

Оцінка моменту старту макротріщини за сигналами акустичної емісії*

В. Р. Скальський, В. Б. Михальчук, Ю. С. Окрепкий, Р. М. Плахтій

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

На основі теоретичних і експериментальних досліджень методом акустичної емісії визначено момент старту макротріщини. Оцінено амплітуди сигналів акустичної емісії, що супроводжують пластичні деформації біля концентратора напружень відповідного радіуса. Проведено порівняння сигналів акустичної емісії із сигналами, які генеруються під час старту макротріщини.

Ключові слова: макротріщина, тріщиностійкість, пластична деформація, акустична емісія.

Актуальність проблеми. Аналіз даних, що наведені в літературних джерелах, показує, що метод акустичної емісії (АЕ) є ефективним при визначенні показників статичної тріщиностійкості конструкційних матеріалів. Маючи попередньо експериментально встановлені параметри в'язкості руйнування матеріалів, є реальним за результатами досліджень розробляти необхідні методики акустико-емісійного контролю та діагностики об'єктів народногосподарського комплексу.

Оскільки з точки зору механіки руйнування матеріалів найпоширенішими і найнебезпечнішими є дефекти типу тріщин, то актуальним є створення методологічних основ для розробки методик оцінки початкових стадій їх розвитку за сигналами АЕ (САЕ). Тобто постає задача вміти чітко визначити момент старту макротріщини та розрізнити сигнали АЕ, що генеруються під час розвитку пластичних деформацій в околі наявної макротріщини.

Стан досліджень із даної проблематики. Розробка теоретичних основ для визначення початку росту макротріщини та об'єму зони пластичної деформації (ПД) давно привертає увагу дослідників. У роботі [1], де вивчали взаємозв'язок між АЕ, радіусом зони ПД та діаграмами руйнування, встановлено, що між цими параметрами існує кореляція. Дослідження здійснювали на компактних зразках товщиною 12,7 мм із загартованої сталі Д6 ($\sigma_{\text{в}} = 517$ МПа, $\delta = 12\%$). Показано, що АЕ генерується за досягнення навантаженням величини, яка відповідає точці відхилення від лінійності діаграми руйнування навантаження P – розкриття берегів тріщини v . Це перевіряли на зразках із різною довжиною тріщини від утомленості, що відповідно давало і різні значення K_{I} . На підставі теоретико-експериментальних досліджень автори дійшли висновку, що основний вклад у генерування САЕ вносить область плосконапруженого стану (ПНС) матеріалу, а сумарний рахунок САЕ N пропорційний K_{I}^m , при цьому $m = 2 \dots 5$.

* За матеріалами доповіді на міжнародній науково-технічній конференції “Динаміка, міцність і ресурс машин і конструкцій” (1–4 листопада 2005 р., Київ, Україна).

У [2] на підставі теоретико-експериментальних досліджень також визначали виникнення АЕ у взаємозв'язку з механічними умовами у пружно-пластичній області матеріалу під час випробувань на в'язкість руйнування. Експерименти проводили на дев'яти марках конструкційних сталей: SS 41, SM 50, SUS 304, A 387E, A 533B, SMA 58Q, HT 60, HT 80, SNCM 8 та на АС марки 2024 T351. Із кожного сплаву виготовляли компактні зразки товщиною 25 мм, які мали різну орієнтацію до напрямку вальцювання. Метою роботи було визначення співвідношення між навантаженням, за якого вперше появляється АЕ (P_{AE}), і максимальним навантаженням тріщини від утомленості ($P_{f\max}$) та оцінка вкладу пластично деформованого об'єму (ПДО) у генерацію САЕ.

За результатами випробувань встановлено, що для указаних сплавів відношення $P_{AE}/P_{f\max}$ (у діапазоні значень $\sigma_{0,2} = 215...1550$ МПа) лежить у межах 0,8...2,0 і що майже у всіх матеріалах (як низько-, так і високоміцних) САЕ починають генеруватися за досить низьких значень навантаження. Ці результати добре корелюють із даними [3]. В [2] показано, що коли умови навантаження у вістрі тріщини відповідають стану плоскої деформації (СПД), то активність АЕ висока, а за плосконапруженого стану – низька. Окрім того, стверджується, що випромінювання АЕ відбувається раніше за макроскопічне поширення макротріщини, і безпосередній зв'язок із цим процесом відсутній. Тобто виникнення АЕ залежить від ПД у вістрі макротріщини, і амплітуда сигналів АЕ пропорційна об'єму пластичної зони (ПЗ) за плоскої деформації, де виникає тривісний напружений стан і генерується АЕ саме у момент формування там мікротріщин, коли в цій зоні виникає розтріскування частинок вторинної фази або їх відшарування від матриці.

Ці науково обгрунтовані положення підтверджують результати досліджень [4, 5], де за початок росту макротріщини пропонується брати момент якісної зміни інтенсивності САЕ на акустограмі (АГ), яка записана паралельно з діаграмою $P - v$. Визначена у такий спосіб за значеннями P_S , а не за P_Q , як того вимагає нормативно-технічна документація [6], величина K_{I_S} порівняно з K_{I_C} має нижчі значення і є інваріантною до товщини зразка, способу навантаження та температури випробувань [7–9]. Таким чином, АЕ-визначення моменту старту макротріщини за величиною K_{I_S} є достовірнішим, ніж за K_{I_C} .

Мета роботи – створити методологічні основи АЕ-оцінки початку розвитку макротріщини у конструкційних сплавах.

Результати експериментальних досліджень та їх інтерпретація. Описаний раніше [10] модельний підхід до розробки методики наближеного визначення величини докритичного росту наскрізної макротріщини на етапі початку її субкритичного розвитку базується на таких положеннях. Із врахуванням характеру розподілу напружень та деформацій перед вістрем макротріщини припускається, що локальне руйнування розпочинається в деякому мікрооб'ємі тіла біля вістря тріщини, де напруження або деформації сягають максимуму. За результатами числових розрахунків [11] методом скінчених елементів показано, що ця відстань сумірна з 2δ , де δ – розкриття тріщини у вістрі. Цим самим приймається, що спочатку поблизу фронту макротріщини в мікрооб'ємі, де розпочалося локальне руйнування, утворюються мікро-

тріщини, які, підростаючи, зливаються з макротріщинами. Таким чином, просування останніх проходить шляхом послідовного злиття мікротріщин у матеріалі і на початкових етапах може не виходити на зовнішню поверхню (тунелювання макротріщини). Тому одиничний стрибок макротріщини, який супроводжується випромінюванням пружних хвиль АЕ, можна розглядати приблизно як утворення ізольованої мікротріщини, бо її розміри набагато менші, наприклад, за лінійні розміри зразка для випробувань. У роботі [12] з урахуванням положень [11] показано, що в околі вістря макротріщини за СПД відстань від точок дії максимальних деформацій та напружень до вістря тріщини залежить від величини розкриття тріщини δ у вістрі. На основі цього встановлено, що величина стрибка наскрізної макротріщини Δl лежить у межах $\delta < \Delta l < 2\delta$ і може визначатися експериментально в умовах дії змішаних механізмів руйнування реального матеріалу.

Для наскрізних макротріщин нормального відриву або аналогічних дископодібних, що утворюються по їх фронту, в моделі встановлено наступний зв'язок між величиною стрибка чи утворенням наскрізної тріщини та амплітудами САЕ, які генеруються такими процесами [12]:

$$\Delta l = \beta \sum_{k=1}^K A_k^{2/3}, \quad (1)$$

де β – експериментальний множник пропорційності, який є функцією параметрів АЕ-тракту відбору, обробки і реєстрації САЕ та механічних характеристик матеріалу; A_k – амплітуда k -го САЕ, що супроводжує k -й стрибок тріщини.

Аналітичний вираз для знаходження площі одиничного стрибка наскрізної тріщини нормального відриву в моделі подано наступним чином:

$$\Delta S = 0,25\pi\beta^2 (K_{l_0}^4 + K_{l_1}^4) / \sum_{k=1}^K A_k^{2/3}, \quad (2)$$

де K_{l_0} – КІН моменту старту макротріщини; K_{l_1} – КІН її зупинки. Таким чином, модель, що описує зародження та ріст наскрізної макротріщини, лягла в основу розробки наших методологічних основ.

Відомо, що ПД і ріст макротріщини розрізняються за амплітудним розподілом САЕ. Пластична деформація матеріалу хоч і проходить у великих об'ємах відносно малими одиничними деформаційними ступенями, однак супроводжується довготривалими і незначними за амплітудою САЕ, а під час стрибкоподібного росту тріщини з однаковими, як і для ПД, енергетичними затратами генерується АЕ з дискретними короткотривалими імпульсами великої амплітуди. Така ідентифікація САЕ є ефективною у випадку, коли наявні лише два механізми генерації АЕ: пластичне деформування та ріст макротріщини. Проте у реальних конструкційних матеріалах проявляються додаткові джерела АЕ, наприклад руйнування крихких включень чи утворення мікротріщин. Вони відповідають прямолінійній ділянці діаграми

$P - v$ ще задовго до точки відхилення її від лінійності. Ці процеси супроводжуються САЕ, які за амплітудою є більшими за САЕ від утворення пластичної деформації, але меншими, ніж під час поширення макротріщини (інколи сумірні з ними). У таких випадках виникають труднощі при розшифруванні отриманих результатів для визначення моменту старту тріщини за показаннями САЕ. Однак у кожному конкретному випадку з метою розв'язання задачі ідентифікування САЕ необхідно встановлювати кількісні співвідношення, за якими можна було б розділяти процеси росту макротріщини від решти джерел АЕ. Цей фактор ураховується в розробленій методиці.

Специфіку генерування САЕ під час утворення ПЗ в матеріалі оцінювали наступним чином. Спочатку кілька зразків кожного матеріалу з попередньо виведеними тріщинами від утомленості випробовували до повного руйнування. При цьому записували діаграму $P - v$ і паралельно АГ. Маючи значення $\sigma_{0,2}$ матеріалу і визначивши з проведеного експерименту K_c (максимальне значення КІН), у першому наближенні аналітично радіус ПЗ r_p^1 за умови $K_I = K_c$ для кожного матеріалу знаходили за формулою

$$r_p = K_I^2 / 4\pi\sqrt{2}\sigma_{0,2}^2. \quad (3)$$

Таким чином отримали максимальне значення радіуса ПЗ r_p^1 у вістрі макротріщини. Тепер необхідно експериментально створити приблизно рівну їй ПЗ, але за умови відсутності субкритичного підростання макротріщини, щоб максимально ідентифікувати САЕ від процесів утворення ПЗ макротріщини (зародження та ріст пор, мікротріщини, руйнування включень тощо). Для цього провели такі розрахунки.

У роботі [13] отримано наближені розв'язки тривимірної пружної задачі для тіл із тонкими включеннями. Згідно з цими результатами розподіл напружень σ_{yy} біля вершини концентратора радіуса ρ можна записати у вигляді

$$\sigma_{yy} = 2K_I(x + \rho)[\sqrt{\pi}(2x + \rho)^{3/2}]^{-1}, \quad (4)$$

де x – відстань від вершини концентратора.

З урахуванням того, що текучість має місце у випадку $\sigma_{yy} = \sqrt{3}\sigma_{0,2}$ [14], отримаємо

$$\sqrt{3}\sigma_{0,2} = 2K_I(x^* + \rho)[\sqrt{\pi}(2x^* + \rho)^{3/2}]^{-1}, \quad (5)$$

де x^* – точка тіла, в якій наступила текучість і яка знаходиться на максимальній відстані від концентратора.

За відомим значенням ρ , поклавши $x^* = r_p^1$, оцінюємо величину K_I , для якої на зразку з концентратором відомого радіуса та однакової товщини, як і у випадку випробувань із наявною макротріщиною, утвориться приблизно така ж ПЗ. Тоді з (5) маємо

$$K_I = \sqrt{3\pi}\sigma_{0,2}(2x^* + \rho)^{3/2}[2(x^* + \rho)]^{-1}. \quad (6)$$

Т а б л и ц я 1

Результати досліджень зразків із концентратором радіуса 0,8 мм

Матеріал	B , мм	l/b	K , МПа $\sqrt{м}$	x^* , мм	P , кН	Тип зразка
Алюмінієві сплави						
Д16Т	10	0,49	43,36	5,494	5,57	Призматичний
1201-Т	20	0,49	38,59	0,856	14,95	»
Сталі						
38ХНЗМФА	10	0,52	137,98	1,969	19,51	Призматичний
45	20	0,48	44,50	0,300	17,80	Компактний

Т а б л и ц я 2

Характеристики визначення параметрів тріщиностійкості конструкційних сплавів

Матеріал	B , мм	l/b	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	P_{AE}/P_f	Тип зразка
Сталі					
45	10	0,51	30,95	1,25	Призматичний
	20	0,50	31,35	1,18	»
38ХНЗМФА	10	0,52	69,10	0,98	»
	20	0,51	63,40	0,88	»
Алюмінієві сплави					
1201-Т	8	0,46	19,94	1,19	Призматичний
	16	0,48	22,29	1,14	»
Д16Т	10	0,46	17,10	1,18	Компактний
	20	0,45	17,90	1,34	»

Таким чином, попередньо було встановлено контрольний рівень амплітуд САЕ, що супроводжували утворення ПДО, та особливості їх якісного розподілу. Так, для сталей 38ХНЗМФА і 45 максимальні амплітуди САЕ дорівнювали 30 і 25 а.о відповідно, для алюмінієвих сплавів 1201-Т і Д16Т – 18 та 6 а.о. Маючи орієнтовний максимальний рівень САЕ та їх часовий розподіл під час утворення ПДО біля концентратора напружень, випробування зразків із виведеною тріщиною від утомленості здійснювали наступним чином.

В експериментах використовували призматичні та компактні зразки, які навантажували відповідно триточковим згином і розтягом. Розміри зразків, їх виготовлення та навантажування відповідали вимогам [6]. Так, зразок із виведеною тріщиною від утомленості плавно навантажували із записом діаграми руйнування $P - v$ та синхронною реєстрацією АГ. У момент появи САЕ з амплітудами, вищими за контрольний рівень, навантаження, яке позначали як P_{AE} , припиняли, і зразок розвантажували. В іншому варіанті забезпечувалось збільшення значення P_{AE} на деяку незначну величину. Відтак зразок знімали з випробувальної установки і проводили термофарбування новоутворених поверхонь, після чого його витримували у рідкому

азоті і доламували ударним навантаженням. Блок-схема експерименту, режими відбору, обробки та реєстрації САЕ були такими ж, як і для випробувань зразків із концентратором.

Аналіз доломів зразків (табл. 2) підтвердив гіпотезу про те, що методика визначення старту макротріщини за якісною зміною САЕ на акустограмі, тобто за моментом різкого зростання амплітуди, відповідає істинному моменту її старту.

Резюме

На основании теоретических и экспериментальных исследований методом акустической эмиссии определен момент старта макротрещины. Оценена амплитуда сигналов акустической эмиссии, которые сопровождают пластические деформации возле концентратора напряжений соответствующего радиуса. Проведено сравнение сигналов акустической эмиссии с сигналами, которые генерируют во время старта макротрещины.

1. *Masounave J., Lanteigne J., Bassim M. N., and Hay D. N.* Acoustic emission and fracture of ductile materials // *Eng. Fract. Mech.* – 1976. – **8**, No. 4. – P. 701 – 709.
2. *Kici T., Ono T., Курібаясі Т.* Виникнення акустичної емісії та механічні умови під час випробувань на в'язкість руйнування у пружнопластичній області // *Хіхакай кенса.* – 1981. – **30**, № 11. – С. 896 – 902.
3. *Ucisik H. and Ono K.* Acoustic emission characteristics of high strength aluminum alloys during fracture toughness test // *Proc. Second Acoustic Emission Symp. (2–4 Sep., 1974, Tokyo).* – Tokyo: Japan Industrial Planning Association. – Sess. 4. – P. 64 – 65.
4. *Новиков Н. В., Лихацкий С. И., Майстренко А. Л.* Определение момента старгивания трещины акустическим методом при испытании образцов с надрезом на внецентренное растяжение // *Пробл. прочности.* – 1973. – № 9. – С. 21 – 25.
5. *Вайнберг В. Е., Соседов В. Н., Кушнир А. М.* Исследование роста трещин методом акустической эмиссии // *Дефектоскопия.* – 1975. – № 3. – С. 127 – 129.
6. *ГОСТ 25.506–85.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 27.03.85.
7. *Andreykiv O. Ye., Lysak M. V., and Skalsky V. R.* Determination of threshold values of stress intensity factor using acoustic emission method // *Proc. 18th Symp. on Experimental Mechanics of Solids (14–16 Oct. 1998, Warsaw).* – Warsaw, 1998. – P. 114 – 119.
8. *Смирнов В. И.* Об оценке размеров дефектов методом акустической эмиссии с позиции линейной механики разрушения // *Дефектоскопия.* – 1979. – № 2. – С. 45 – 50.

9. *Коровкин Е. Д., Скобло А. В., Дунина Л. П.* Определение старга трещины акустическим методом // Завод. лаб. – 1980. – № 9. – С. 865 – 867.
10. *Скальський В. Р., Михальчук В. Б., Окрепкий Ю. С.* Методологічний підхід до АЕ-визначення статичної тріщиностійкості матеріалів // Машинознавство. – 2005. – № 2. – С. 43 – 47.
11. *McMeeking R. M.* Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic-plastic materials and implications for fracture // J. Mech. Phys. Solids. – 1977. – **25**, No. 5. – P. 357 – 381.
12. *Скальський В. Р., Андрейків О. Є.* До проблеми автоматизації діагностування конструкцій методом акустичної емісії // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – № 4. – С. 3 – 9.
13. *Стадник М. М.* Об одном методе приближенного решения трехмерной упругой задачи для тела с тонким включением // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – № 1. – С. 53 – 65.
14. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

Поступила 04. 11. 2005