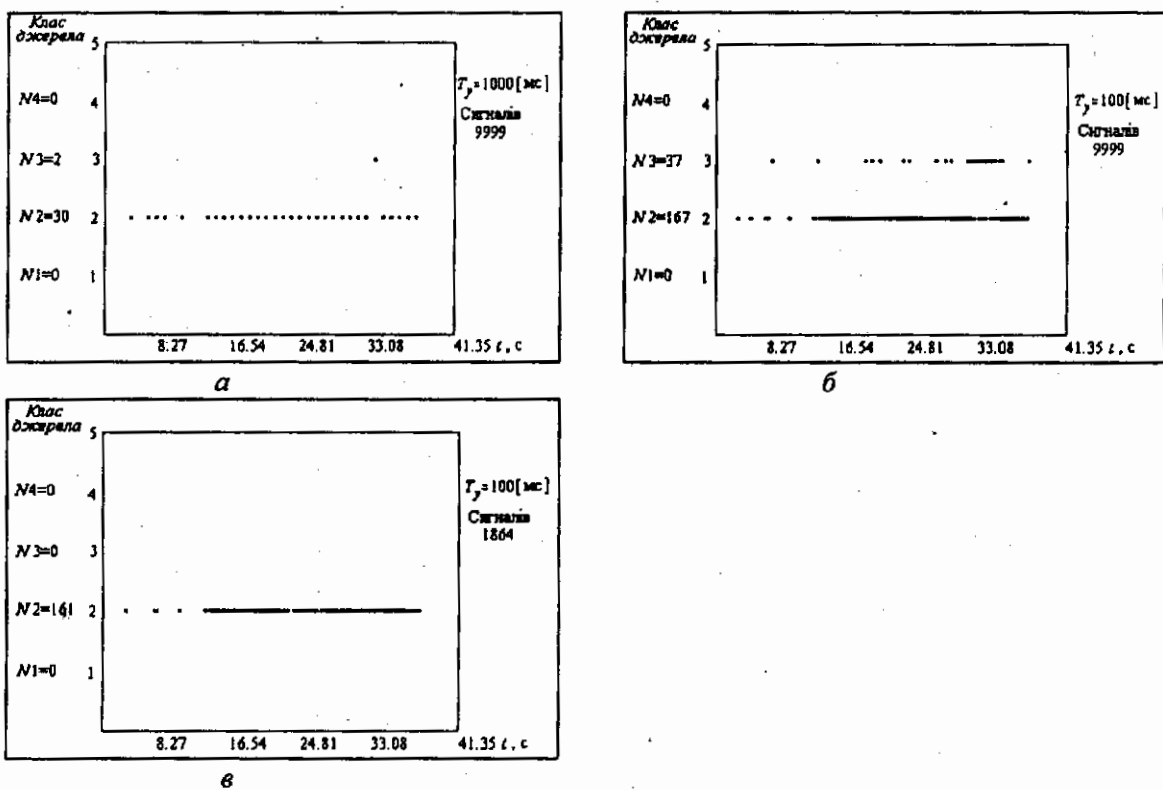


Рис. 6. Класифікація джерел випромінювання сигналів АЕ за інтегральним критерієм для даних, наведених на рис.5: а – $U_p=0, t_k=1 c, W=0,1$; б – $U_p=0, t_k=0,1 c, W=0,1$; в – $U_p=100 mB, t_k=1 c, W=0,1$

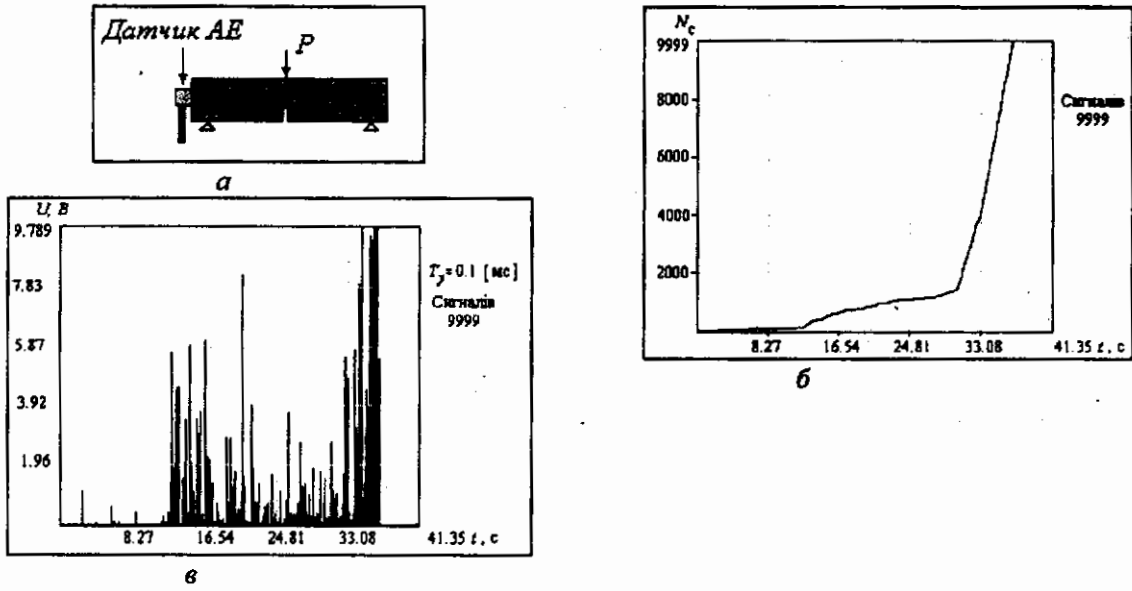


Рис.5. Випробування бруска з надрізом: а – схема навантаження; б – накопичення сигналів АЕ; в – усереднена амплітуда сигналів АЕ

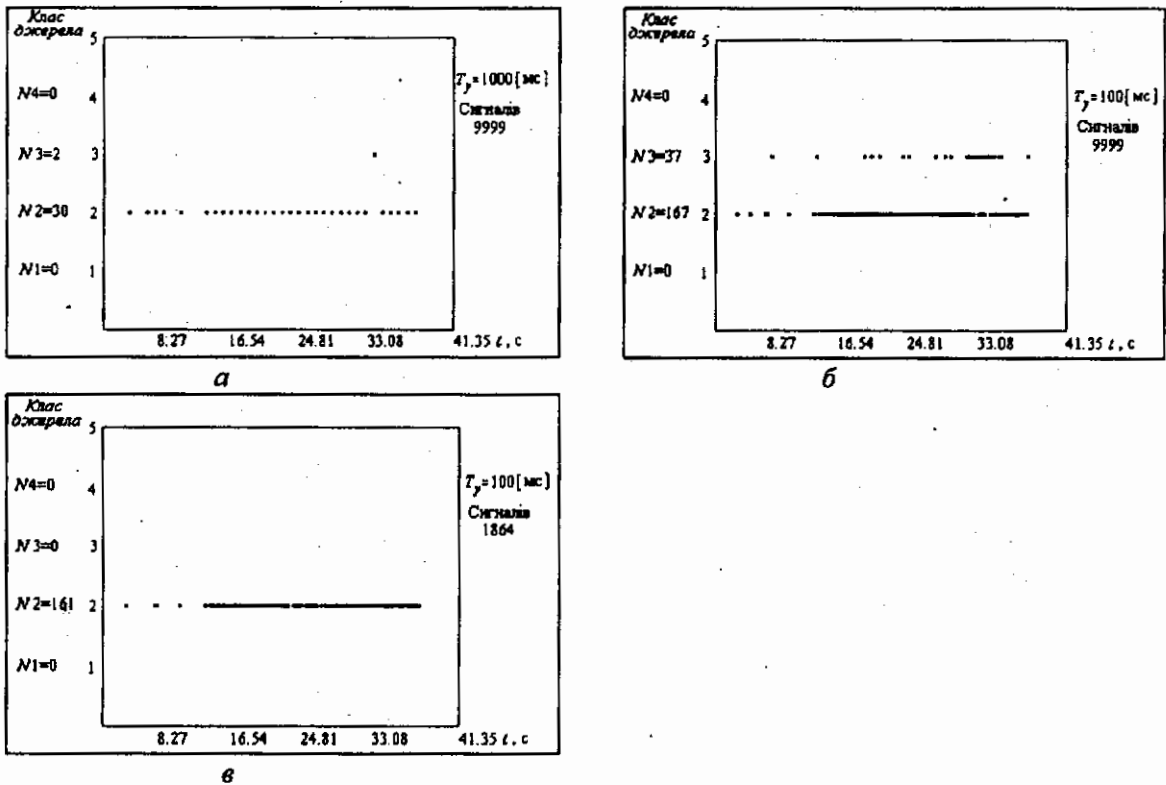


Рис. 6. Класифікація джерел випромінювання сигналів АЕ за інтегральним критерієм для даних, наведених на рис.5: а – $U_p=0, t_k=1\text{ с}, W=0,1$; б – $U_p=0, t_k=0,1\text{ с}, W=0,1$; в – $U_p=100\text{ мВ}, t_k=0,1\text{ с}, W=0,1$

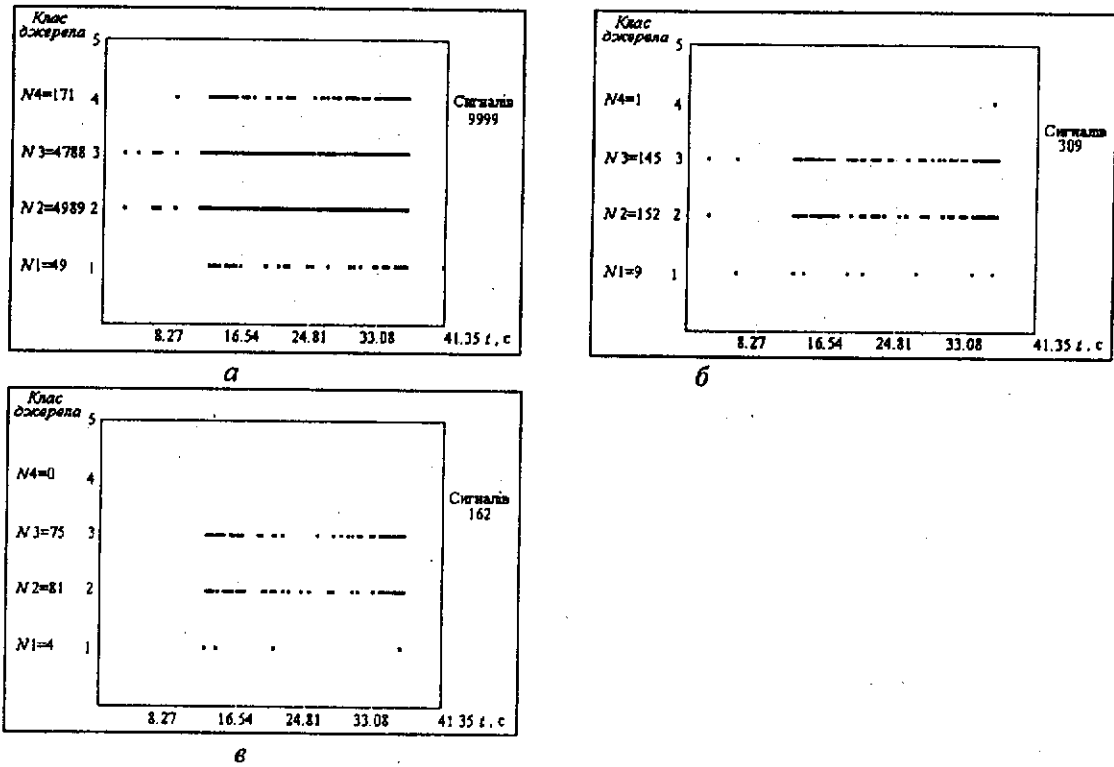


Рис.7.Класифікація джерел випромінювання сигналів АЕ за локально-динамічним критерієм з використанням енергії подій АЕ для даних, наведених на рис.5: а – $U_p=0$; б – $U_p=100$ мВ; в – $U_p=1В$

Із зміною значень взаємозв'язаних параметрів, зменшенням або збільшенням часу усереднення, порогу обмеження та параметра W відбувається перерозподіл джерел випромінювання за класами, у відповідності з прийнятою класифікацією для одних і тих же зареєстрованих сигналів АЕ, що потребує вибору даних параметрів в попередніх модельних експериментах з фіксацією розвитку тріщин. На рис.5 наведені результати обробки сигналів АЕ при випробуванні бруска, виготовленого із Ст.3, з центральним надрізом, на трьохточковий згин (брусок розміром 20 x 20 x 200 мм, надріз: ширина 1 мм, глибина 5 мм), а на рис.6, 7 результати обробки отриманих даних за інтегральним та локально-динамічним критеріями.

В роботі [16] при дослідженні процесів руйнування матеріалів отримано критерій оцінки виникнення та розвитку тріщин, який характеризує ступінь зміни густини енергії в отриманому сигналі АЕ:

$$K_{pj} = \lg(E_j/\tau_j^2) + B, \quad (16)$$

де E_j – енергія j -го сигналу АЕ; τ_j – його тривалість; B – константа, яка впливає на числове значення K_p .

Дослідження впливу чутливості апаратури на числове значення K_p при деякому заданому значенні порогу обмеження m та впливу порогу обмеження на числове значення K_p при незмінній чутливості тракту посилення сигналів, наведені в роботах [17,18], дозволили отримати поправочні коефіцієнти на числове значення K_p та показали ефективність використання даного критерію.

Для співставлення можливостей виявлення розвитку тріщин за критерієм K_p на рис.8 наведений типовий результат обробки сигналів АЕ з фіксацією сигналів від тріщин для даних, наведених на рис.5. Сигнали АЕ від тріщин (відмічено точкою А на рис.8) фіксуються задовго до початку лавиноподібного процесу руйнування, про що свідчить різкий перегин на кривій накопичення сигналів АЕ (рис.5, б). Штрихпунктирною лінією на рис.8 відзначено граничне значення K_a . Якщо $K_p > K_a$, то сигнал від тріщини. На рисунку кожна точка відповідає зареєстрованому сигналу АЕ.

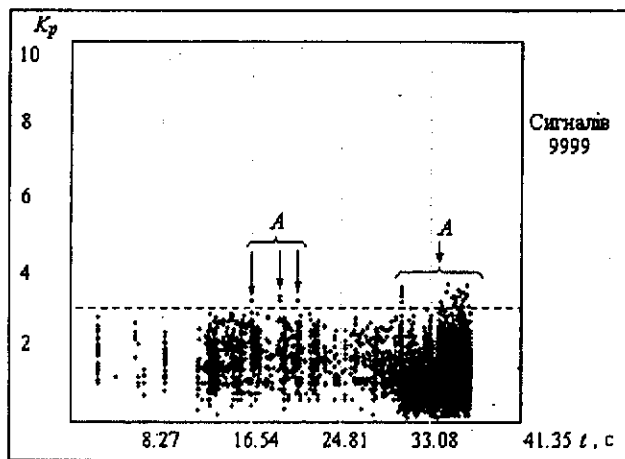


Рис.9.Критеріальна оцінка розвитку тріщин для даних, наведених на рис.6

Розглянуті критерії у тій чи іншій мірі дозволяють оцінити чи виявити появу та розвиток тріщин. Разом з тим розвиток дефектів відбувається з поступовим накопиченням ушкоджень в матеріалі, що потребує розробки критеріїв оцінки небезпеки та прогнозування подальшого розвитку дефектів.

Список літератури

1. Новиков Н.В., Лихацький С.И., Майстренко А.Л. Определение момента страгивания трещины акустическим методом при испытании образцов с надрезами на внецентренное растяжение. //Проблемы прочности.-1973.-№9.-С.21-25.
2. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий.- М: Изд-во стандартов, 1976.-272 с.
3. Вайнберг В.Е., Соседов В.Н., Кушнир А.М. Исследование роста трещин методом акустической эмиссии //Дефектоскопия.-1975.-№ 3.-С.127-129.
4. Смирнов В.И. Об оценке размеров дефектов методом акустической эмиссии с позиций линейной механики разрушения //Дефектоскопия.-1979.-№ 2.-С.45 - 50.
5. А.С. 873108 СССР, МКИ G 01 N 29/04. Способ определения момента страгивания трещины. /В.С.Иванов, Н.С.Кузнецов, Ю.А.Резников и др.-Опубл. 15.10.81, Бюл. № 38.
6. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic emission // Eng.Fract.Mechanics.-1968.-1, N 1.-P.105-122.
7. Гулевский И.В. Обнаружение устойчивого роста трещин методом акустической эмиссии. //Автоматическая сварка.-1984.-№ 5.-С.21-25.

8. Муравин Г.Б., Финкель В.М., Лезвинская Л.М. Исследование деформирования кремнистого железа методом акустической эмиссии //Дефектоскопия.–1984. – N10.–С.88–91.
9. Брагинский А.П., Евсеев Д.Г., Зданьски А.К. и др. Распознавание дефектов по спектральным характеристикам акустической эмиссии //Дефектоскопия.–1984.–№ 1.–С.47–54.
10. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов.– М: Наука, 1982.–108 с.
11. Wadin J.R., Dunegan H.L. The use of stial filtering distribution analysis of acoustic emission signals to isolate and characterize subcritical crack growth//3-d Acoust.Emiss.Symp. (Japan Industr.Planning Assoc.).–Токуо, Japan.–1976.– Р.183–193.
12. Маслов Л.А., Буров Б.П. О выделении сигналов акустической эмиссии от трещин //VIII Всес.научн.–техн. конф. по неразр. физ.метод. и средствам контр. (Кишинев, 7–1– июня, 1977):Дскл.–Кишинев: ЦМРП НТО Приборпром, 1977.–Ч.1.–С.556–558.
13. Иванов В.И., Быков С.П., Рябов А.Н. О критерии оценки степени опасности дефектов по параметрам сигналов акустической эмиссии// Дефектоскопия.–1985.–N2.–С.62–68.
14. РД–03–131–97. Правила организации и проведения акусто-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.– М: Издательство стандартов, 1996.– 40 с.
15. NDIS 2412–1980. Acoustic emission testing of spherical pressure vessels made of high tensile strength steel and classification of test results.
16. Новиков Н.В., Филоненко С.Ф. и др. К критерию определения источника сигнала акустической эмиссии при нагружении материалов//Сверхтвердые материалы.–1987.–№2.– С.42–45.
17. Новиков Н.В., Филоненко С.Ф. Влияние параметров акустического тракта на критериальную оценку выделения сигналов акустической эмиссии от трещин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.–1995.–№1.–С.47–52.
18. Филоненко С.Ф., Бабак В.П. Вплив порогу обмеження на критеріальну оцінку виділення сигналів акустичної емісії від тріщин //Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту.–1998.–№ 7.–С.31–39

Стаття надійшла до редакції 10 жовтня 1998 року.

Сергій Федорович Філоненко (1954) закінчив у 1977 році Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри наукових, аналітичних і екологічних приладів та систем НТУУ “КПІ”. Має понад 60 наукових праць в області акустичної емісії в технічній діагностиці.

Sergey F. Philonenko (b.1954) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1977). PhD (Eng.), senior scientific researcher of Scientific, analytical and ecological devices and systems Department of National Technical University of the Ukraine “KPI”. Author of more than 60 publication in the field of acoustic emission in the technical diagnostic.

