

## АЕРОПОРТИ ТА ЇХ ІНФРАСТРУКТУРА

УДК 539.421:620.179.17

**О.І. Запорожець**, д-р техн. наук, проф.

**В.А. Глива**, канд. техн. наук, доц.

**В.І. Клапченко**, канд. техн. наук, доц.

**Г.Д. Потапенко**, канд. фіз.-мат. наук, доц.

**А.В. Лук'янчиков**, асист.

### МЕТОДИКА І ЗАСОБИ ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ ФІЗИЧНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Розроблено метод неперервного, автоматичного контролю фізичного стану металевих конструкцій за рахунок реєстрації електричних струмів витоків і акустичної емісії в елементах конструкцій. Запропоновано методику, що дозволяє накопичувати, обробляти зареєстровані сигнали і попереджувати про їх наближення до критичних рівнів в автоматичному режимі.*

*The method of continuous, automatic control of bodily condition of metallic constructions is developed due to registration of electric currents of source and acoustic emission in the elements of constructions. The offered method allows to accumulate, to process the registered signals and warn about their approaching to the critical levels and automatic mode.*

#### Постановка проблеми

Одним із пріоритетних напрямів підвищення техніко-економічних показників ефективності експлуатації споруд і будівель різного призначення є забезпечення захисту конструкцій від раптових руйнувань, підвищення їх надійності, безпечності та продовження терміну експлуатації.

Реалізації цих задач значною мірою сприяє виконанню дефектації елементів конструкцій згідно з їх фактичним станом замість традиційних планових дефектацій і оглядів, що забезпечується використанням сучасних методів технічної діагностики [1].

#### Аналіз досліджень і публікацій

Основними факторами негативного впливу на міцнісні характеристики металевих конструкцій є тріщиноутворення внаслідок утоми металу як результат механічних, термічних і корозійних процесів, що виникають під час експлуатації споруд. При цьому головною причиною корозійних пошкоджень металевих конструкцій є електрокорозія внаслідок неконтрольованого протікання електричних струмів елементами конструкцій [2].

Одним із найбільш прийнятних і добре опрацьованих методів неруйнівного контролю металевих конструкцій є метод акустичної емісії. Технічна і економічна доцільність його використання обумовлена тим, що цей метод не оперує шкідливими для працюючих випромінюваннями і не потребує подачі в контрольований елемент конструкції тестових сигналів.

Проте більшість досліджень і прикладних розробок щодо використання методу акустичної емісії стосуються споруд та конструкцій спеціального призначення [3] і регламентуються національними і міждержавними нормативами з неруйнівного контролю та моніторингу будівельних конструкцій [4; 5]. Методики та обладнання виявлення дефектів в об'єктах загального призначення, переважно спрямовані на локалізацію джерел тріщиноутворень, використовують багатоканальну апаратуру і призначені для здійснення періодичного контролю за конструкціями, що потребує переміщення обладнання в межах об'єкта [6] і не забезпечує неперервного контролю визначеного параметра. До того ж такі комплекси контролюють один із параметрів і не забезпечують комплексний моніторинг фізичного стану металоконструкцій.

На сьогодні в Україні значна кількість об'єктів цивільного та промислового призначення, виробничого обладнання експлуатується за умов, близьких до граничних. Тому все актуальнішою стає задача своєчасного виявлення найнебезпечніших для міцності конструкцій дефектів типу тріщин за умов деградації матеріалу, що відбувається внаслідок тривалої їх експлуатації під дією механічних та корозійних чинників і фізичних полів. Це потребує розроблення простих в експлуатації та маловитратних засобів неперервного контролю фізичного стану металевих конструкцій, особливо тих, що перебувають під значним та циклічним навантаженням і не обладнані засобами катодного захисту від електрокорозії.

**Мета** роботи – розроблення методу неперервного, автоматичного контролю фізичного стану металевих конструкцій за рахунок реєстрації струмів витоку і акустичної емісії в елементах конструкцій з одночасним накопиченням, обробленням і візуалізацією отриманих сигналів та автоматичним повідомленням про їх наближення до критичних рівнів.

Накопичені експериментальні дані свідчать про можливість надійного діагностування методом акустичної емісії моментів зароджування втомних і корозійних тріщин та періодів їх активного розвитку в матеріалах металевих конструкцій, реєстрування неконтрольованих електрострумів витоку в елементах конструкцій без порушення їх цілісності (роз'єднання).

Зв'язок між тріщиноутвореннями внаслідок термічних, механічних і корозійних впливів на основні матеріали металевих конструкцій та частотними й амплітудними параметрами акустичної емісії експериментально досліджено, теоретично обґрунтовано та узагальнено [7 – 9].

#### **Матеріали дослідження**

Попередні дослідження і розробки [10] довели можливість високоточної (з відносною похибкою до 3%) реєстрації рівнів магнітних полів промислової частоти 50 Гц та її гармонік і звукового тиску за допомогою персонального комп'ютера, укомплектованого високоякісною звуковою картою, і спеціальних датчиків без використання додаткових підсилювачів та аналого-цифрових перетворювачів. Такий підхід знижує ймовірність появи електричних завод з боку додаткових пристроїв у вимірювальному тракті та спрощує процедуру ідентифікації шуканих сигналів. Запропоноване обладнання для контролю фізичного стану металевих конструкцій складається з датчиків:

– магнітного поля, за змінами якого реєструються числові значення електрострумів у конструкціях;  
– акустичної емісії, з'єднаних лініями зв'язку з персональним комп'ютером, який працює під керуванням операційної системи сім'ї Windows, має програмне забезпечення для аналізу частотного спектра та інтерфейс для візуалізації отримуваної інформації.

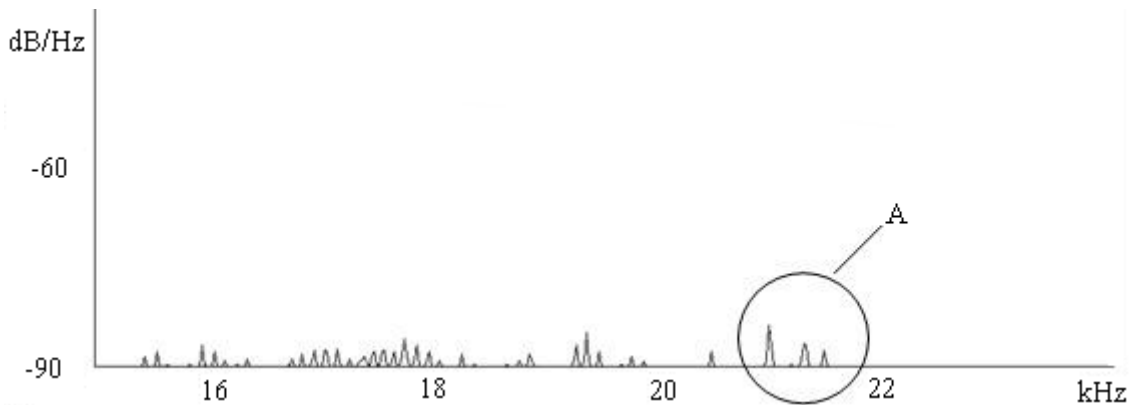
Електроструми витоку в елементах контрольованої конструкції реєструються таким чином. Ферорезонансний датчик магнітного поля [10] закріплюється на поверхні конструкції без гальванічного контакту з нею і лінією зв'язку, через стандартне рознімання, підключається до лінійного входу звукової карти. У звуковій карті отримувані аналогові сигнали відцифровуються і

в подальшому аналізуються програмою аналізу частотного спектра (у нашому випадку Spectrogram). Параметри електроструму отримуються автоматичним перерахунком числових значень магнітного поля, виходячи з фундаментальних співвідношень між рівнями магнітних полів та електрострумів, що їх генерували. Зареєстрована інформація унаочнюється на екрані відеомонітора у координатах „частота – сила струму”. Датчики попередньо калібруються з використанням відповідних генераторів.

Для підвищення достовірності вимірювань необхідно врахування впливу магнітного фону в місці проведення контролю. Найбільш ефективний засіб унеможливлення такого впливу – екранування датчиків. Найприйнятніші екрануючі матеріали – листовий пермалой та аморфні металеві сплави. Набуття пермалоем екрануючих властивостей після механічної обробки відбувається внаслідок відпаду. Шар пермалой завтовшки 1 мм ослаблює магнітне поле в 10 – 15 разів, а екрани з аморфних металевих сплавів – на порядок ефективніші, проте вартість таких матеріалів дуже висока.

Реєстрація сигналів акустичної емісії виконується за майже аналогічною схемою. Датчик акустичної емісії (наприклад, ДАЭ–002Р, GT200) закріплюється на попередньо зачищеній поверхні металевій конструкції за допомогою спеціального акустопрозорого клею („Шмель” або інший), чи механічно, з використанням акустопрозорої субстанції. Епоксидна смола без затверджувача добре підходить як акустопрозора субстанція. Лінією зв'язку датчик підключається через стандартний рознімач до мікрофонного входу звукової карти, де сигнали відцифровуються. Наступним кроком є оброблення отриманих сигналів тією самою програмою аналізу частотного спектра і відображення сигналів на екрані відеомонітора в координатах „частота – амплітуда” (див. рисунок). Сигнали акустичної емісії, які свідчать про початок процесів тріщиноутворень, належать до ультразвукової частоти, тому звукова карта персонального комп'ютера повинна мати відповідні характеристики.

Достовірність акустоемісійного контролю визначається ефективністю функціонування всіх ланок вимірювального тракту. Слід враховувати амплітудно-частотні характеристики перетворювачів акустичної емісії, відстані передачі інформації (для ДАЭ-002 до 50 м), а також необхідність калібрування засобу візуалізації, виходячи з робочих параметрів звукової карти.



Акустограма циклічно навантаженої сталі 30 ХГС:  
А – сигнали тріщиноутворення

Для здійснення, як у цьому випадку, попереднього контролю стану металоконструкцій необхідно мати відомості про зв'язок початку процесу тріщиноутворення та частотними і амплітудними характеристиками сигналів акустичної емісії для конструкційного матеріалу, що визначається зі спеціальних довідкових джерел.

Визначення моменту старту мікротріщин у конструкційних сплавах, величини її субкритичного зростання можливе за методикою оцінки нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень, запропонованою в праці [6].

Згідно з моделлю докритичного зростання тріщини у квазікрихкому тілі (без урахування впливу зовнішнього середовища) значення приросту одиночного стрибка тріщини  $\Delta l$  пов'язане з коефіцієнтом інтенсивності напружень моменту старту мікротріщини  $K$ , при якому відбувається стрибок тріщини:

$$\Delta l = BK^2,$$

де  $B$  – емпірична константа матеріалу.

Ця залежність зберігається також при корозійному розтріскуванні, а швидкість зростання тріщини  $V$ , яка в цьому випадку є функцією коефіцієнта інтенсивності напружень, визначається як

$$V = \frac{BK^2}{\Delta t}.$$

Приріст стрибка тріщини  $\Delta l$  фіксується металографічними методами. За відомими значеннями приросту стрибка тріщини  $\Delta l$  та навантаження визначається коефіцієнт інтенсивності напружень  $K$ . Інтервал часу між одиничними стрибками тріщини оцінюється так. При значному підросанні мікротріщини відбувається певна кількість подій акустичної емісії, що супроводжують кожний стрибок тріщини. Сума приростів стрибків тріщини визначає підросання і легко

фіксується за відповідними їм сигналами акустичної емісії. Вимірюючи час від моменту прикладання навантаження  $t_1$  до моменту зупинки її зростання  $t_2$ , за сигналами акустичної емісії на акустограмі паралельно фіксується кількість подій у цьому інтервалі підросання  $\Sigma\Pi$ . Тоді час між стрибками тріщини визначається як

$$t_c = \frac{t_2 - t_1}{\Sigma\Pi}.$$

За допомогою експериментальних даних  $t_c$ ,  $\Delta l$ ,  $K$ , враховуючи, що

$$\Delta t = \frac{BK^2}{V},$$

визначають константу матеріалу  $B$ :

$$B = \frac{t_c \Delta l}{(t_2 - t_1) K^2}.$$

Далі за відомою константою матеріалу  $B$  визначається нижнє порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень за умови базової швидкості поширення тріщини  $10^{-9}$  м/с, коли її підросання вважається відсутнім.

### Обговорення результатів

Надійність методу обумовлюється тим, що при постійному або знакозмінному навантаженні на металоконструкцію сигнали акустичної емісії відсутні або мають випадковий характер за умови, що не перевищено рівень попереднього навантаження (ефект Кайзера). Тобто сигнали, які свідчать про ініціалізацію негативних процесів у матеріалі, виникають при підвищенні з будь-яких причин навантаження на контрольовану споруду. Метод дозволяє також отримувати сумарний підрахунок імпульсів акустичної емісії за інтервал часу спостережень в обраній системі координат. При використанні запропонованої методики слід враховувати, що в механічних або зварних

з'єднаннях сигнали акустичної емісії значною мірою затухають та спотворюються. Для локалізації осередку тріщиноутворення треба використовувати систему датчиків та реєструвати різночасність приходу сигналів до засобу накопичення інформації.

Ураховуючи, що без залучення додаткових пристроїв у вимірювальному тракті до одного персонального комп'ютера можливе підключення єдиного перетворювача акустичної емісії, додаткові датчики підключаються до інших комп'ютерів, об'єднаних у локальній мережі, а отримана інформація передається на сервер мережі або персональний комп'ютер уповноваженої особи.

Достовірність заходів моніторингу в цьому випадку може бути забезпечено тільки за умови точної синхронізації системного часу окремих комп'ютерів, що досягається за рахунок її автоматизації програмними засобами.

На наступному етапі найбільш доцільним є залучення спеціальної апаратури та фахівців, якщо наявність такого осередку (осередків) надійно зафіксовано.

### Висновки

Таким чином, розроблена методика та реєструючі засоби поточного контролю фізичного стану металевих конструкцій досить прийнятні для здійснення неперервного автоматичного моніторингу основних факторів негативного впливу на міцнісні властивості металевих конструкцій та споруд загального призначення. Засоби системи дозволяють виконувати одночасне оброблення, накопичення, візуалізацію отриманої інформації та автоматичне повідомлення про появу струмів витоку і осередків тріщиноутворень в елементах конструкцій.

Дослідження в реальних умовах експлуатації довели надійність компонентів системи та економічну доцільність її використання для контролю за станом об'єктів, що не становлять безпосередньої загрози для працюючих та оточуючого середовища у разі виникнення нештатних ситуацій. Використаний методологічний підхід є перспективним щодо розширення переліку відстежуваних параметрів та вдосконалення технологій локалізації осередків негативних фізичних процесів і явищ як в елементах металевих конструкцій, так і в будівлях та спорудах у цілому.

### Література

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня, завтра // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 4. – С. 6–10.
2. Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов В.А. Влияние неисправностей системы электроснабжения зданий на ускоренную коррозию трубопроводов // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 7. – С. 44–46.
3. Ультразвуковой метод неруйнівного контролю температурних полів і термічних напруг в корпусах ядерних реакторів типу ВВЕР440 та ВВЕР 1000 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.
4. ДСТУ 4221-2003. Настанови щодо проведення акустично-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – Чинний від 01.10.2004. – К.: Держстандарт України, 2003.
5. РД ЭО 0624-2005. Моніторинг будівельних конструкцій АЕС. Загальні положення. – Чинний від 27.03.2007 розпор. ДП НАЕК „Енергоатом” № 257.
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. Козлов А.В., Прокопенко Г.И., Глыва В.А., Кузьмич Г.И. Исследование процесса сжатия сплава АМгб с помощью акустической эмиссии // Металлофизика. – 1991. – № 8. – С. 101–104.
8. Недосека А.Я. Влияние характера локальных изменений структуры материала на формирование упругих волн деформации на поверхности толстой пластины // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 66–73.
9. Скальський Р.В., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. – Л.: Сполох, 2005. – 396 с.
10. Патент України 22961, МПК G01R 29/08, G01N 17/00. Автоматизований комплекс контролю рівнів електромагнітних полів і звукового тиску / В.А. Глива, В.І. Клапченко, Л.О. Левченко, Г.Д. Потапенко. – Опубл. 25.04.07. Бюл. №5.

Стаття надішла до редакції 17.09.07.