

various parameters of residual surface macrostresses on the mechanical characteristics of a nickel alloy using the acoustic emission method are presented. The determining parameters of residual surface macrostresses that control the process of multi-cycle fatigue are established. A method for their determination by the non-destructive express method of acoustic emission is proposed.

Keywords: *Acoustic emission, multi-cycle fatigue, residual stresses, statistical analysis, technological heredity.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДК 621.873:620.179.17

doi.org/10.31498/2522-9990302025347060

Сидоренко М.В., Капустян О.Є., Кравченко Є.О., Фролов Р.О., Козак Д.С.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КІНЦЕВИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Акустична емісія стає все більш розповсюдженим методом для оцінки стану, якості та міри пошкодженості металоконструкцій та матеріалів. Основна теоретична база методів оцінки параметрів якої викладена у працях Скальського В.Р. та Недосеки А.Я. Механічна міра об'ємної пошкодженості матеріалу визначається як відношення суми новоутворених дефектів до об'єму, в якому вони утворилися. Механічна та акустико-емісійна міри об'ємної пошкодженості лінійно залежать від дійсної деформації полікристалічних тіл. У даній роботі забезпечували досягнення значень рівномірної деформації, отриманої попередньо при розтягуванні циліндричних зразків. Було досліджено партію зразків, що піддавались втомному навантаженню з різними коефіцієнтами асиметрії циклу 0, -100, -200 МПа. Робоча смуга частот реєстрованих сигналів становила: 0,2...0,5 МГц. Застосована теоретична модель акустико-емісійного вимірювання об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні. Проведені дослідження сигналів акустичної емісії від країв втомної тріщини та від пластичної деформації у вершині втомної тріщини для сталей S235 та S355. Підтверджена гіпотеза про те, що амплітуди сигналів пропорційні площі тріщини. При оцінці швидкості зростання тріщини за параметрами акустичної емісії виникають складнощі, пов'язані з існуванням ефекту Кайзера. Після незначних перевантажень буде спостерігатися велика кількість пасивних циклів, тобто таких, в яких рівень сигналів АЕ буде нижче порогового рівня апаратури, що реєструє. Встановлено, що для досліджуваних сталей перші сигнали від пластичної деформації у вершині тріщини виникають при перевантаженні до 10%. Вони можуть спостерігатися раніше реєстрації монотонно зростаючої амплітуди, яка передуює початку росту тріщини і служить якісним підтвердженням наявності дефекту, що розвивається. Запропоновано методики визначення залишкової довговічності кінцевих балок мостових кранів: на етапі зародження тріщини за сигналами акустичної емісії, що виникають при вдавлюванні індентора, та на етапі розвитку тріщини за під час проведення динамічних випробувань. Контроль тріщин, що розвиваються в кінцевих балках, за сигналами акустичної емісії під час експлуатації можливий, при застосуванні сучасної апаратури з низьким рівнем власних шумів.

Ключові слова: *Акустична емісія, кінцева балка, неруйнівний контроль, активні дефекти, об'ємна пошкоджуваність, індентор.*

Постановка проблеми. Акустико-емісійний контроль вантажопідйомних кранів проводиться переважно з метою локації дефектів з подальшим визначенням їх параметрів

Машинобудування і зварювальне виробництво

іншими методами неруйнівного контролю [1, 2]. Його застосування для металоконструкцій кранів стримує обмежена кількість робіт з матеріалами, що застосовуються при виробництві вантажопідійомних кранів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методики для оцінки ступеня пошкодження та руйнування матеріалів і виробів при статичному навантаженні викладені в роботах українських вчених Скальського В.Р. [3, 4], Недосеки А.Я. [5-8] та ін., а при циклічному навантаженні огляд наведено в джерелі [9].

У працях В.Р. Скальського [3, 4] створено модель кількісної оцінки об'ємної пошкодженості кристалічних тіл. Механічна міра об'ємної пошкодженості матеріалу визначається як відношення суми новоутворених дефектів до об'єму, в якому вони утворилися. Механічна та акустико-емісійна міри об'ємної пошкодженості лінійно залежать від дійсної деформації полікристалічних тіл.

В альбомі [6] показано основні фактори, що знижують граничні зусилля, за яких з'являється акустична емісія (АЕ). Також показано практичне застосування АЕ при оцінці стану матеріалів конструкцій, наведено розроблені на основі АЕ технології контролю, необхідне обладнання та прилади. У монографії [7] викладено основні проблеми, пов'язані із забезпеченням безпеки експлуатації конструкцій та споруд, що виникають при розрахунку їх міцності, при випробуваннях та в процесі експлуатації. Велика увага приділена теорії, методів і засобів діагностики та оцінки стану матеріалу конструкцій, його залишкового ресурсу. Викладено основні питання теорії прогнозування та прийняття рішень при оцінці стану конструкцій. Висвітлено сучасні методи розрахунку та вимірювання температурних полів, напружень та деформацій, показано способи боротьби зі шкідливими наслідками зварювальних напружень та деформацій, розглянуто основи класичної та квантової механіки руйнування.

Відомо, що можливо реконструювати криву напруження-деформація з однієї кривої навантаження-глибина при кінетичному заглибленні сферичного індентора [10]. При цьому багато авторів застосовують вимірювання різних параметрів акустичної емісії для оцінки характеристик матеріалу при кінетичному індентуванні [11, 12].

Мета роботи. Дослідити вплив ступеня пошкодження при циклічному навантаженні на об'ємну пошкоджуваність при вдавлюванні індентора на основі використання акустичної емісії. Розробити методики оцінки залишкової довговічності кінцевих балок.

Основний матеріал дослідження. Для виконання досліджень була створена експериментальна установка на платі реєстрації акустичної емісії. Випробування на втому при різних коефіцієнтах асиметрії циклу проводили на установці осьового циклічного навантаження РС-1 [13]. Стробування сигналів проводили за циклом навантаження, щоб уникнути реєстрації шумів, як описано в [1]. Робоча смуга частот реєстрованих сигналів АЕ становила: 0,2...0,5 МГц.

У процесі зростання тріщини збільшується ексцентриситет зовнішнього навантаження на зразок і можливий його згин та провертання в захватах. Параметри навантаження, що унеможливають реєстрації сигналів АЕ від зазначених явищ, були визначені під час випробування технологічного зразка з надрізом.

Оцінка залишкової довговічності конструкцій на етапі зародження тріщини.

При вдавлюванні індентора максимумами активності АЕ відповідають мікроплинності, границі текучості та навантаженню близько 2500 Н (при діаметрі індентора 10 мм) (рис. 1), що узгоджується з [11]. При розтягуванні зразка активність АЕ, що відповідає мікроплинності, менша, ніж при досягненні границі текучості. Це пояснюється тим, що при навантаженні, що відповідає мікроплинності, відбувається деформація і руйнування мікронерівностей в зоні контакту індентор-зразок та тертя в місцях опирання зразка.

Теоретична модель акустико-емісійного вимірювання об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні

1. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості при вдавлюванні індентора пропорційна дійсній деформації при розтягуванні, отриманій при однакових ступенях деформації.

2. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості при вдавлюванні індентора зменшується в процесі напрацювання при напруженнях вище границі витривалості.

3. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості не залежить від пружних і залишкових напружень, або попереднього циклічного навантаження.

При вдавлюванні індентора приймаємо аналогічно акустико-емісійну міру пошкодженості, як відношення суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, в якому відбувається утворення дефектів:

$$\xi_{li} = \frac{\sum A}{V}. \quad (1)$$

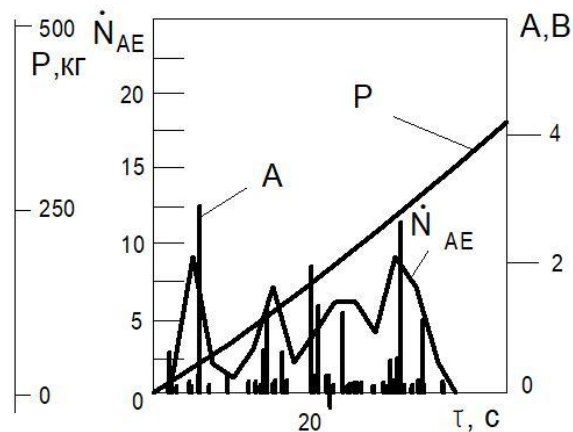


Рисунок 1 – Залежність активності АЕ $\dot{N}_{AE}$, числа імпульсів АЕ N_{AE} , амплітуди АЕ та навантаження P на індентор від часу (зразок – сталь S355)

Пластично деформована область являє собою напівсферу діаметром $D_p = 2,5 \cdot d$, де d – діаметр відбитка, об'єм якого:

$$V = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot D_p^3. \quad (2)$$

Дійсна деформація визначається за відносним звуженням ψ :

$$e = \ln \frac{1}{1 - \psi}.$$

Середня ступінь деформації еквівалентна відносному звуженню:

$$\psi = \frac{M - F}{M};$$

де M – площа сферичного сегменту, відповідного діаметра відбитку, м^2 ;
 F – площа круга, із якого видавлюється сферичний сегмент, м^2 .

$$\psi = 1 - k^2 + k^2 \cdot \left(\frac{t}{D} \right); \quad (3)$$

$$k = \frac{d_0}{d} = f\left(\frac{d}{D} \right)$$

де t – глибина відбитка, коли кулька знаходиться в ньому під навантаженням, м ;
 D – діаметр індентора, м .

За результатами кінцево-елементного моделювання апроксимуюча залежність приймає вид:

$$k = -0,5 \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3 + 0,94 \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^2 - 0,59 \cdot \left(\frac{t}{D} \right) + 1. \quad (4)$$

У даній роботі забезпечували досягнення значень рівномірної деформації, отриманої попередньо при розтягуванні циліндричних зразків.

Акустико-емісійну міру пошкодженості оцінювали за амплітудою, що огинає електричні сигнали події безперервної АЕ за 1 мс при вдавлюванні індентора діаметром 7,15 мм. Обробка результатів показала, що на етапі деформаційного зміцнення залежності $\xi_{1i} - e$, для сталей S235 та S355 у стані поставки, добре апроксимуються лінійними функціями (рис. 2): $\xi_{1i} = a_1 \cdot e + b_1$. Для S355: $\xi_{1i} = 30,6 \cdot e - 0,177$, ($R=0,98$); для S235: $\xi_{1i} = 1,45 \cdot e - 0,014$, ($R=0,975$).

З (1)-(3) випливає також, що при забезпеченні однакового ступеня деформації сума амплітуд АЕ буде пропорційна об'єму індентора, що було перевірено для інденторів діаметром 3,16; 7,15 і 9,5 мм. При використанні індентора малого діаметра можна досягти ступеня деформації, що відповідає утворенню «шийки». При цьому ξ_1 має збільшитися на порядок, за рахунок e [10]; але сума амплітуд зменшиться за рахунок розмірів зони пластичного деформування, і початкові значення амплітуд будуть знаходитися нижче порогу дискримінації. Цим обумовлений вибір діаметра індентора і ступеня деформації.

Величина критичного значення акустико-емісійної міри пошкодження визначена за результатами ідентифікування зразків, попередньо доведених до руйнування при випробуванні на втому, зі сталі S235 при симетричному циклі і зі сталі S355 при різній асиметрії циклу, при симетричному циклі та при середніх напруженнях стиснення (0, -100, -200 МПа). У межах лівої частини кривої втоми було випробувано по 4...5 зразків. Встановлено, що величина напружень і асиметрії циклу практично не впливає на АЕ міри пошкодженості. Таким чином, отримані залежності $\xi_{1i}^* - e$ характеризують граничний стан матеріалів. Для сталі S235 залежність має вигляд: $\xi_{1i}^* = 0,71 \cdot e - 0,02$; для сталі S355: $\xi_{1i}^* = 13,4 \cdot e - 0,065$.

Машинобудування і зварювальне виробництво

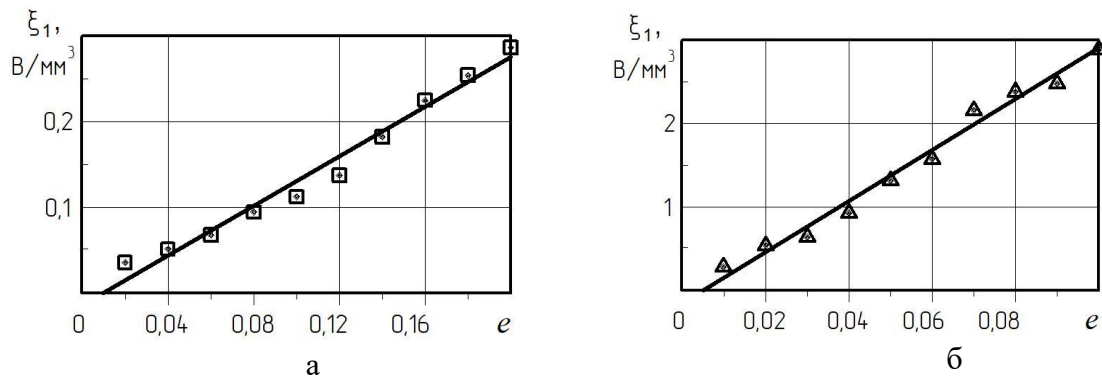


Рисунок 2 – Залежність акустико-емісійного міри пошкодженості від дійсної деформації при вдавлюванні індентора. а – S235, б – S355

Параметри АЕ можуть змінюватися при генеруванні і передачі від джерела до перетворювача акустичної емісії. Щоб уникнути впливу напружено-деформованого стану (НДС) на поширення акустичних хвиль, нижню межу смуги частот встановлюємо відповідно до [8]. Вплив залишкових напружень на твердість НВ не суттєвий [11]. Зразки досліджуваних сталей у вихідному стані навантажували до напружень стиснення -100 і -200 МПа на установці РС-1. Встановлено, що впливом пружних напружень на ξ_{1i} можна знехтувати.

На підставі запропонованої моделі акустико-емісійного міри об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні та знайдених емпіричних залежностей можна визначити залишкову довговічність у циклах (роках):

$$N_{ост} = \frac{\xi_{1i}^p - \xi_{1i}^*}{\xi_{1i} - \xi_{1i}^p} \cdot N_p; t_{ост} = \frac{\xi_{1i}^p - \xi_{1i}^*}{\xi_{1i} - \xi_{1i}^p} \cdot t_p; \quad (5)$$

де N_p , ξ_{1i}^p - число циклів, відпрацьованих на момент вимірювання, та значення АЕ міри пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні на момент вимірювання відповідно.

Оцінка залишкової довговічності конструкцій на етапі розвитку тріщини. Оцінку порогу чутливості методу проводили за критерієм виявлення тріщини, за який прийняли перевищення амплітуди на 20% порівняно з рівнем шумів, що спостерігаються в період розвитку тріщини. Амплітуда сигналів АЕ реєструвалася по трьох каналах: в стробі 1, відповідно фазовим кутам 0-80°; в стробі 2 - 80°-100°; в стробі 3 - 100°-360°. Для сигналів у стробах 1 і 3 мінімальна площа виявленої тріщини становить 0,18 мм³ (довжина 0,07 мм) та не залежить від досліджуваного матеріалу. Для сигналів у стробі 2 мінімальна швидкість росту тріщини склала 1...2·10⁻⁴ мм/цикл для сталі S355.

Дослідження сигналів від країв втомної тріщини. Сигнали від країв втомної тріщини записували під час випробувань на тріщиностійкість з коефіцієнтом асиметрії R= -1,0. Якісно підтверджується гіпотеза про те, що амплітуди сигналів пропорційні площі тріщини. Однак, має місце суттєвий розкид експериментальних даних, що пояснюється нестабільним характером тертя через фрикційне зношування країв [9]. З огляду на те, що при розвитку тріщин у вузлах з'єднання під час експлуатаційних навантажень руйнування відбувається за змішаним механізмом деформування, розкид даних буде ще більш помітним, що було підтверджено експериментально. Зразок з вирощеною втомною тріщиною фіксували в одному

із захватів машини, а інший повертали навколо осі зразка. Відсутність залишкової деформації скручування перевіряли індикаторним годинником з ціною поділки 0,001 мм.

Дослідження сигналів від пластичної деформації у вершині втомної тріщини. Швидкість зростання втомних тріщин в основному металі вузлів з'єднання головних і кінцевих балок менше порогових значень, при яких спостерігається лінійна залежність $A - l'$. Це пояснюється високим рівнем шумів навантажувального пристрою і застосовуваної АЕ апаратури, а також низьким рівнем сигналів АЕ, що генеруються в досліджуваних матеріалах, особливо для сталі Ст.3. При оцінці швидкості зростання тріщини за параметрами АЕ виникають складнощі, пов'язані з існуванням ефекту Кайзера. Після незначних перевантажень буде спостерігатися велика кількість пасивних циклів, тобто таких, в яких рівень сигналів АЕ буде нижче порогового рівня реєструючої апаратури. Тому параметри тріщин визначали по АЕ, що виникає при проведенні динамічних випробувань вантажем $1,1 Q_{ном}$. Встановлено, що для досліджуваних сталей перші сигнали від пластичної деформації у вершині тріщини виникають при перевантаженні до 10%. Вони можуть спостерігатися раніше реєстрації монотонно зростаючої амплітуди АЕ, яка передує початку росту тріщини і служить якісним підтвердженням наявності дефекту, що розвивається. Якщо навантаження досягає величини, що відповідає початку тріщини, то за значенням K_{IS} , при відомій залежності $K = f(l) \cdot P$, можливо визначити довжину тріщини і коефіцієнт інтенсивності напружень при експлуатаційних навантаженнях.

Для розглянутих тріщин значення K_{IS} практично не буде досягнуто, тому пропонується отримати значення K_{IS} екстраполяцією. Для деяких конструкційних матеріалів залежність амплітуди сигналів АЕ від навантаження до старту тріщини задовільно описується простою залежністю. Знаючи характер залежності $\sum A_i = f(P)$ по початковій ділянці кривої, можна шляхом екстраполяції визначити навантаження, що відповідає старту тріщини. Надалі, визначивши розмах коефіцієнта інтенсивності напружень, за відомими кінетичними діаграмами циклічної тріщиностійкості, можна визначити швидкість зростання тріщини і число циклів, до досягнення нею заданих розмірів (рис. 3). Для досліджуваних матеріалів встановлено, що до початку росту тріщини сума амплітуд задовільно апроксимується параболою. Для сталі S355 значення суми амплітуд, що відповідає початку тріщини: $\sum^* A_i = 7,60 \text{ } \mu\text{В}$.

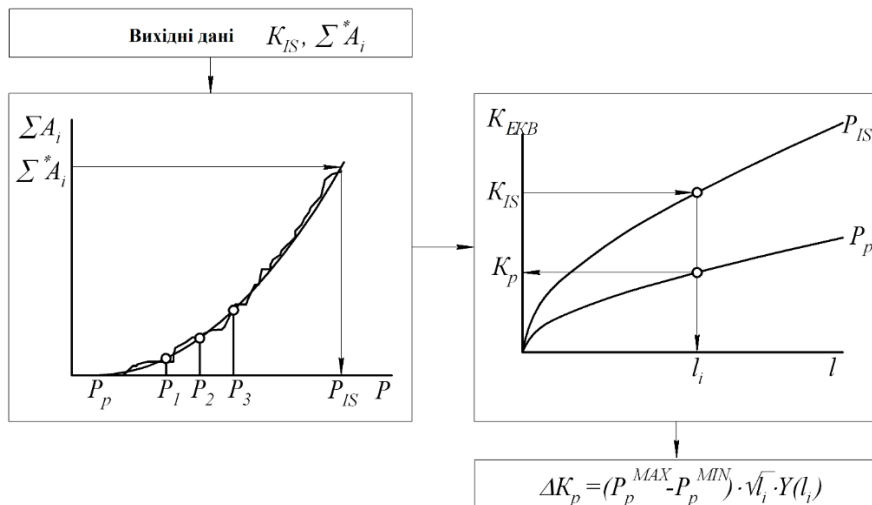


Рисунок 3 – Алгоритм оцінки залишкової довговічності за сумою амплітуд АЕ, що виникають при перевантаженні вузла з тріщиною.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано методики визначення залишкової довговічності: на етапі зародження тріщини за сигналами АЕ, що виникають при вдавлюванні індентора, та на етапі розвитку тріщини за сигналами АЕ при динамічних випробуваннях.

2. Контроль тріщин, що розвиваються в кінцевих балках, за сигналами АЕ під час експлуатації можливий, оскільки застосовується сучасна апаратура з більш низьким рівнем власних шумів.

Список використаних джерел

1. Zhang Yanbing, Yang Li. The Acoustic Emission Testing Technology on Large Crane Structure Damage. *Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 9-14. doi: 10.11648/j.eas.20200501.12
2. Іванов В.Н. Застосування методу акустичної емісії при діагностуванні металоконструкцій. / В.Н. Іванов, В.А. Кобзев, О.В. Суций, Н.Н. Парог // *Підйомні споруди. Спеціальна техніка*. 2002. № 8. С.19.
3. Скальський В.Р. Розробка методик і засобів оцінки об'ємної пошкодженості та руйнування матеріалів і виробів за параметрами акустичної емісії: Автореф. дис...д-ра. техн. наук: 01.02.04. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. Львів, 2003. 36с.
4. Скальський В.Р. Акустико-емісійне визначення накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл. / В.Р. Скальський // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. 2003. №2. С. 84 - 92.
5. Недосека С.А. Використання випробувань зварних зразків для оцінки прогностичних якостей акустико-емісійного обладнання / С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, І.Г. Волошкевич // *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2024, №3, стор. 45-48 <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.07>
6. Патон Б.Е. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко // . — Киев: ИНДПРОМ, 2012. — 312 с.
7. Nedoseka A. Fundamentals of evaluation and diagnostics of welded structures / Cambridge International Science Publishing Limited, 2012.— 642 с.
8. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций монография / А.Я. Недосека, С.А. Недосека // Учебное пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). - Киев : Индром. - 2020 – 886 с.
9. Huang M., Jiang L. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. / Huang M., Jiang L., Liaw P.K., Brooks C.R., Seeley R., Klarstrom D.L. // *JOM J. Minerals, Metals and Materials Soc*. 1998. Vol. 50. № 11. P. 1–12.
10. Pöhl F. A Methodology for Inverse Determination of Stress-strain Curves Based on Spherical Indentation. *Experimental Techniques* . 2018. Vol. 42. P. 343–353. <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0238-1>
11. Faisal N.H. Indentation testing and its acoustic emission response: applications and emerging trends / N.H. Faisal, R. Ahmed, R.L. Reuben // *International Materials Reviews*. 2011. Vol. 56(2). P. 98-142. doi: 10.1179/1743280410Y.0000000004
12. Martinez-Gonzalez E. Damage induced by a spherical indentation test in tool steels detected by using acoustic emission technique / E.Martinez-Gonzalez, G. Ramirez, J. Romeu, D. Casellas // *Experimental Mechanics*. 2015. Vol. 55. P. 449-458. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9959-y>

13. Сочава А.І. До розрахунку деталей машин на опір втоми / А.І. Сочава, Л.М. Мартовицький, В.І. Глушко, Р.О. Фролов, О.А. Задорожній // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2023. Вип. 2. С. 59-66. doi: 10.15588/1607-6885-2023-2-9

Sidorenko M. V., Kapustian O.Ye., Kravchenko Ye.O., Frolov R. O., Kozak D.S.

DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF END BEAMS OF BRIDGE CRANES USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

Acoustic emission is becoming an increasingly common method for assessing the condition, quality and degree of damage to metal structures and materials. The main theoretical basis for methods for estimating its parameters is set out in the works of Skalsky V.R. and Nedoseka A.Ya. The mechanical measure of volumetric damage of a material is defined as the ratio of the sum of newly formed defects to the volume in which they were formed. The mechanical and acoustic emission measures of volumetric damage linearly depend on the actual deformation of polycrystalline bodies. In this work, we ensured the achievement of uniform deformation values obtained previously during the stretching of cylindrical samples. A batch of samples subjected to fatigue loading with different cycle asymmetry coefficients of 0, -100, -200 MPa was investigated. The operating frequency band of the recorded signals was: 0.2...0.5 MHz. A theoretical model of acoustic emission measurement of volumetric damage during kinetic indentation was applied. Studies of acoustic emission signals from fatigue crack edges and from plastic deformation at the tip of fatigue crack for S235 and S355 steels were conducted. The hypothesis that the amplitudes of the signals are proportional to the crack area was confirmed. When estimating the crack growth rate by acoustic emission parameters, difficulties arise due to the existence of the Kaiser effect. After minor overloads, a large number of passive cycles will be observed, i.e., those in which the level of AE signals will be below the threshold level of the recording equipment. It was established that for the studied steels, the first signals from plastic deformation at the tip of the crack appear at an overload of up to 10%. They can be observed before the registration of a monotonically increasing amplitude, which precedes the beginning of crack growth and serves as qualitative confirmation of the presence of a developing defect. Methods for determining the residual durability of end beams of bridge cranes are proposed: at the stage of crack initiation by acoustic emission signals arising during indentation of the indenter, and at the stage of crack development by dynamic tests. Monitoring of cracks developing in end beams by acoustic emission signals during operation is possible when using modern equipment with a low level of inherent noise.

Keywords: *Acoustic emission, finite beam, non-destructive testing, active defects, volumetric damageability, indenter.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.