

АКУСТОЕМІСІЙНА МОДЕЛЬ ЦИКЛІЧНОГО ДЕГРАДУВАННЯ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНИХ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

С.О. Беженев

Запорізький національний технічний університет, Україна

Abstract. A power dependency of the total AE count rate on relative cycle stresses is proposed, based on dynamical dislocation yielding model. Following from the structural-energy theory of materials fracture, the formula, showing the co-relation between parameter (m) and the index of power (n_{AE}) of AE characteristics of material is proposed. The results of the experimental verification of the proposed theoretical backgrounds are presented, which prove their validity.

Постановка проблеми. Багаторічна практика показує, що переважна більшість інженерних конструкцій працює в умовах дії циклічних навантажень, коли визначальним видом руйнування є втома. Тому задача отримання достовірних даних щодо опору втомі конструкційних матеріалів є актуальною для багатьох галузей економіки. Врахування різноманітних експлуатаційних, конструкційних та технологічних факторів лише розрахунковими методами не забезпечує необхідної точності прогнозування механічної поведінки виробів в умовах втоми, що потребує проведення довготривалих випробувань задля верифікації результатів розрахунків. Отже повністю відмовитися від тривалих випробувань на втому на сьогодні не є можливим, а матеріальні та часові витрати на забезпечення таких випробувань є очевидними. Поряд із розвитком методик прогнозування циклічної довговічності конструкційних матеріалів на великих базах періодичного навантаження за даними високочастотних випробувань одним з перспективних напрямків оцінювання технічного стану виробів, що експлуатуються в умовах багатоциклової втоми (БЦВ), є застосування методу акустичної емісії (АЕ). Проте основним фактором, що стримує розв'язання задачі визначення ступеню пошкодженості елементів конструкцій під дією періодичних навантажень, є недосконалість сучасних методів оцінювання характеристик опору втомі конструкційних матеріалів, особливо при використанні не руйнуючих методів контролю. Такий стан проблеми зумовлений складністю визначення реального напружено-деформованого стану (НДС) локальних об'ємів матеріалу, що є відповідальними за його руйнування, до того ж все ще залишається проблемним встановлення зв'язку між ступенем деформації конструкційного матеріалу та параметрами АЕ в заданих умовах навантаження.

Метою даної роботи є, використовуючи нові підходи до дослідження БЦВ, встановити залежності між параметрами сигналів АЕ та характеристиками опору втомі, які б дозволили здійснювати оцінювання циклічної деградації конструкційних матеріалів не руйнуючим способом.

Теоретичне обґрунтування вирішення задачі. В роботі використано новий підхід до дослідження процесу БЦВ, який оснований на гіпотезі [1] про існування полюсу кривих БЦВ матеріалів одного класу з різною технологічною спадковістю. Згідно прийнятої гіпотези традиційне двопараметричне рівняння кривої втоми трансформується у рівняння

$$N \cdot \sigma_a^m = N_P \cdot \sigma_P^m = C_{HCF}, \quad (1)$$

в якому змінними є три величини: σ_a , N , а також m – показник нахилу кривої втоми, який залежить від технічного стану матеріалу виробу і визначається співвідношенням

$$m = \frac{\lg(C_{HCF}/N_P)}{\lg \sigma_P}, \quad (2)$$

де N_P и σ_P – координати полюсу кривих БЦВ, які є інваріантами для матеріалу певного класу [2]; C_{HCF} – константа опору БЦВ, яка в логарифмічному масштабі є мірою максимально допустимої пошкодженості матеріалу в конкретному технічному стані.

Такий підхід дозволяє використати модель БЦВ [3], згідно якої темп циклічного деградування матеріалу задається величиною параметра m як мірою стійкості локального об'єму до зовнішнього навантаження в умовах БЦВ. Тоді інтенсивність АЕ випромінювання пов'язується з інтенсивністю змінювання НДС локального об'єму, що не суперечить відомим АЕ моделям. Оскільки кожний акт АЕ зумовлений вивільненням дислокацій в локальних об'ємах з підвищеною концентрацією напружень, то спираючись на динамічну дислокаційну модель плинності [4]

$$t = n_0 t_0 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\frac{1}{n \cdot k \cdot T}}, \quad (3)$$

і враховуючи, що рівняння (1) можна записати у вигляді рівняння питомих енергій

$$W' = W'_0 \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_P} \cdot \left(\frac{N_P}{N} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4)$$

яке також має кінетичну структуру, постулюємо степеневу залежність

$$\dot{N}_{\Sigma AE} = \dot{N}_{\Sigma AE(0)} \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_P} \right)^{n_{AE}}, \quad (5)$$

звідки після логарифмування одержуємо рівняння

$$n_{AE} = \frac{\lg(\dot{N}_{\Sigma AE} / \dot{N}_{\Sigma AE(0)})}{\lg(\sigma_a / \sigma_P)}. \quad (6)$$

Тут чисельник є мірою відносної швидкості появи сигналів АЕ, а сам показник степені n_{AE} є логарифмічною мірою інтенсивності АЕ випромінювання матеріалу при його циклічному навантаженні.

Використовуючи закон дискретності структурно-енергетичної теорії руйнування матеріалів [5], для зв'язку між граничною мірою пошкодженості матеріалу в одному циклі навантаження та мінімальною мірою швидкості появи сигналів АЕ при накопиченні пошкоджень в матеріалі із заданим законом циклічного навантаження у вигляді

$$\Delta^{1/n} = \mu = \frac{n_{AE} \cdot \lg \Delta \sigma_a}{m \cdot \lg \sigma_P}, \quad (7)$$

одержуємо залежність

$$n_{AE} = \mu \cdot m \cdot \frac{\lg \sigma_P}{\lg \Delta \sigma_a}, \quad (8)$$

яка встановлює зв'язок між характеристикою опору втоми матеріалу та його акустоемісійною активністю. Проте, у залежність (8), мають бути уведені деякі поправки, оскільки процес накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні має стадійний характер та визначається механізмами з різним рівнем енергій. При цьому важливим є інкубаційний період втоми, так звана стадія нелокалізованого руйнування [6], коли в структурі матеріалу утворюються субмікроскопічні тріщини, випадково розташовані по об'єму. Тут загально визначеними є такі стадії [7]: I – стадія динамічної стабілізації структури, коли мають місце зворотні процеси локальної перебудови структури матеріалу; II – стадія мікроплинності, де відбувається часткова локальна незворотна перебудова структури матеріалу; III – стадія деформаційного зміцнення з інтенсивними незворотними процесами локальної перебудови структури матеріалу.

Перш за все, слід очікувати, що процеси накопичення пошкоджень на кожній з названих стадій характеризуватимуться своїм значенням коефіцієнта жорсткості напруженого стану матеріалу $\mu_{(i)}$ ($i = I, II, III$), який визначає енергетичний бар'єр руйнування останнього. По-друге, наявність концентратора напружень по різному буде

позначатися на перебігу процесів накопичення пошкоджень на різних стадіях, що має враховуватися відповідним коефіцієнтом $k_{\alpha(i)}$. На стадії динамічної стабілізації структури матеріалу цей коефіцієнт можна прийняти як $k_{\alpha(I)} \approx 1$, оскільки для зворотних процесів локальної перебудови зміна НДС біля концентратора зумовлює, головню, зміну енергетичного рівня руйнування, що відповідає певному значенню коефіцієнта $\mu^{(j)}_{(i)}$ ($j = I - VII$, згідно енергетичного спектра [5]). На стадії мікроплинності за умови переважності пружних перебудов наявність концентратора слід врахувати як $k_{\alpha(II)} = \alpha_\sigma$, де α_σ – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень. На стадії деформаційного зміцнення за умови пружнопластичного деформування наявність концентратора враховується, згідно формули Нейбера [8], як $k_{\alpha(III)} = \alpha_\sigma^2$. По-третє, встановлюючи зв'язок між інтенсивністю накопичення утомних пошкоджень та акустоемісійною активністю матеріалу, слід враховувати, що певні спотворення цієї залежності можуть вноситися зворотними процесами деформування локальних об'ємів, характерними для стадії динамічної стабілізації структури, тривалість якої (N' , циклів) для різних матеріалів є різною і зумовлена ступенем упорядкованості структури. Такі спотворення залежності (8) на різних стадіях можна врахувати коефіцієнтом $k_{N(i)}$. На першій стадії встановлення значення коефіцієнта $k_{N(I)}$ є предметом подальших досліджень через значну швидкоплинність цієї стадії та дуже низький рівень параметрів сигналів АЕ. На другій стадії інтенсивність часткової локальної незворотної перебудови структури в кожному циклі навантаження є того ж порядку, що й інтенсивність зворотних процесів деформування локальних об'ємів. Тут значення коефіцієнта $k_{N(II)}$ можна знайти як:

$$k_{N(II)} = \frac{\lg(N_p/N')}{\lg(N_p/1)}, \quad (9)$$

де чисельник характеризує інтенсивність локального деформування в процесі динамічної стабілізації структури, а знаменник – інтенсивність локальних деформаційних процесів стабілізованої структури матеріалу за один цикл. На стадії деформаційного зміцнення, яка реалізується при напруженнях циклу, що перебільшують границю витривалості матеріалу, врахування впливу числа циклів N' втрачає сенс, оскільки у кожному циклі навантаження мають місце лише незворотні процеси локальної перебудови матеріалу ($k_{N(III)} = 1$). Таким чином, остаточно маємо:

$$n_{AE(i)} = \mu^{(j)}_{(i)} \cdot m \cdot \frac{\lg \sigma_p}{\lg \Delta \sigma_a} \cdot k_{\alpha(i)} \cdot k_{N(i)}, \quad (10)$$

де індекс « i » визначає стадію нелокалізованого руйнування, а індекс « j » – порядковий номер енергетичного рівня руйнування

Експериментальна перевірка теоретичного рішення. Досліджували зразки вуглецевих та малолегованих сталей як у стані постачання (нормалізація, Н), так і після поверхневого зміцнення (ультразвукове зміцнення, УЗЗ). Досліджували три партії лопаток компресора із сплаву титана ВТ8 з різною технологічною спадковістю: лопатки, що були виготовлені за серійною технологією (СТ), лопатки, поверхні яких було зміцнено шляхом низькотемпературного ціанування (НТЦ), а також лопатки СТ з подальшим НТЦ, у яких на вхідній кромці було зроблено надрізання трикутного профілю глибиною 0,5 мм, що імітувало забоїну (НТЦ + дефект). Утомні та акустоемісійні дослідження виконували за методиками, викладеними у [9].

В результаті АЕ контролю виробів було одержано їх АЕ характеристики – залежності швидкості рахування АЕ (\dot{N}_{AE}) від відносних циклічних напружень (σ_a/σ_p), за якими було визначено значення показника n_{AE} для кожної із зафіксованих стадій деградування матеріалів виробів. Достовірні дані вдалося одержати тільки для стадій мікроплинності та деформаційного зміцнення. Експериментально одержані значення було порівняно з розрахунковими значеннями, одержаними за формулою (10). Результати порівняння наведено на рис.1, де суцільні лінії – розрахункові залежності показника n_{AE} від параметра m для різних енергетичних рівнів на стадії мікроплинності, пунктирні – на стадії деформаційного зміцнення, точками позначено експериментальні

значення для різних матеріалів у різному технічному стані. Відхилення розрахункових значень від результатів експериментів не перебільшують 5 %.

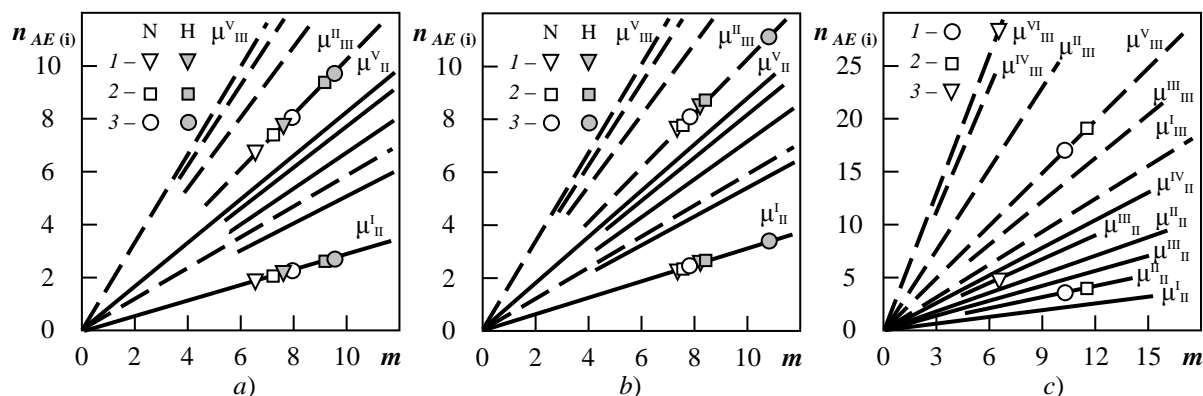


Рис. 1. Розрахунково-експериментальні залежності міри інтенсивності АЕ від міри інтенсивності втомного деградування матеріалів у різному технічному стані (N – нормалізація, H – зміцнення УЗЗ)

a) зразки з вуглецевих сталей: 1 – сталь 20, 2 – сталь 45, 3 – сталь У7А;

b) зразки з легированих сталей: 1 – сталь 40Х, 2 – сталь 40ХН2МА, 3 – сталь 30ХГСА

c) лопатки зі сплаву ВТ8: 1 – СТ, 2 – НТЦ, 3 – НТЦ + дефект.

Висновки. На основі поєднання нового підходу до дослідження процесу багатоциклової втоми з динамічною дислокаційною моделлю плинності запропоновано степеневу залежність швидкості рахування АЕ від відносних напружень циклу. З позицій структурно-енергетичної теорії руйнування матеріалів запропоновано формулу, яка пов'язує параметр утомного руйнування m з показником степені n_{AE} АЕ характеристики матеріалу. Обґрунтовано уведення поправочних коефіцієнтів, які враховують особливості локальних деформаційних процесів на різних стадіях нелокалізованого руйнування. Експериментальними дослідженнями підтверджено достовірність результатів, одержаних теоретично.

1. Беженев, С.А. О некоторых методологических проблемах теории усталостного разрушения конструкционных материалов /С.А.Беженев //Надійність і довговічність машин і споруд. – 2008. – Вип. 30. – С. 6 – 14.
2. Беженев, С.А. Модель механического поведения металлических материалов в условиях многоциклового усталости /С.А.Беженев //Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Дн-ськ: Ліра, 2012. – Вип.20. – С. 66 – 73.
3. Беженев, С.А. Методические аспекты проблемы оценки характеристик сопротивления усталости металлических материалов /С.А.Беженев //Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – 2011.– № 1.– С. 27–31.
4. Екобори, Т. Научные основы прочности и разрушения материалов /Т.Екобори. – К.: Наукова думка, 1978. – 352 с.
5. Иванова, В.С. Природа усталости металлов /В.С.Иванова, В.Ф.Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
6. Трощенко, В.Т. Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщение 2. Продолжительность стадий зарождения и развития усталостных трещин /В.Т.Трощенко, Л.А.Хамаза //Проблеми прочності. – 2014. – № 4. – С. 5 – 20.
7. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов /В.Ф.Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 288 с.
8. Сопротивление материалов деформированию и разрушению /В.Т.Трощенко, А.Я.Красовский, В.В.Покровский, Л.А.Сосновский, В.А.Стрижало //Справочное пособие, Т.1. – К.: Наукова думка, 1993. 243 с.
9. Беженев, С. Застосування методу акустичної емісії для оцінювання впливу поверхневого зміцнення на характеристики опору багатоциклової втоми залізобуглецевих сплавів /С.Беженев //Вісник ТНТУ. – 2013. – № 3 (71). – С. 204 - 214.