

Діагностика та розпізнавання видів механічних дефектів складних металевих конструкцій методом акустичної емісії

Ю. О. Смолін

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна
uas8735@gmail.com

Анотація

Показано, що розуміння зносу та переважаючих механізмів пошкодження конструкцій має велике значення для систем, критично важливих для безпеки, до яких відносяться складні металеві конструкції. Для них при довготривалій експлуатації постає завдання постійного відстеження місць виникнення мікротріщин та тенденцій їх розвитку. Основною метою роботи є розробка методики розпізнавання виду механічної деформації в складних металевих конструкціях, заснованої на відмінності форм сигналів акустичної емісії, та експериментальне підтвердження працездатності цієї методики. Запропоновано методику визначення оптимальної кількості каналів, необхідних для моніторингу. Запропоновано також методику збору даних на основі сигналів акустичної емісії та їх обробки з подальшим оцифруванням і розпізнаванням за допомогою нейромережових технологій із використанням карти Кохонена. Відмінна риса цієї методики полягає у можливості класифікувати результати за трьома категоріями: втомна тріщина; пластична деформація; тертя (механічний шум). Практичне значення полягає у можливості створювати оптимальні системи моніторингу різних складних конструкцій, що дозволять отримувати диференційні ознаки механічних пошкоджень.

Ключові слова: акустична емісія; складні конструкції; ознаки пошкодження; нейромережові карти Кохонена; кластери розвитку пошкоджень.

Отримано: 15.01.2025

Відредаговано: 17.02.2025

Схвалено до друку: 21.02.2025

Вступ

Складні металеві конструкції поєднують декілька простих металевих елементів, що з'єднані разом. Зазвичай їх виготовляють із різних металевих матеріалів, таких як алюміній, сталь або титан. Вони використовуються у багатьох галузях, і їхній спектр призначення дуже широкий, наприклад, хмарочоси, мости, вантажні крани, арки, літаки тощо.

Складні металеві конструкції поділяються на різні види та мають різні характеристики, які залежать від їхньої форми і матеріалу та визначаються функціональністю й умовами експлуатації. З метою забезпечення їхньої безпеки та ефективності всі вони повинні відповідати певним вимогам: у першу чергу міцності, яка зумовлює здібність витримувати статичні й динамічні навантаження, що зустрічаються в процесі експлуатації, а також стійкості, яка зумовлює здатність протистояти динамічним навантаженням

зовнішніх сил, таких як вітер, землетруси тощо, а також зберігати свою форму та стабільність.

При довготривалій експлуатації таких конструкцій постає завдання постійного відстеження місць виникнення мікротріщин та тенденцій їх розвитку. Це завдання має важливе значення для забезпечення безпеки експлуатації складних металевих конструкцій, особливо у спорудах, що забезпечують життєдіяльність людини.

Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми

Розуміння зносу та переважаючих механізмів пошкодження конструкцій дуже важливо, особливо для компонентів, критично важливих для безпеки. Неруйнівний контроль (НК) відіграє вирішальну роль в оцінці та моніторингу їхньої цілісності. Однак, коли справа доходить до складних конструкцій, більшість існуючих методів НК стикаються з труднощами у їх застосуванні [1]. Як показано у роботах [1, 2, 3], при дослідженні

складних конструкцій доцільно використовувати два методи НК – це метод акустичної емісії (АЕ) та метод цифрової кореляції зображень (DIC). Результати досліджень [1] показали, що акустична емісія є раннім індикатором ушкодження, і при цьому сукупна кількість подій і пікова частота добре корелюють із тяжкістю ушкодження. Метод DIC також виявив чіткі ознаки пошкодження чи погіршення, хоча й на більш пізній стадії проти АЕ. В роботі [4] показано, що АЕ може бути акустичним паспортом характеристик матеріалів, оскільки вона є дзеркальним відображенням зміни цих характеристик у процесі експлуатації й, у тому разі, їхніх механічних властивостей. Це надає змогу не тільки реєструвати, але й прогнозувати руйнівне навантаження матеріалу, як без зупинки експлуатації, так і без необхідності урахування початкових значень механічних властивостей досліджуваних матеріалів.

Метод АЕ часто використовують при дослідженнях різних металевих конструкцій: при оцінюванні стану зварних швів [1], при дослідженнях тріщиностійкості монолітної естакади [5], при визначенні загальних характеристик і вимірювання втомних тріщин у рейках та деталях поїздів при динамічному навантаженні [3], для дослідження внутрішніх пошкоджень при стисканні сірого чавуну [6], при безконтактному моніторингу корозійно-втомних ушкоджень у підводних сталевих конструкціях [7], при необхідності забезпечити надійний метод моніторингу ниткоподібної корозії [8] та інших.

У літературі розглянуті також загальні й окремі спеціальні питання відносно реалізації контролю за допомогою АЕ. Так, у роботі [9] запропоновано систему діагностики й у загальному вигляді методику акустичної діагностики напружено-деформованого стану різних профілів металевих конструкцій. У роботі [10] проведено обґрунтування параметрів акустичної емісії найбільш інформативних для визначення швидкості зношування деталей. Роботу [11] присвячено математичній моделі акустичної емісії від тріщин поперечного зсуву. У роботі [12] розглядається використання програмних засобів моделювання процесів обробки сигналів акустичної емісії.

Аналіз світового ринку неруйнівного контролю на основі акустичної емісії за 2019–2024 роки та оцінка можливостей на 2025–2035 роки [13] дали всебічний аналіз глобального ринку неруйнівного контролю на основі акустичної емісії. Очікується, що глобальний ринок неруйнівного контролю на основі акустичної емісії зростатиме значними темпами протягом прогнозованого періоду з прогнозованим середньорічним темпом зростання 89% у період із 2025 по 2035 рік.

Великою перевагою методу акустичної емісії є те, що для визначення місця джерела акустичної

емісії вимагається лише правильне розташування давачів і не вимагається сканування всієї поверхні об'єкта для пошуку локальних дефектів. Таким чином, метод акустичної емісії наразі є найбільш перспективним методом для діагностування та розпізнавання видів механічного дефекту складних металевих конструкцій.

Використання нових матеріалів у складних металевих конструкціях та вимоги, що критично важливі для безпеки, потребують інноваційних систем контролю таких деталей. Сучасні системи діагностики пошкодження складних конструкцій побудовані без урахування оптимізації каналів вимірювання і не проводять чіткої диференціації механічних пошкоджень.

Метою роботи є обґрунтування методики вибору оптимальної кількості вимірювальних каналів у системі діагностики складних металевих конструкцій, що дозволить оптимізувати структуру цієї системи, та розробка методики розпізнавання виду механічної деформації в складних металевих конструкціях, заснованої на відмінності форм сигналів акустичної емісії, й експериментальне підтвердження працездатності цієї методики.

Виклад основного матеріалу

Останні дослідження з виявлення механічних пошкоджень металевих конструкцій методом АЕ використовують коливання з різними амплітудами, різним частотним спектром, із різними формами імпульсів та іншими параметрами [1, 6].

Накопичений досвід та проведений аналіз дозволяють сигнали акустичної емісії розділити на два основні типи:

1) безперервна емісія – коливання з відносно малими амплітудами і широким частотним спектром, верхня межа якого досягає 30 МГц, характеризують переміщення великих груп дислокацій і вказують на формування зон із мікрodefектами, що накопичуються;

2) емісія дискретного типу – послідовність коротких імпульсів складної форми з крутим фронтом і набагато більшими амплітудами. Основна частина енергії зосереджена в низькочастотній частині спектра. Цей тип емісії пов'язаний з розвитком мікрodefектів у мікро- та макротріщинах, їх злиттям та появою магістральної тріщини.

На рис. 1 наведено форму поверхневої хвилі від втомних напруг і пластичної деформації, а на рис. 2 – форму поверхневої хвилі, обумовлену емісією тріщини. Ці форми поверхневих хвиль були отримані при дослідженнях дефектів складної металевої конструкції куполоподібної форми з алюмомарганцевого сплаву АМц-1400.

Обидва типи випромінювання існують або зі зсувом часу, або одночасно. Сучасна апаратура приймає та обробляє окремо обидва

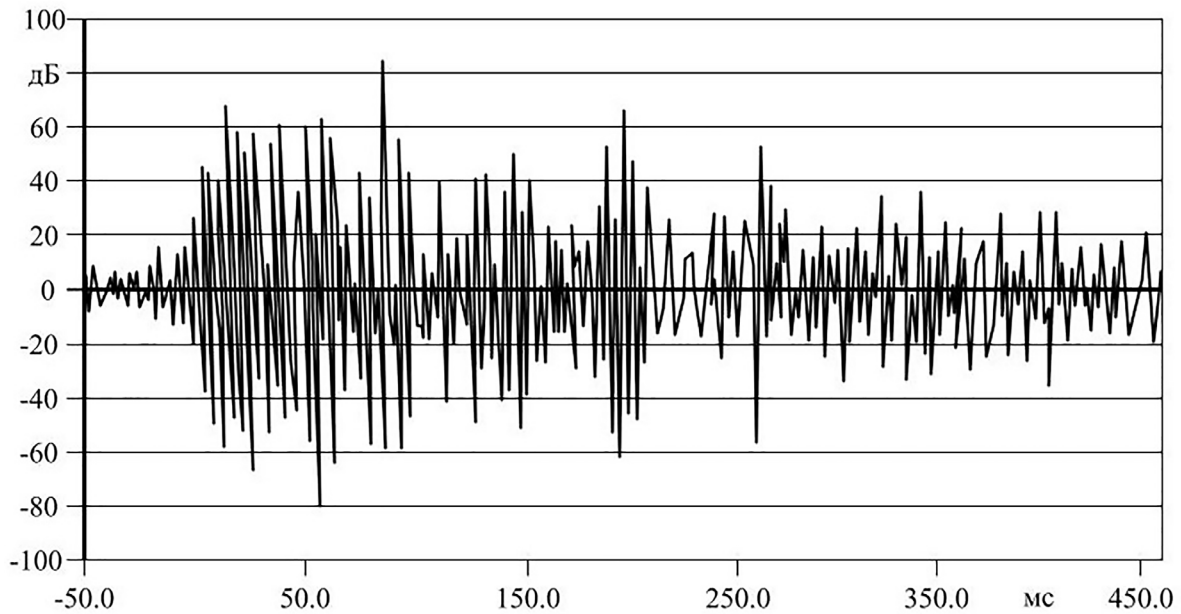


Рис. 1. Форма поверхневої хвилі, обумовлена втомною напругою та пластичною деформацією складної металевої конструкції

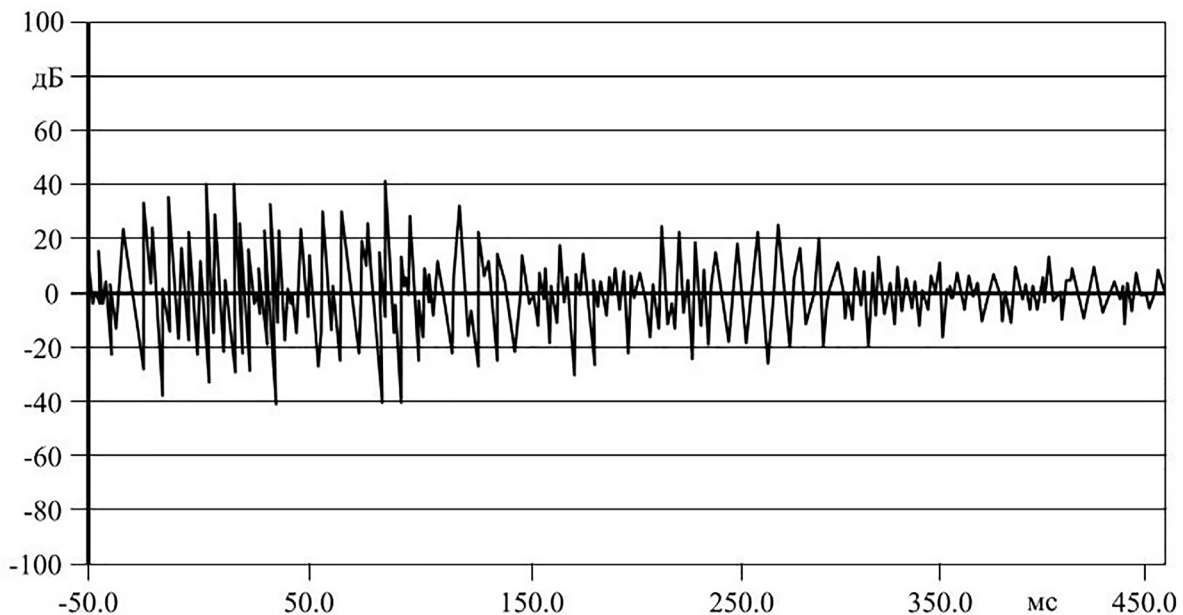


Рис. 2. Форма поверхневої хвилі, обумовлена емісією тріщини

типи сигналів, що дає можливість виділити з процесу деформування матеріалу моменти, пов'язані з формуванням небезпечних майбутніх зон, та моменти, пов'язані з розвитком процесів руйнування в цих зонах.

Для того щоб прийняти рішення про можливість та ефективність застосування АЕ моніторингу в тому чи іншому випадку, необхідно провести попередні роботи з визначення технічних та експлуатаційних характеристик установки, які впливають на параметри системи моніторингу, що проектується. Наявність значних акустичних шумів або слабка "емісивність" матеріалу в процесі руйнування можуть унеможливити застосування АЕ методу або призвести до необхідності застосуван-

ня величезної кількості каналів, що виявиться або технічно нереалізованим, або занадто дорогим. Тому перед прийняттям рішення про встановлення системи АЕ моніторингу дуже важливо зробити оцінку основних параметрів системи, зокрема оцінити необхідну кількість каналів.

Таку оцінку частково було проведено в роботі [2], коли давачі розташовувалися тільки вздовж так званих траєкторій нульової деформації (ZST) на навантаженій конструкції, а також у загальному вигляді в роботі [9].

Число каналів, необхідних для моніторингу, – один із основних параметрів системи. Від кількості каналів залежить чутливість системи та надійність виявлення дефектів. Чим більше АЕ

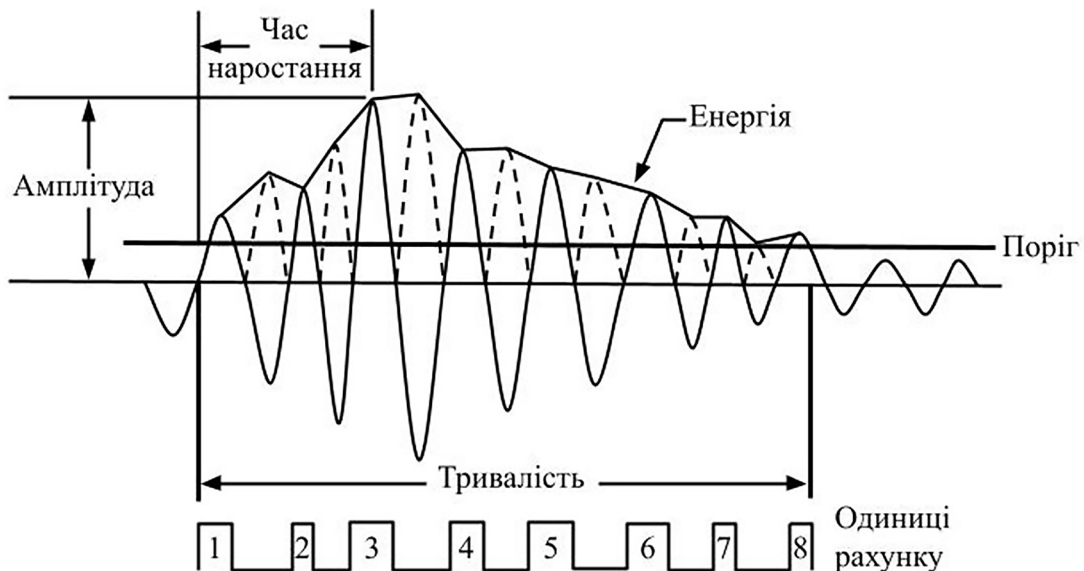


Рис. 3. Форма сигналу акустичної емісії з ознаками, що сигнал несе у собі: амплітуда, час наростання, енергія, поріг, одиниці рахунку, тривалість

перетворювачів встановлено на конструкції, тим вища ймовірність виявлення дефектів. З іншого боку, збільшення кількості каналів призводить до подорожчання системи.

Для вибору оптимального рішення необхідно:

1) отримати дані про характерні та найбільш небезпечні для певної конструкції типи дефектів та про параметри акустичної емісії, що випромінюється ними. Головним із них, з погляду ймовірності виявлення дефекту, є амплітуда хвиль напруги. Чим вища вихідна амплітуда, тим більша ймовірність реєстрації хвиль напруги перетворювачем, що знаходиться на певній відстані від дефекту;

2) досліджувати акустичні властивості об'єкта, що впливають на поширення пружних хвиль напруги і призводять до їх згасання;

3) виміряти рівень робочих акустичних шумів, який визначає поріг чутливості системи та залежить від особливостей функціонування установки.

Тобто для вибору основних параметрів системи необхідно знати:

а) з якими амплітудами генеруються хвилі напруг при виникненні та розвитку дефектів у матеріалі конструкції;

б) як ця амплітуда зменшується при поширенні від місця розташування дефекту до місця розташування приймача;

в) чи можлива реєстрація хвилі напруги з такою амплітудою системою, що має якийсь амплітудний поріг, який визначається рівнем акустичних шумів.

Таким чином можна реалізувати методику вибору оптимальної кількості вимірювальних каналів у структурі системи діагностики складних металевих конструкцій. Ця методика дозволяє надалі провести технічний синтез цієї системи діагностики за оптимізованою структурою.

Крім того, на підставі відмінності у формі акустичних хвиль, що виникають у результаті пошкоджень складних металевих конструкцій, існує принципова можливість класифікації виду деформацій: тріщина або пластична деформація, що дозволить більш точно визначати стан складних металевих конструкцій. У загальному вигляді форму сигналу з ознаками, що сигнал несе у собі, наведено на рис. 3.

Процедура збору даних на основі сигналів акустичної емісії полягатиме в такому:

1) Джерело АЕ (наприклад, тріщин втоми) під навантаженням складної металевої конструкції випромінює енергію акустичних хвиль у формі хвиль напруги.

2) П'єзоелектричний кристал у середині давача АЕ приймає акустичний сигнал і перетворює його на електричну енергію.

3) Електричний сигнал із виходу давача посилюється і надходить на обчислювач, який оцифровує аналоговий сигнал від 100 кГц до 1 МГц.

4) Оцифрований сигнал піддається розпізнаванню, використовуючи ансамбль ознак та нейромережеві технології.

5) Як нейромережева технологія може бути використана карта Кохонена, що самоорганізується і використовує математичну процедуру кластеризації даних на основі набору вхідних даних. При цьому застосовуються шість найбільш використовуваних кількісних параметрів АЕ: амплітуда, тривалість сигналу, одиниці рахунку (число осциляцій, тобто число перевищень сигналом встановленого порогу), енергія (площа під обвідною сигналу), час наростання та межа змінної напруги, що вказані на рис. 3 [1, 2, 4, 6]. За потреби можуть використовуватись і додаткові параметри, такі як частота сканування та інші.

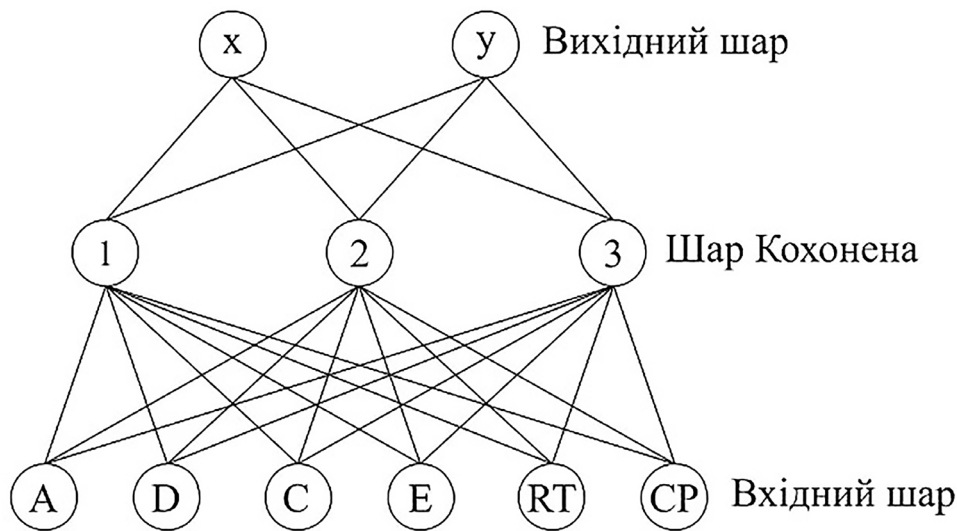


Рис. 4. Архітектура нейромережевої карти Кохонена, що самоорганізується

б) Архітектуру нейромережевої карти Кохонена, що самоорганізується, наведено на рис. 4. Вона має: вхідний шар нейронів, на який подаються вхідні сигнали; шар Кохонена; вихідний шар нейронів, із якого знімаються вихідні сигнали.

За допомогою такої нейромережевої технології можна класифікувати результати за трьома категоріями:

- втомна тріщина;
- пластична деформація;
- тертя (механічний шум).

На рис. 5 наведено залежності амплітуди сигналу АЕ від часу впливу циклічних навантажень на елемент ферми з трикутною решітчастою структурою, що виконана з алюмінієвого сплаву АМг2П.

Чітко виділяються кластери розвитку тріщин, пластичної деформації та тертя.

Результати досліджень зведено у табл. 1.

Однак у низці випадків, залежно від виду випробуваної поверхні та матеріалу, виникає проблема перекриття кластерів в осях амплітуда – час (кількість циклів) (рис. 6). Слід зазначити вкотре, що метод АЕ працює лише при навантаженому стані конструкції. У статистиці виявлення деформацій має проводитися під навантаженням.

Проблема перекриття кластерів у цій роботі не розглядається. Вирішення цього завдання потребує подальших поглиблених досліджень. Автор має тільки певні пропозиції щодо цього.

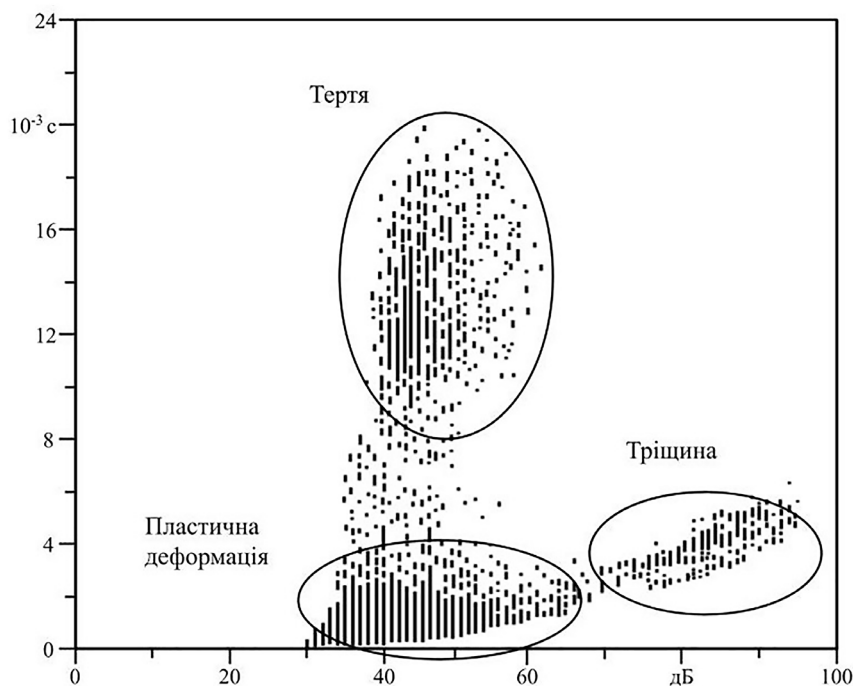


Рис. 5. Залежності амплітуди сигналу АЕ від часу впливу циклічних навантажень на елемент складної металевої конструкції

Результати досліджень

Механізм дефекту	Тривалість АЕ, мс	Амплітуда, дБ
Тріщина	0–6,0	65–100
Тертя	6,0–32,0	30–70
Пластична деформація	0–6,0	30–62

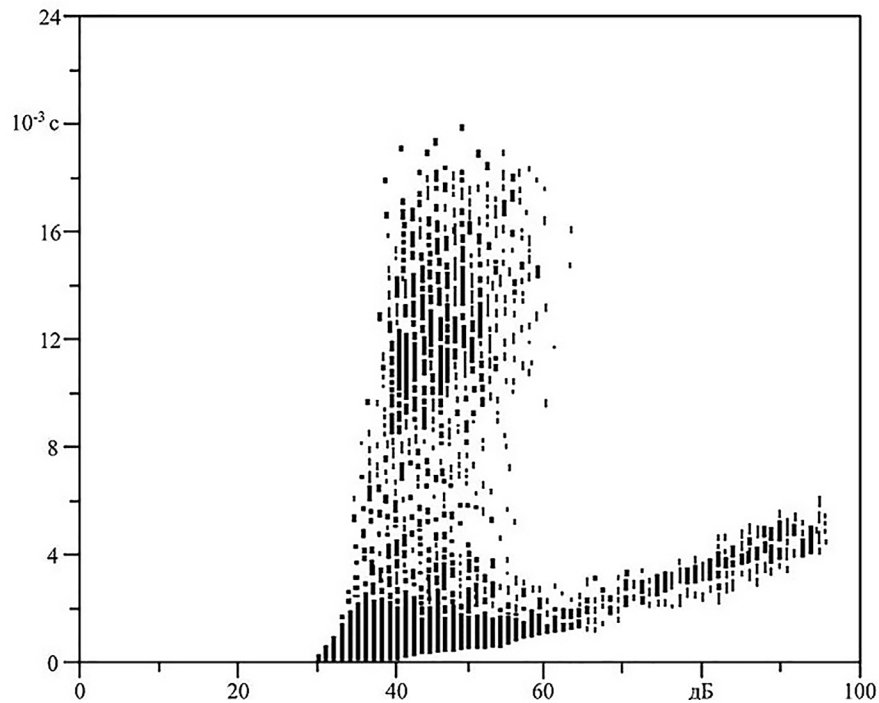


Рис. 6. Перекриття кластерів у осях амплітуда – час

Для усунення цього явища можливі такі варіанти розв'язання проблеми:

1) Проведення спектрального аналізу форм акустичних хвиль із застосуванням швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення.

2) Використання ефекту поділу симетричних та кососиметричних хвиль Лемба при використанні середньої частоти.

Така методика, заснована на відмінності форм сигналів акустичної емісії, дозволяє розпізнавати види механічної деформації в складних металевих конструкціях і забезпечує моніторинг стану таких конструкцій із чіткою диференціацією виду пошкодження.

Висновки

Запропоновано методику оптимізації структури системи діагностики складних металевих кон-

струкцій, що надалі дозволить забезпечити високу чутливість цієї системи та надійність виявлення дефектів.

Розроблено методику розпізнавання виду механічної деформації складних металевих конструкцій, засновану на відмінності форм сигналів акустичної емісії та їх обробки з подальшим оцифруванням і розпізнаванням за допомогою нейромережових технологій із використанням карти Кохонена.

Отримано експериментальні залежності амплітуди сигналу АЕ від часу впливу циклічних навантажень на елемент складної металевої конструкції, що дозволили за розробленою методикою чітко виділити кластери розвитку тріщин, пластичної деформації й тертя та підтвердили працездатність цієї методики.

Diagnostics and recognition of types of mechanical defects in complex metal structures by acoustic emission method

Yu. Smolin

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine
 uas8735@gmail.com

Abstract

The paper shows that understanding the wear and prevailing mechanisms of structural damage is crucial for devices and systems that are critical to safety, which include complex metal structures. During long-term operation, they are faced with the task of constantly monitoring the locations of microcracks and trends in their occurrence. The aim of the paper is to develop a procedure for optimal selection of the design of the diagnostic system for complex metal structures and a procedure for recognizing the type of mechanical deformation in such structures, based on the difference in the shapes of acoustic emission signals, which would allow monitoring the condition of structures with differentiation of the damage type. It is proposed to increase the efficiency of monitoring such structures by performing preliminary works aimed at determining the characteristics of technical means that affect the parameters of the entire monitoring system. A method for determining the optimal number of measurement channels is proposed, which would allow optimizing the design of the diagnostic system and ensuring high responsivity of this system and reliability of defect detection. A procedure for collecting data based on acoustic emission signals and their processing with their subsequent digitization and recognition using neural network technologies using the Kohonen card is also proposed. A distinctive feature of this method is the possibility to classify results into three categories: fatigue crack; plastic deformation; friction (mechanical noise). The practical significance lies in the possibility to create optimal monitoring systems for various complex structures, which would allow obtaining differential signs of mechanical damage.

Keywords: acoustic emission; complex structures; signs of damage; Kohonen neural network maps; clusters of damage development.

Список літератури

1. Aitor García de la Yedra, Igor Erro, Javier Vivas, Oier Zubiri et al. Acoustic Emission and Digital Image Correlation-Based Study for Early Damage Identification in Sandwich Structures. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14(21), 9728. doi: <https://doi.org/10.3390/app14219728>
2. Bergmayr T., Winklberger M., Kralovec C., Schagerl M. Structural health monitoring of aerospace sandwich structures via strain measurements along zero-strain trajectories. *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol. 126, 105454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105454>
3. Machikhin A., Poroykov A., Bardakov V., Marchenkov A. et al. Combined Acoustic Emission and Digital Image Correlation for Early Detection and Measurement of Fatigue Cracks in Rails and Train Parts under Dynamic Loading. *Sensors*, 2022, vol. 22(23), 9256. doi: <https://doi.org/10.3390/s22239256>
4. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Бойчук О.І., Овсієнко М.А. Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію. *Автоматичне зварювання. Виробничий розділ*. 2021. № 2. С. 52–59. doi: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>
5. Коваль П.М., Сташук П.М., Ковальчик Я.І. Дослідження тріщиноздатності монолітної попередньо напруженої естакади методом акустичної емісії. *Дороги і мости*. 2010. Вип. 12. С. 56–62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2010_12_11
6. Zhen Li, Zhao Lei, Sheng Xu, Hengyang Sun, Bin Li, Zhizhong Qiao. Probing Internal Damage in Grey Cast Iron Compression Based on Acoustic Emission and Particle Flow. *Processes*, 2024, vol. 12(9), 1893. doi: <https://doi.org/10.3390/pr12091893>
7. Riccioli F., Alkhateeb S., Mol A., Pahlavan L. Feasibility assessment of non-contact acoustic emission monitoring of corrosion-fatigue damage in submerged steel structures. *Ocean Engineering*, 2024, vol. 312, part 3, 119296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119296>
8. Abarkane C., Florez-Tapia A.M., Odriozola J., Artetxe A. et al. Acoustic emission as a reliable technique for filiform corrosion monitoring on coated AA7075-T6: Tailored data processing. *Corrosion Science*, 2023, vol. 214, 110964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.110964>
9. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 168 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57978>
10. Войтов В.А., Бекіров А.Ш., Войтов А.В. Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування трибосистем на перехідних режимах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 190–202.

11. Станкевич О.М. Математична модель акустичної емісії від тріщини поперечного зсуву. *Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика*. 2023. Вип. 5. №1. С. 1–7.
12. Наконечна О.А. Використання програмних засобів моделювання процесів обробки сигналів акустичної емісії в процесі підготовки майбутніх фахівців з комп'ютерних наук. *Shared values, approaches, and requirements for the implementation of an educational process during training engineering specialists in Ukraine and EU countries*. Wloclawek, Republic of Poland, 2021, pp. 63–68. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/33660>
13. Wenming Li. Global Acoustic Emission Testing-based NDT Market Report 2025. Acoustic Emission-based NDT Market Global Industry Analysis 2019–2024 and Opportunity Assessment 2025–2035. Guangzhou Huaxia Vocational College, 2024. 428 p. URL: http://www.researchgate.net/publication/385377545_ pp.56–62 (in Ukrainian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2010_12_11
6. Zhen Li, Zhao Lei, Sheng Xu, Hengyang Sun, Bin Li, Zhizhong Qiao. Probing Internal Damage in Grey Cast Iron Compression Based on Acoustic Emission and Particle Flow. *Processes*, 2024, vol. 12(9), 1893. doi: <https://doi.org/10.3390/pr12091893>
7. Riccioli F., Alkhateeb S., Mol A., Pahlavan L. Feasibility assessment of non-contact acoustic emission monitoring of corrosion-fatigue damage in submerged steel structures. *Ocean Engineering*, 2024, vol. 312, part 3, 119296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119296>
8. Abarkane C., Florez-Tapia A.M., Odriozola J., Artetxe A. et al. Acoustic emission as a reliable technique for filiform corrosion monitoring on coated AA7075-T6: Tailored data processing. *Corrosion Science*, 2023, vol. 214, 110964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.110964>
9. Tymchyk H.S., Filippova M.V., Demchenko M.O. Diahnostyka napruzhenno-deformovanoho stanu metalevykh konstruktii: monohrafiia [Diagnostics of the stress-strain state of metal structures: monograph]. Kyiv, 2023. 168 p. (in Ukrainian).
10. Voitov V.A., Biekirov A.Sh., Voitov A.V. Vybir informatyvnykh parametriv akustychnoi emisii dlia vyznachennia shvydkosti znoshuvannia trybosystemy na perekhidnykh rezhymakh [Selection of informative acoustic emission parameters for determining the wear rate of a tribosystem in transient regimes]. *Technical service of agriculture, forestry and transport systems*, 2019, no. 15, pp. 190–202 (in Ukrainian).
11. Stankevych O.M. Matematychna model akustychnoi emisii vid trishchyny poperechnoho zsuvu [Mathematical model of acoustic emission from mode II crack]. *Computer design systems. Theory and practice*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 1–7 (in Ukrainian).
12. Nakonechna O.A. Vykorystannia prohramnykh zasobiv modeliuвання protsesiv obrobky syhnaliv akustychnoi emisii v protsesi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv z kompiuternykh nauk [The use of software tools for modelling the processing of acoustic emission signals in the training of future specialists in computer science]. *Shared values, approaches, and requirements for the implementation of an educational process during training engineering specialists in Ukraine and EU countries*. Wloclawek, Republic of Poland, 2021, pp. 63–68 (in Ukrainian). Available at: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/33660>
13. Wenming Li. Global Acoustic Emission Testing-based NDT Market Report 2025. Acoustic Emission-based NDT Market Global Industry Analysis 2019–2024 and Opportunity Assessment 2025–2035. Guangzhou Huaxia Vocational College, 2024. 428 p. Available at: http://www.researchgate.net/publication/385377545_

References

1. Aitor García de la Yedra, Igor Erro, Javier Vivas, Oier Zubiri et al. Acoustic Emission and Digital Image Correlation-Based Study for Early Damage Identification in Sandwich Structures. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14(21), 9728. doi: <https://doi.org/10.3390/app14219728>
2. Bergmayr T., Winklberger M., Kralovec C., Schagerl M. Structural health monitoring of aerospace sandwich structures via strain measurements along zero-strain trajectories. *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol. 126, 105454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105454>
3. Machikhin A., Poroykov A., Bardakov V., Marchenkov A. et al. Combined Acoustic Emission and Digital Image Correlation for Early Detection and Measurement of Fatigue Cracks in Rails and Train Parts under Dynamic Loading. *Sensors*, 2022, vol. 22(23), 9256. doi: <https://doi.org/10.3390/s22239256>
4. Nedoseka S.A., Nedoseka A.Ya., Yaremenko M.A., Boichuk O.I., Ovsienko M.A. Metod akustychnoi emisii pry otsiniuvanni stanu zvarnykh shviv ta yikh sluzhbovykh vlastyvoستي. Chastyna 1. Vplyv typu zvarnogo ziednannia na akustychnu emisiiu [Acoustic emission method at evaluation of the state of welds and their service properties. Part 1. Effect of welded joint type on acoustic emission]. *Automatic Welding*, 2021, no. 2, pp. 52–59 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>
5. Koval P.M., Stashuk P.M., Kovalchik Ya.I. Doslidzhennia trishchynostiikosti monolitnoi poperedno napruzhenoi estakady metodom akustychnoi emisii [Investigation of crack resistance of monolithic prestressed overpass using acoustic emission method]. *Dorohy i mosty*, 2010, vol. 12,