



## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ОЦІНКА ЗАРОДЖЕННЯ МІКРОТРІЩИН

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. Г. СИМАКОВИЧ

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Ранні стадії руйнування елементів конструкцій та виробів починаються з утворення і розвитку пластичної деформації, що призводить до руху і взаємодії дислокацій у твердому тілі, а за певних умов вони можуть групуватись і утворювати дислокаційні мікротріщини. Зародження та розвиток останніх є джерелом сигналів АЕ. Амплітуда сигналу пропорційна площі новоутвореної дислокаційної тріщини. Тому для того, щоб виявити появу дефекту методом АЕ, необхідно мати достатню величину утвореної мікротріщини для даного матеріалу, яка б дала амплітуду сигналу під час свого стрибкоподібного утворення, достатню для його реєстрування. За результатами попередніх досліджень авторів встановлено, що найімовірнішим механізмом зародження мікротріщини у твердому тілі є модель її утворення у загальмованій площині дислокаційного скупчення, оскільки тоді необхідно найменшу кількість дислокацій і найменші локальні напруження. Це зумовлено тим, що на початкових етапах дислокаційні ансамблі реагують тільки в своїх смугах ковзання, а за досягнення критичних значень починають об'єднуватись із сусідніми. Як показали наведені у праці результати досліджень, для зародження мікротріщини за згаданим механізмом необхідно 5-6 дислокаційних площин ковзання, які включають приблизно 75 рухомих дислокацій кожна. Амплітуда сигналів АЕ, що супроводжує утворення такого дефекту, становить 0,3...1,3 мВ за чутливості первинного п'єзоперетворювача  $1,6 \cdot 10^9$  В/м, що відповідає еквівалентній площі новоутвореного дефекту розміром приблизно 100 мкм<sup>2</sup>. Для конструкційної гартованої сталі 45 похибка теоретичних розрахунків становить 6...10 %, а для стану поставки 8...15 %, що цілком задовольняє точність діагностичних обстежень реальних об'єктів контролю. Бібліогр. 8 назв, табл. 1, рис. 3

*Ключові слова:* акустична емісія, дислокація, дислокаційне скупчення, мікротріщина.

Зростання напружень у твердому тілі призводить до руху і взаємодії дислокацій, а за певних умов вони можуть групуватись і утворювати дислокаційні мікротріщини. Зародження та розвиток останніх є джерелом сигналів акустичної емісії (АЕ). Щоб виявити появу мікротріщини методом АЕ, необхідно мати величину утвореної дислокаційної мікротріщини у даному матеріалі і відповідний їй сигнал. В даній праці запропоновано алгоритм моделювання й кількісної оцінки зародження дислокаційної мікротріщини за сигналами АЕ. Їх суть полягає у такій послідовності дій:

- обґрунтуванні механізму зародження мікротріщини за структурними показниками даного матеріалу;

- розрахунку мінімальної кількості дислокацій для зародження мікротріщини, згідно вибраної моделі її утворення і особливостей матеріалу, що випробовують;

- перевірці можливості виявлення дислокаційного мікротріщиноутворення за параметрами сигналів АЕ, провівши відповідний перерахунок;

- оцінці амплітуди сигналів АЕ від утворення мікротріщини за вибраною моделлю і наявним матеріалом;

- порівнянні експериментальних даних з теоретичними результатами.

**Обґрунтування методики досліджень.** Базуючись на даних праць [1–3], найімовірнішим механізмом зародження мікротріщини є модель

тріщини у загальмованій площині скупчення. Таке її утворення проходить у два етапи: злиття дислокацій, що належать одному скупченню, в дефект і об'єднання цих дефектів. На першому етапі зародження окремих мікротріщин (до злиття мікротріщин кожної смуги в спільну тріщину) є незалежним. Тому для розрахунку окремої смуги можна використовувати механізми, характерні для однієї групи дислокацій (наприклад, Зінера–Стро).

Для зародження мікротріщин шляхом об'єднання дислокацій, урахуовуючи теплові флуктуації, умова утворення мікротріщин [2]:

$$n\tau \approx \alpha(T)D, \quad (1)$$

де  $n$  — кількість дислокацій, що утворили тріщину;  $\tau$  — напруження, яке діє на дислокаційну групу;  $D = G/2\pi k$  — модуль пружності дислокації (для гвинтової  $k = 1$ ; для крайової  $k = 1 - \nu$ ,  $\nu$  — коефіцієнт Пуасона);  $\alpha(T)$  — температурний коефіцієнт, що полегшує зародження мікротріщин;  $G$  — модуль зсуву.

Як відомо [4, 5], важливу роль у вивченні дислокаційних процесів відіграють методики, побудовані на застосуванні явища АЕ. Згідно методики АЕ-виявлення дефектів у сталях за навантаження до рівня напружень 500 МПа за чутливості первинного перетворювача до переміщення поверхні  $10^{-13}$  м і відстані до джерела 0,1 м може виявляти новоутворені поверхні площею близько 100 мкм<sup>2</sup>. Автори праць відзначають, що в лабораторних умовах поріг виявлення істотно збільшується і



тоді найменше переміщення поверхні об'єкта контролю, яке впевнено фіксує первинний перетворювач АЕ, становить  $10^{-15} \dots 10^{-14}$  м.

Сучасні вимірювальні АЕ-засоби реєструють рух одиничних дислокацій, руйнування карбідів у сталях розміром менш ніж 1 мкм, відшарування чи руйнування включень сульфідів і силіцидів, утворення та злиття мікропор, мікротріщин тощо. Дислокаційне утворення мікротріщин може бути

зумовлене також такими механізмами, як міжкристалітне руйнування, скол і зсув.

Мінімальну кількість дислокацій, яка потрібна для утворення мікротріщин, що фіксується ПАЕ, можна визначити за співвідношенням [2]:

$$S_{\min} = 2h_{\min}L, \quad (2)$$

де  $S_{\min}$  — площа мікротріщини;  $h_{\min}$  — її ширина;  $L$  — довжина.

Звідси

$$h_{\min} = S_{\min}/2L = bn^2/2, \quad (3)$$

де  $b$  — вектор Бюргерса.

Із залежності (3) отримаємо:

$$n = \sqrt{\frac{S_{\min}}{bL}}. \quad (4)$$

Необхідно зазначити, що кількість смуг, по яких ковзають дислокації, лежить в межах 7...10 [3].

**Результати вимірювань та їх інтерпретування.** Експерименти проводили шляхом розтягання циліндричних зразків, які виготовлені зі сталі 45 у стані поставки та гартованої. Їх розміри наведені на рис. 1.

Відбір і обробку сигналів АЕ проводили за допомогою вимірювальної системи SKOP-8 [5]. Під час навантаження зразка одночасно реєстрували сигнали АЕ, а також його видовження. За отриманими даними будували діаграми розтягу (рис. 2), які суміщували із синхронно записаними акустограмами (рис. 3).

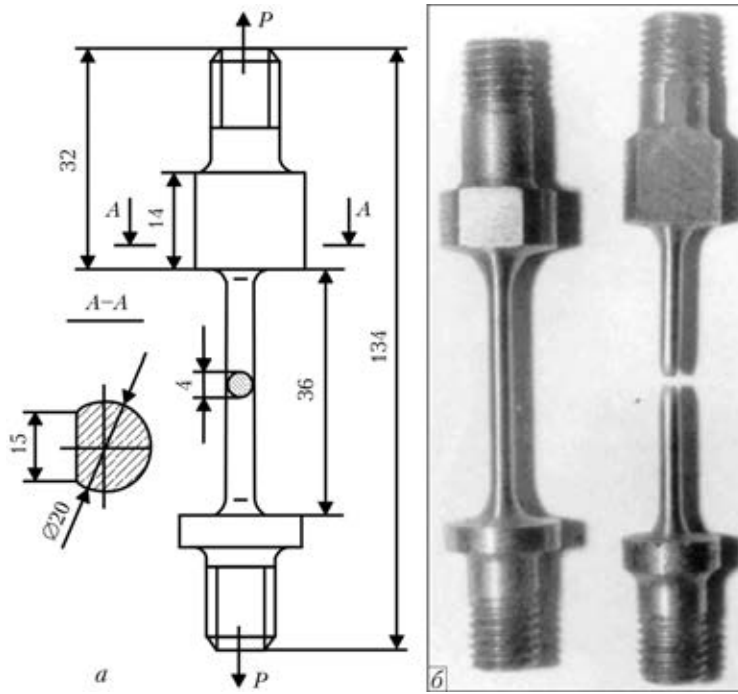


Рис. 1. Циліндричний зразок: а — розміри зразка; б — загальний вигляд до і після випробувань

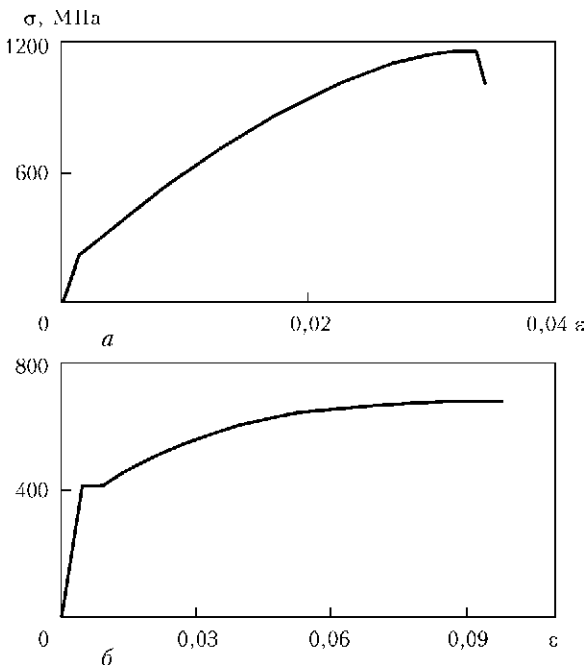


Рис. 2. Діаграма розтягу гладкого циліндричного зразка зі сталі 45: а — гартована; б — стан поставки

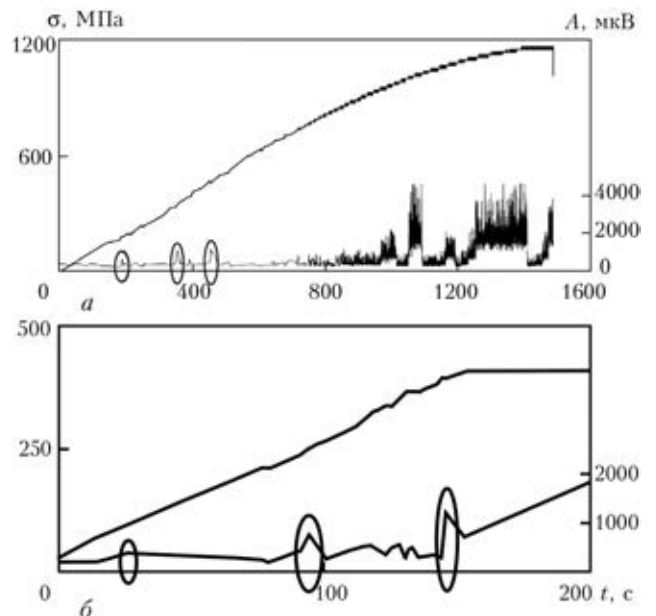


Рис. 3. Типова часова залежність зміни напружень у перерізі циліндричного зразка та амплітуд ( $A$ ) сигналів АЕ на виході первинного перетворювача (обведено локальні піки САЕ, які гіпотетично приймали за моменти утворення мікротріщин): а — сталь 45 гартована; б — стан поставки



Значення напружень в перерізі зразків і максимум сигналів АЕ, що відповідають локальним пікам, зведені у таблицю.

Проведемо аналіз отриманих результатів досліджень. Прийемо для сталі 45  $b = 3 \cdot 10^{-10}$  м;  $L = 10^{-6}$  м;  $S_{\min} = 10^{-10}$  м<sup>2</sup> [2, 6], тоді, згідно (4), отримаємо  $n_{\min} \approx 550$ . Тому середня кількість рухомих дислокацій в кожній смузі має знаходитись в межах 55...80.

Для того, щоб обчислити мінімальну кількість рухомих дислокацій в одній смузі, необхідну для утворення мікротріщин у сталі 45, прийемо  $\alpha(T) = 0,25$ ;  $D = 30$  МПа;  $\tau = 10$  МПа [2, 7]. Тоді для утворення однієї мікротріщини отримаємо:

$$n \approx \alpha(T)D/\tau \approx 75. \quad (5)$$

Отож, якщо в одній площині ковзання сформується така кількість рухомих дислокацій, то отримаємо утворення мікротріщин, що узгоджується з теоретичними викладками, приведеними вище. На цій підставі можна вважати, що за даною моделлю утворення мікротріщин в загальмованій площині скупчення може бути виявлене методом АЕ.

Порівняємо тепер отримані результати вимірювань із розрахунковими викладками. Наведені у таблиці сигнали АЕ на ранніх стадіях деформування мають амплітуди на виході первинного перетворювача в межах 0,3...1,4 мВ. Якщо взяти до уваги коефіцієнт його чутливості  $\eta = 1,6 \cdot 10^9$  В/т, то отримаємо, що переміщення під його контактною поверхнею становлять  $(0,2...0,9) \cdot 10^{-12}$  м. Виходячи із залежності  $u^* = A/\eta$ , як було показано вище, величина переміщень є достатньою для виявленого прийому пружних хвиль АЕ, що супроводжують мікротріщиноутворення.

Додатково, наближено перевіримо отриманий результат за відомою залежністю для переміщення поверхні від площі новоутвореної тріщини відриву у просторі [8]:

$$u_{\max} = \delta \frac{\sigma_0 S}{\pi r R c_1^2}, \quad (6)$$

де  $\sigma_0$  — напруження відриву;  $r$  — радіус дископодібної тріщини, еквівалентної за площею до реальної;  $\rho$  — густина матеріалу;  $c_1$  — швидкість поширення пружних хвиль у матеріалі;  $R$  — відстань від тріщини до точки встановлення первинного перетворювача АЕ;  $\delta = 0,452$ .

Покладемо  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_0 = 560$  МПа;  $c_1 = 5930$  м/с;  $R = 0,025$  м;  $S = 10^{-10}$  м<sup>2</sup> і отримаємо  $u_{\max} \approx 1,19 \cdot 10^{-12}$  м. Бачимо також, що переміщення під первинним перетворювачем більше  $u_{\max} > 10^{-14}$  м і може бути зареєстрованим в лабораторних умовах АЕ-вимірювань.

Залежність максимальних амплітуд САЕ від напружень у зразку

$t, c$	$\sigma, MPa$	$A, \mu B$	$A^*$ (розрахункове), мкВ	Похибка $\delta, \%$
Гартована сталь 45				
189,65	179,92	644,46	613,64	5,02
354,83	346,00	1100,95	1180,06	6,70
Стан поставки				
25,95	98,60	393,83	343,04	14,81
94,33	253,53	786,37	882,11	12,89
145,85	394,39	1199,40	1372,17	12,59

Як видно з таблиці, похибка  $\delta$  між розрахунковими і експериментальними даними може сягати до 15 %. Це зумовлено, в першу чергу, прийнятою середньою кількістю дислокацій у смузі. Для реальних кристалів їх кількість, кількість смуг ковзання, локальні напруження, що зумовлюють рух дислокацій, розміри кристалу і низка інших параметрів не є сталими. Проте слід зауважити, що експериментальні результати є того ж порядку, що і розрахункові, а тому можна вважати, що зареєстровані на ранній стадії деформування сигнали АЕ супроводжують зародження і розвиток мікротріщин.

### Висновки

Механізм утворення мікротріщини в загальмованій смузі скупчення дислокацій є найімовірнішим, оскільки потребує найменшої кількості дислокацій і найменших локальних напружень. Важливою його характеристикою є те, що на початкових етапах дислокаційні ансамблі реагують тільки в своїх смугах ковзання, а за досягнення критичних значень починають об'єднуватись із сусідніми.

Як показали результати досліджень, для зародження мікротріщини необхідно п'ять-шість дислокаційних площин ковзання, які включають приблизно 75 рухомих дислокацій кожна. Амплітуда сигналів АЕ, що супроводжує утворення такого дефекту, становить 0,3...1,3 мВ за чутливості первинного п'єзоперетворювача  $1,6 \cdot 10^9$  В/м, що відповідає еквівалентній площі новоутвореного дефекту розміром приблизно 100 мкм<sup>2</sup>. Для конструкційної сталі 45 похибка становить 6...10 %, а для стану поставки 8...15 %, що цілком задовольняє точність діагностичних обстежень реальних об'єктів контролю.

1. *Владимиров В. И., Ханнанов Ш. Х.* Актуальные задачи теории зарождения дислокационных трещин // Физика металлов и материаловедение. — 1970. — **30**. — С. 490–510.
2. *Владимиров В. И.* Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
3. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов: пер. с англ. / Под ред. Б. Я. Любова. — М.: Мир, 1972. — 408 с.
4. *Eitzen D. G., Wadley H. N. G.* Acoustic Emission: Establishing the Fundamentals // J. Res. Nat. Bur. Stand. — 1984. — **89**, № 1. — P. 75–100.
5. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн.



- посібник: у 3 т. — Т. 1.: Теоретичні основи методу акустичної емісії. — Київ: Наук. думка, 2009. — 287 с.
6. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. — Київ: Наук. думка, 1991. — 416 с.
7. Фридель Ж. Дислокации. — М.: Мир, 1967. — 660 с.
8. Скальський В. Р., Андрейків О. С. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. — Львів: Вид. центр Львів. нац. ун-ту ім. І. Франка, 2006. — 330 с.

Early stages of fracture of structural elements and products begin from formation and development of plastic deformation that leads to movement and interaction of dislocations in the solid body, and under certain conditions dislocations can bunch and form dislocation microcracks. Initiation and development of the latter is the source of AE signals. Signal amplitude is proportional to the area of newly formed dislocation crack. Therefore, in order to detect defect initiation by acoustic emission (AE) method, it is necessary to have a sufficient size of the formed microcrack for the given material that would generate signal amplitude during its jumplike formation, sufficient for signal recording. Results of earlier investigations by the authors revealed that the most probable mechanism of microcrack initiation in a solid is the model of its formation in a braked plane of dislocation clustering, as this requires the smallest number of dislocations and lowest local stresses. It is due to the fact that at the initial stages the dislocation assemblies react only in their slip bands, and having reached critical values they start to coalesce with the neighbouring ones. As shown by investigation results given in the work, initiation of microcracks by the above-mentioned mechanism requires 5 to 6 dislocation slip planes, which include approximately 75 mobile dislocations each. Amplitude of AE signals that accompanies formation of such a defect, is equal to 0.3 – 1.3 mV at primary piezoelectric transducer sensitivity of  $1.6 \cdot 10^9$  V/m that corresponds to equivalent area of a newly formed defect of approximately  $100 \mu\text{m}^2$ . For quenched structural steel 45 the error of theoretical calculations is equal to 6 - 10%, and for as-delivered condition it is 8–15% that completely satisfies the accuracy of diagnostic examinations of actual control objects.

*Keywords: acoustic emission, dislocation, dislocation cluster, microcrack*

Надійшла до редакції  
10.11.2012

## КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК В 2013 г. (неразрушающий контроль, дефектоскопия, сварка)

Время проведения	Место проведения	Название выставки/конференции
26–28 марта	Москва, СК «Олимпийский»	Международная выставка «NDT RUSSIA – Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности», а также новый проект компании ПРИМЭКСПО «TechTest – Испытания материалов и механизмов»
24–26 апреля	Москва	Международная выставка «Экспо Контроль 2013»
14–16 мая	Киев, Пуща-Водица	Конференция «Неразрушающий контроль 2013»
20–22 мая	Афины, Греция	15 <sup>th</sup> International Conference on NDT of HSNT (IC-MINDT-2013)
3–7 июня	Крым, Ялта	1-я Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий»
4–6 сентября	Санкт-Петербург	Международная выставка «Дефектоскопия»
26–28 сентября	Крым, Ялта	13-я Международная конференция «Качество, Стандартизация. Контроль: Теория и практика»
Начало октября	Крым, Ялта	21-я Международная конференция и блиц-выставка «Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»
8–10 октября	Москва, КВЦ «Сокольники»	Международная выставка «Weldex/Россварка»
15–17 октября	Киев, ЭкспоПлаза	Выставка «Сварка и родственные технологии»
ноябрь	Mumbai (Bombay), India	14 <sup>th</sup> Asia-Pasific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT2013)
23–25 ноября	Киев	12-й Международный промышленный форум-2013. Секция «Неразрушающий контроль»
25–26 ноября	Киев, ИЭС им. Е. О. Патона	Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее»
3–5 декабря	Екатеринбург, Уральские выставки	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»