

¹В.А. Глива, ¹М.І. Делас, ¹В.І. Токарев, ²В.І. Клапченко

¹ Національний авіаційний університет, Київ

² Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ У МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Виявлено можливості діагностування процесу появи тріщин у металевих конструкціях за рахунок змін вібраційних характеристик. Розроблено математичний апарат щодо оцінювання розмірів і кількості тріщин внаслідок змін термодинамічних показників.

Ключові слова: *металева конструкція, тріщина, вібрація, діагностика*

Выявлены возможности диагностирования процесса появления трещин в металлических конструкциях за счет изменений вибрационных характеристик. Разработан математический аппарат по оценке размеров и количества трещин вследствие изменений термодинамических показателей.

Ключевые слова: *металлическая конструкция, трещина, вибрация, диагностика*

The paper identified the possibility of diagnosis of the appearance of cracks in metal structures due to changes in the vibration characteristics. developed mathematical tools to assess the size and number of fractures due to changes in the thermodynamic parameters.

Keywords: *metal construction, crack, vibration diagnostics*

Постановка проблеми

Надійність металевих конструкцій різного призначення, своєчасне діагностування початку процесів тріщиноутворення, визначення можливості їх кількісних характеристик є невід'ємною складовою безпечної експлуатації будівель і споруд та транспортних засобів.

Головним чином це стосується підприємств, на яких значна кількість металевих конструкцій працюють в умовах значних механічних і термічних навантажень, наприклад, конструкцій повітряних суден.

Особливістю умов експлуатації таких конструкцій є змінність статичних та наявність знакозмінних навантажень, які супроводжуються вібраційними процесами різних амплітуд, що значно прискорює процеси зародження та розвитку мікрodefektів.

Контроль фізичного стану металевих конструкцій (втрата міцнісних характеристик внаслідок утомних процесів) традиційними методами, а саме, періодичними візуальними та апаратними обстеженнями, не завжди є можливий і ефективний, а у багатьох випадках дуже затратний.

Тенденцією сьогодення як в Україні, так і в усьому світі є підвищення вимог промислової безпеки. У цих умовах все актуальнішою стає проблема своєчасного виявлення найнебезпечніших для міцності конструкцій дефектів типу тріщин за умови деградації металу, що відбувається внаслідок тривалої їх експлуатації під дією механічних та корозійних чинників і фізичних полів.

Це потребує розроблення придатних до використання у реальних умовах, простих в експлуатації, маловитратних засобів контролю фізичного стану металевих конструкцій, особливо тих, що перебувають під значними циклічними навантаженнями.

Аналіз попередніх досліджень

Одним із використовуваних і добре опрацьованих методів неруйнівного контролю стану металевих конструкцій є метод акустичної емісії [1]. Технічна та економічна доцільність його використання обумовлені тим, що цей метод не використовує шкідливі для працюючих випромінювання (рентгенівське, радіоактивне) і не потребує подачі у контрольований елемент конструкції тестових сигналів.

Більшість досліджень і прикладних розробок стосуються споруд та конструкцій спеціального призначення [2] і регламентуються відповідними нормативами з неруйнівного контролю і моніторингу стану будівельних конструкцій [3; 4].

Розробки щодо впливу струмів витoku на міцнісні характеристики металоконструкцій стосуються переважно трубопроводів різного призначення [5]. Поодинокі дослідження щодо негативного впливу кількох фізичних факторів на стан металоконструкцій [6] оперують виключно експериментальними даними без узагальнення отриманих результатів і їх використання для виявлення і прогнозування негативних явищ у металевих конструкціях різного режиму експлуатації, виготовлених з різних металів тощо.

Попередні розробки і дослідження щодо контролю фізичного стану металевих конструкцій [7; 8] дозволили дійти висновку про можливість спрощення діагностики мікро- та макродефектів у металоконструкціях та узагальнення цієї методики з використанням статистичних методів оцінювання термодинамічних показників.

Мета статті

Метою роботи є розроблення експериментальних та теоретичних засад діагностики дефектів у металевих конструкціях за змінами їх віброакустичних характеристик та термодинамічних показників.

Виклад основного матеріалу дослідження

У загальному випадку показниками надійності і безпечності металевих конструкцій є відсутність процесів тріщиноутворення на їх критичних ділянках внаслідок втомних процесів та зниження міцності конструкцій внаслідок процесів електро- та електрохімічної корозії.

Розвиток тріщин, як на стадії фіксації передумов появи мікротріщин, так і на стадії формування магістральних тріщин надійно реєструється методами акустичної емісії. Зазвичай це потребує наявності досить складної апаратури з багатоканальним приймачем акустичних сигналів [9].

Сигнали початку тріщиноутворення практично в усіх конструкційних матеріалах припадають на ультразвукову частоту акустичного спектра, що підтверджено надійними експериментальними даними і висвітлено у довідковій літературі.

Досвід моніторингу стану металевих конструкцій свідчить, що метод акустичної емісії найбільш прийнятний для діагностування металевих конструкцій, які перебувають під статичними навантаженнями або близьких до них. Це металоконструкції шахтного обладнання,

магістральні трубопроводи, контури з теплоносійми електростанцій тощо. У таких конструкціях вібраційні коливання відносно невеликі і визначаються, в основному, змінами навантажень та пульсуючими змінами тиску.

В умовах значних вібрацій, враховуючи малі амплітуди ультразвукових сигналів, їх надійна реєстрація досить проблематична. Дослідження процесів деформації сплаву АМг6 показали, що за умови наявності і контролю широкого акустичного спектра на реальних конструкціях амплітуди ультразвукових сигналів на стадіях пластичних деформацій та деформацій тріщиноутворення відрізняються у межах похибок п'єзоелектричних датчиків.

Виходячи з цього, представляє інтерес виявлення закономірностей формування акустичного спектра коливань металевих конструкцій у звуковій області. Спектри таких коливань визначалися в лабораторних умовах. Випробування виконувалися в установці ИМАШ 20-78 зі знакозмінними навантаженнями. Для досліджень використовувалися пласкі зразки сплаву АМг6 з розмірами робочої частини 30×3×2 мм, які попередньо відпалювалися за температури 623 К упродовж двох годин.

Для випробувань використовувалися широкосмугові датчики, при цьому чутливість апаратури становила 15 мкВ [10]. Навантаження здійснювалися до заздалегідь відомих зрушень у мікроструктурі зразків. Результати випробувань показано на рис. 1.

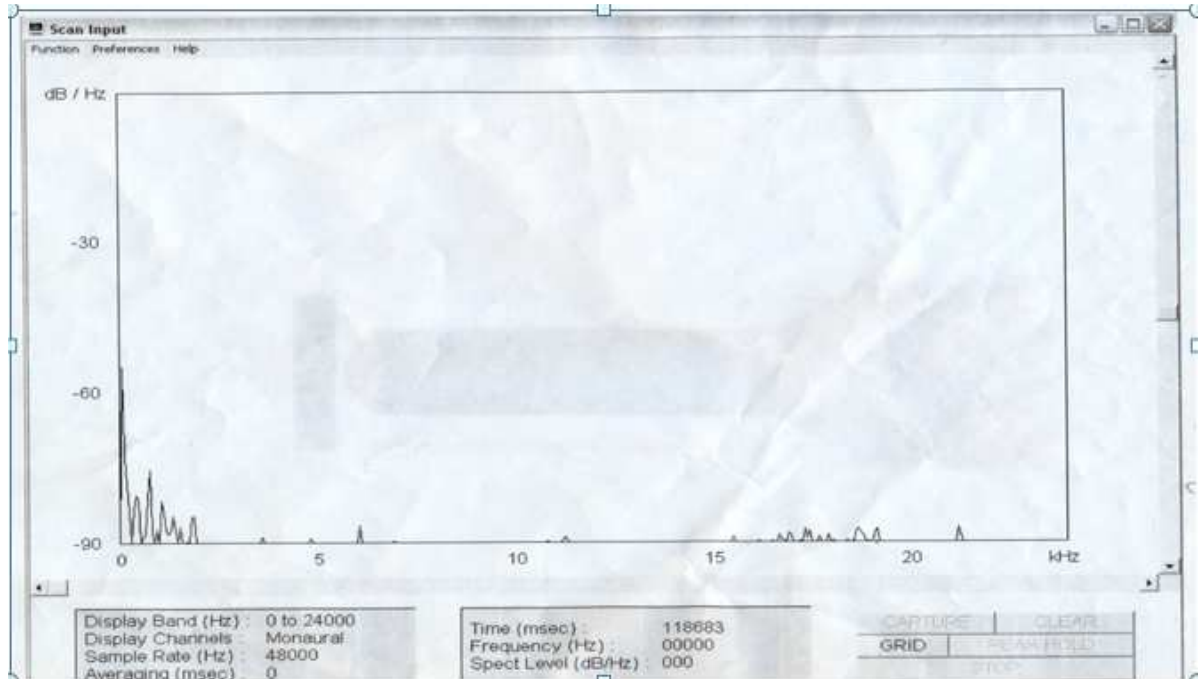
Як видно, розвитку негативних процесів у матеріалі відповідає зростання амплітуди звукових сигналів на частоті, близькій до 17 кГц, що доцільно використовувати для оперативного діагностування даного конструкційного сплаву. При цьому монотонність кривої амплітудно-частотної залежності, відсутність її перегинів свідчить про наближення до руйнівного стану конструкції.

Треба зазначити, що діагностування процесів утворення мікро- та макродефектів для різних конструктивних матеріалів та змінами віброакустичних характеристик залежить від хімічного складу матеріалу, його вихідних міцнісних характеристик, режимів попередніх механічних, термічних та термомеханічних обробок тощо. Тому смуги звукових частот, прийнятних для отримання необхідних даних повинні суттєво відрізнятися.

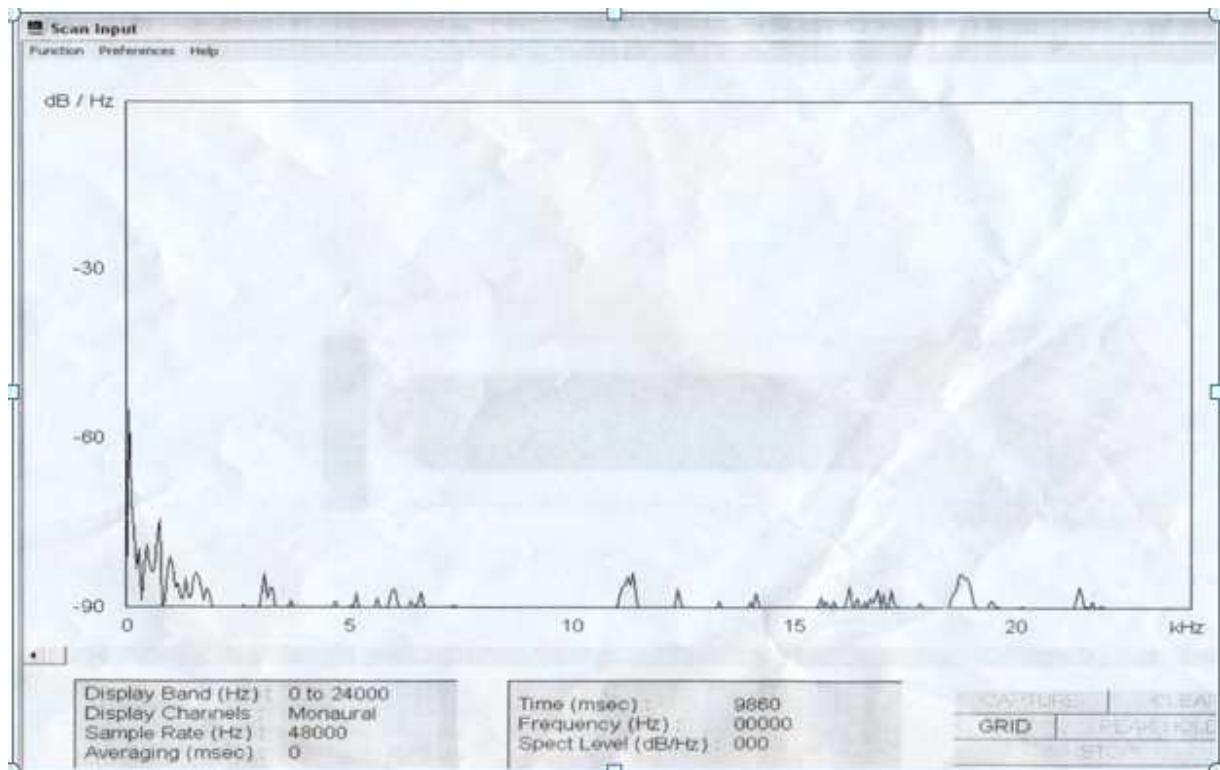
Виходячи з викладеного, перспективним вважається проведення комплексних експериментальних та теоретичних досліджень з метою розроблення засад віброакустичного діагностування дефектів у металевих конструкціях, виготовлених зі сплавів різних класів та марок з використанням статистичних методів оцінювання концентрацій мікродефектів у конструкційних матеріалах.

У літературних джерелах наведено експериментальні дані, отримані в результаті вимірювання і статистичного оцінювання мікрodefektів у межах деякої контрольної ділянки [11-14]. Наведено дані різних досліджень з накопичення мікрodefektів не тільки при циклічних навантаженнях, а також у результаті таких процесів,

як повзучість, статичний розтяг та виникнення пор в пластичних сплавах. Аналіз акустичних спектрів обраного сплаву свідчить, що акустограми різних стадій навантажень відрізняються у звуковій частині спектра 15-20 кГц і мають повні закономірності формування та прийнятну повторюваність (рис. 2).

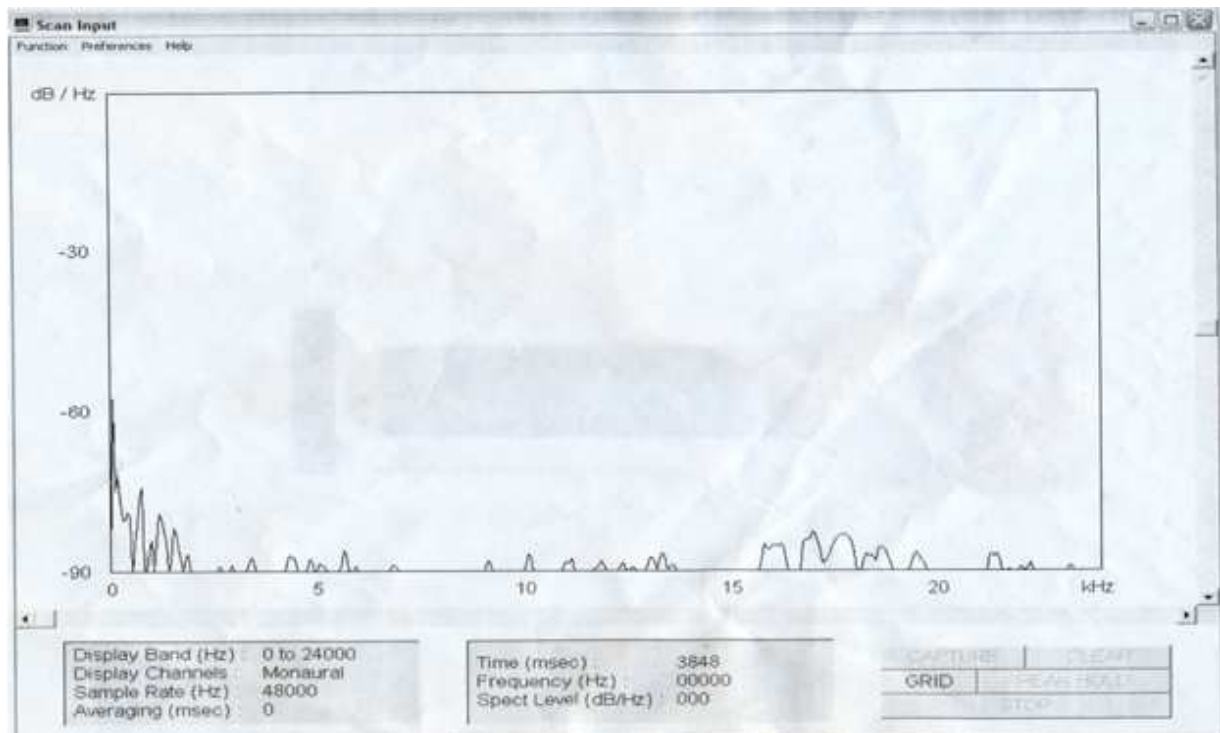


a



b

Рис. 1. Акустограми зразків сплаву АМг6 на різних стадіях механічних навантажень: а – пружна область; б – початок утворення мікротріщин; в – передруйнівна стадія



6
Рис. 1. Закінчення.

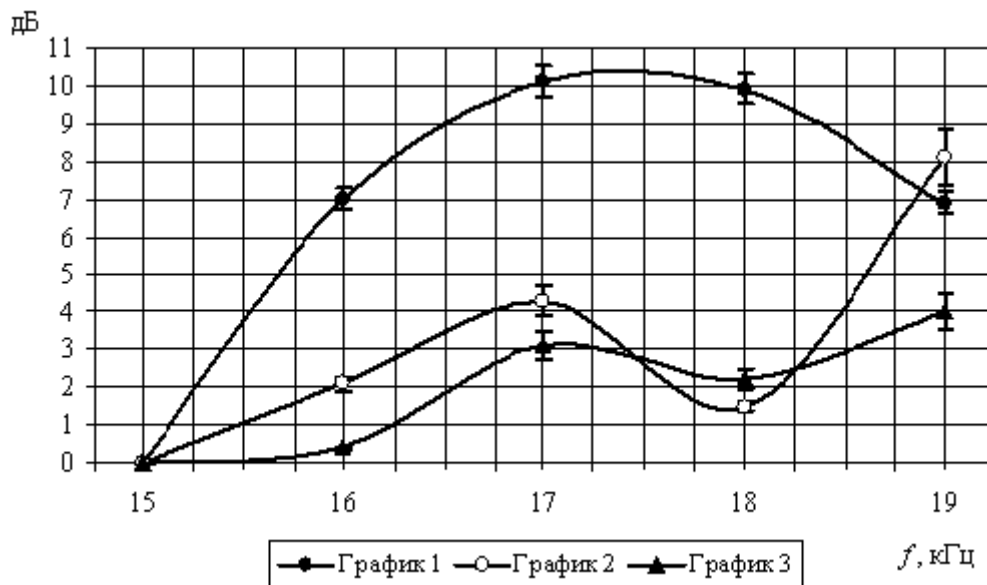


Рис. 2. Залежність амплітуд звукових сигналів зі сплаву АМг6 на різних стадіях навантаження:
1 – передруйнівна стадія; 2 – початок утворення мікротріщин; 3 – пружна область

У попередніх роботах [13; 14] запропоновано використання методів розподільних самоорганізованих систем. Мікротріщини розглядаються з єдиної точки зору, а саме, з позиції того, що на великій кількості деяких «споживачів» розподіляється деякий обмежений обсяг ресурсів (на мікротріщинах розподіляється поглинена ними енергія). Розподіл енергії здійснюється відповідно до ентропійного

принципу. Запропонований ентропійний принцип можна ефективно застосовувати для дослідження складних систем. У його основі лежить розуміння того, що будь-яка розподілена величина, що характеризує стан системи (у даному випадку – енергія утворення дефектів), розподіляється всередині цієї системи найбільш імовірним чином. Отже, ентропія цього розподілу досягає свого

максимального значення. Умовний максимум ентропії виступає інтегральним критерієм того, що з безлічі можливих варіантів найбільш ймовірно система реалізує себе саме у цій конфігурації.

Даний підхід добре описує експериментальні дані. При дії знакозмінного навантаження частина енергії W витрачається на формування дефектів. Їх загальну кількість N можна розбити на M класів (рис. 3), кожен з яких складається з представників n_i , які споживають однакову кількість енергії ε_i . Для визначених параметрів використовуються такі обмеження:

$$\sum_{i=1}^M n_i = N, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^M W_i = \sum_{i=1}^M n_i \varepsilon_i = W. \quad (2)$$

Якщо припустити, що енергія ε_i , яка поглинається одиничним дефектом пов'язана з його лінійним розміром, то впливає таке співвідношення:

$$\varepsilon_i = \varepsilon(l_i), \quad (3)$$

а вираз (2) набуде вигляду:

$$\sum_{i=1}^M n_i \varepsilon(l_i) = W. \quad (4)$$

Задача визначення розподілу кількості дефектів від їх розміру зводиться до пошуку розподілу дефектів від величини енергії їх утворення. Відповідно до ентропійного принципу ця залежність $n_i = \varphi(\varepsilon_i)$ формується такою, що по всіх виділених класах дефектів розподіл енергії здійсниться з максимальною досяжністю, а значить буде отримано умовний максимум ентропії. З цією метою можна використовувати ентропію Шеннона:

$$H = - \sum_{i=1}^M p_i \ln p_i \quad (5)$$

Для розподілу енергії $W = n_i \varepsilon_i$ по класах ймовірність дорівнює:

$$p_i = \frac{n_i \varepsilon_i}{W}$$

Таким чином, розподіл $n_i = f(\varepsilon_i)$ визначається як результат розв'язання задачі на умовний максимум ентропії, записаної в такому вигляді:

$$H_w(n_i) = - \sum_{i=1}^M \frac{n_i \varepsilon_i}{W} \ln \frac{n_i \varepsilon_i}{W} \quad (6)$$

Для визначення умовного екстремуму використовується метод множників Лагранжа. Для досягнення умовного максимуму досить розв'язати задачу знаходження безумовного екстремуму нової функції, яка адитивно включає рівняння зв'язку (1) і (2), а також множники Лагранжа:

$$\Phi(n_i) = - \sum_{i=1}^M \frac{n_i \varepsilon_i}{W} \ln \frac{n_i \varepsilon_i}{W} + \alpha \left(\sum_{i=1}^M \frac{n_i}{W} - \frac{N}{W} \right) + \beta \left(\sum_{i=1}^M \frac{n_i \varepsilon_i}{W} - 1 \right) \quad (7)$$

Прирівнявши до нуля похідні

$$\frac{\partial \Phi(n_i)}{\partial n_i} = - \frac{\varepsilon_i}{W} \ln \frac{n_i \varepsilon_i}{W} - \frac{\varepsilon_i}{W} + \alpha \frac{1}{W} + \beta \frac{\varepsilon_i}{W} = 0,$$

отримаємо рішення:

$$n_i = \frac{C_i}{\varepsilon_i} \exp \left(\frac{\alpha}{\varepsilon_i} \right) \quad (8)$$

де $C_i = n_* \varepsilon_* e$.

З умови $\frac{dn_i}{d\varepsilon_i} = 0$,

впливає $\alpha = -\varepsilon_*$, а константа $C_i = n_* \varepsilon_* e$. Як результат розподіл можна записати у вигляді:

$$\frac{n_i}{n_*} = \frac{\varepsilon_*}{\varepsilon_i} \exp \left(1 - \frac{\varepsilon_*}{\varepsilon_i} \right) \quad (9)$$

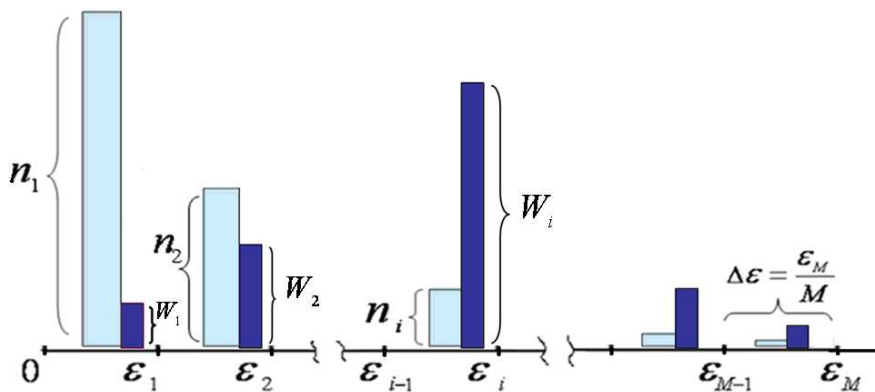


Рис. 3. Розподіл «носіїв» n_i і «ресурсів» W_i серед осередків M -фазового простору

Оскільки зі зростанням аргументу вплив експоненціального множника у виразі (9) практично нівелюється, то воно асимптотично наближається до гіперболічної залежності:

$$n_i = \frac{n_* \varepsilon_* e}{\varepsilon_i} = \frac{C_i}{\varepsilon_i} \quad (10)$$

Розподіл кількості дефектів від їх розміру можна отримати, підставивши у формулу (10) вираз (3), що зв'язує розмір дефекту з величиною поглинаючої ним енергії $\varepsilon_i = \varepsilon(l_i)$:

$$\frac{n_i}{n_*} = \frac{\varepsilon(l_*)}{\varepsilon(l_i)} \exp \left[1 - \frac{\varepsilon(l_*)}{\varepsilon(l_i)} \right] \quad (11)$$

де l_* , n_* – координати точки екстремуму цієї кривої.

Для оцінки залежності, яка зв'язує поглинаючу енергію мікротріщинами $\varepsilon_i = \varepsilon(l_i)$ з її розмірами, використовується феноменологічний підхід. Очевидно, енергія, яка поглинена тріщинами в процесі циклічного навантаження, витрачається на руйнування міжкристалічних зв'язків і перетворюється в тепло в зоні пластичності. Враховуючи, що на одиницю площі мікротріщини припадає приблизно однакова кількість розірваних міжкристалічних зв'язків, можна вважати, що енергія пропорційна її площі:

$$\varepsilon_{i(crack)} \sim l_i^2 \quad (12)$$

У результаті багатьох експериментальних досліджень з'ясовано, що розвиток дефектів тісно пов'язаний з процесом пластичної деформації матеріалу, локалізованого на границі цих дефектів. З одного боку, така зона локалізованої пластичності це основа для зростання розміру мікротріщини, а з другого – вона ж є головним споживачем тієї частини енергії, яка визначається як енергія дисипації. Як показали вимірювання за допомогою методу інфрачервоної термографії [15 – 17], найбільш інтенсивне виділення тепла відбувається на границі тріщин.

Енергія дисипації пропорційна середній роботі, яку здійснює розклинювальна сила P . Ця сила здійснює пластичну деформацію матеріалу біля вершини тріщини, зміщуючи його на деяку ефективну відстань Δh . Зважаючи на малість мікротріщини, цю роботу можна оцінити, вважаючи, що сила P пропорційна площі тріщини $P \sim l^2$. Величина Δh пропорційна величині зусилля P у степені, який не дорівнює одиниці. У пластичній зоні умови лінійно-пружного механізму руйнування вже не є справедливими. Враховуючи, що в таких випадках ділянка діаграми «напруження – деформація» відхиляється вправо від прямої лінії, значення цього степеня більше одиниці. Тому можна припустити, що вираз для Δh_i буде мати такий оцінний характер:

$$\Delta h \sim (l_i^2)^\delta,$$

де $\delta > 1$. Енергія дисипації мікротріщини може бути оцінена так

$$\varepsilon_{i(dis)} \sim l_i^2 (l_i^2)^\delta = l_i^{2+2\delta} \quad (13)$$

Таким чином, показник степеня γ , що зв'язує розмір мікротріщини з її енергією дисипації, можна представити у вигляді:

$$\gamma \approx 2 + 2\delta,$$

де $\delta > 1$.

З урахуванням оцінок (12) і (13) можна постулювати вид залежності, яка зв'язує всю енергію, що поглинається мікротріщинами, з її розмірами:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i(crack)} + \varepsilon_{i(dis)} \approx a l_i^\beta + b l_i^\gamma, \quad (14)$$

де $\beta = 2$.

Це співвідношення відображає наявність двох складових енергій, що поглинають мікротріщини: енергію утворення тріщин і енергію дисипації. У цьому випадку формула (11) для

$$\frac{n_i}{n_*} = \frac{l_*^\beta + c l_*^\gamma}{l_i^\beta + c l_i^\gamma} \exp \left[1 - \frac{l_*^\beta + c l_*^\gamma}{l_i^\beta + c l_i^\gamma} \right] \quad (15)$$

Висновки

Виконані дослідження довели недостатню ефективність традиційних методів діагностування зародження дефектів структури металевих конструкцій в умовах значних знакозмінних навантажень широкого частотного спектра.

Отримані результати дали змогу визначити появу мікро- та макродефектів за змінами віброакустичних характеристик металевої конструкції.

Система віброакустичної діагностики дозволяє діагностувати появу негативних явищ у несучих металевих конструкціях на докритичних стадіях, що надає змогу своєчасного виявлення та локалізації потенційних ланок їх руйнування.

Перспективним напрямом робіт у цій галузі є накопичення експериментальних даних та розроблення теоретичних засад щодо діагностування дефектів у металевих конструкціях різного призначення і виготовлених з матеріалів різних класів та марок.

Запропоновано статистичну модель оцінювання накопичення мікродефектів з використанням методів дослідження термодинамічних систем. На основі цього підходу теоретично обґрунтовано методи аналізу розподілу кількості мікродефектів від їх розміру з використанням ентропійного принципу і теорії складних систем балансового типу. На основі проведених досліджень виявлені емпіричні особливості розподілу мікродефектів дефектів різних видів руйнування.

Список літератури

1. Патон Б.Е. *Техническая диагностика: вчера, сегодня, завтра* / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2003. – №4. – С. 6-10.
2. *Ультразвуковий метод неруйнівного контролю температурних полів і термічних напруг в корпусах ядерних реакторів типу ВВЕР440 та ВВЕР1000 при імпульсному тепловому навантаженні* / О.І. Запорожець, М.О. Дордієнко, В.А. Михайловський та ін. // *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: зб. наук. пр.* – К.: ІЕЗ НАН України, 2006. – С. 212 – 221.
3. ДСТУ 4221-2003. *Настанови щодо проведення акустично-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки.* – Чинний від 01.10.2004. – К.: Держ-стандарт України, 2003.
4. РД ЭО 0624-2005. *Моніторинг будівельних конструкцій АЕС. Загальні положення.* – від 27.03.2007 ДП НАЕК “Енергоатом” №257.
5. Григорьев О.А. *Влияние неисправностей системы электроснабжения зданий на ускоренную коррозию трубопроводов* / О.А. Григорьев, В.С. Петухов, В.А. Соколов // *Новости теплоснабжения*, 2002. – №7. – С. 44–46.
6. *Розробка методик і засобів виявлення, зародження та розвитку тріщин у великогабаритних об'єктах під впливом навантаження і робочого середовища* / В.Р. Скальський, О.М. Сергієнко, Б.О. Оліярник та ін. // *Проблеми ресурсу і безпеки конструкцій, споруд та машин.: зб. наук. пр.* – К.: ІЕЗ НАН України, 2006. – С. 48–51.
7. *Методика і засоби поточного контролю фізичного стану металевих конструкцій* / О.І. Запорожець, В.А. Глива, В.І. Клапченко та ін. // *Вісник національного авіаційного університету*, 2007. – № 2. – С.76-79.
8. *Неперервний контроль фізичного стану металевих конструкцій* / В.А. Глива, О.І. Запорожець, І.М. Ковтун та ін. // *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*, 2008. – № 2. – С.81–86.
9. Скальський Р.В. *Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації.* / Р.В. Скальський, П.М. Коваль. – Львів.: Сполох, 2005. – 396 с.
10. Патент 27476, Україна МПК G01N29/00, G01K29/09 *Пристрій неперервного контролю фізичного стану металевих конструкцій* / Глива В.А., Запорожець О.І., Зарицький М.С. та ін. Заявл. 24.09.2007, опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17.
11. Хорошун Л.П. *Основы микромеханики повреждаемости материала. 1. Кратковременная повреждаемость* / Л.П. Хорошун // *Прикладная механика*, 1998. – 34, № 10. – С. 120 – 127.
12. Page R., Weertman J.R. *Investigation of fatigue-induced grain boundary cavitation by small angle neutron scat-tering.*– *Scr. Met.*, 1980, 14, N7, p. 773–777.
13. Делас Н.И. *Предельно гиперболический закон распределения в самоорганизованных системах* / Н.И. Делас, В.А. Касьянов // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 2012. – №4/4 – С. 13–18.
14. Делас Н.И. *Энтропийно-энергетическая модель развития усталостных дефектов* / Н.И. Делас, В.А. Касьянов // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 2012. – №5/7. – С. 38–45.
15. Шанявский А.А. *Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях* / А.А. Шанявский – Уфа, 2003. – 803 с.
16. Банников М.В. *Экспериментальное исследование особенностей процесса генерации тепла в вершине усталостной трещины* / М.В. Банников, А.И. Терехина, О.А. Плехов // *Вестни ПГТУ. Механика.* – Пермь: Изд-во Перм. Гос. Техн. Ун-та, 2011. – №2. – С. 14 – 27.
17. Плехов О.А. *Теоретическое и экспериментальное исследование диссипации энергии в процессе локализации деформации в железе* / О.А. Плехов, О.Б. Неймарк // *ПМТФ.* – 2009. – Т.50, № 1. – С. 153 – 164.

Стаття надійшла до редколегії 20.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.С. Кружилко, Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці, Київ.