

**АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРОЗІЙНИХ  
ПОШКОДЖЕНЬ МАТЕРІАЛІВ (Огляд).  
Ч. 1. ВИЯВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ  
ТА КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ**

*В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, З. Т. НАЗАРЧУК<sup>1</sup>, І. Я. ДОЛІНСЬКА<sup>1</sup>,  
Р. Я. ЯРЕМА<sup>2</sup>, Т. В. СЕЛІВОНЧИК<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> ПрАТ "Львівський локомотиворемонтний завод";

<sup>3</sup> Луцький національний технічний університет

Оцінено основні аспекти акустико-емісійного (АЕ) діагностування корозійних процесів у конструкційних матеріалах. Наведено результати численних досліджень електрохімічної корозії методом АЕ. Проаналізовано застосування методу до оцінки корозійної втоми матеріалів.

**Ключові слова:** електрохімічна корозія, акустична емісія, корозійна втома, пітингова (точкова) корозія.

Через значні матеріальні втрати від корозії, зниження надійності і безпеки споруд підвищився інтерес до пізнання її природи, розроблення методів і засобів сповільнення, запобігання та діагностування цих процесів. В цій царині знань вже досягнуто певних успіхів. Відомо, що, вживаючи захисні заходи, можна знизити втрати від корозії. Проте проблема все ж залишається актуальною і кожен крок на шляху до її розв'язання має важливе соціальне і економічне значення.

Одним із перспективних для діагностування корозійних процесів є метод акустичної емісії (АЕ), який вигідно вирізняється серед інших методів неруйнівного контролю високою чутливістю. Нижче проаналізовано його придатність для виявлення і контролю процесів корозії, зокрема електрохімічної і корозійної втоми (КВ).

**Зумовлені корозією джерела АЕ.** Через чутливість методу АЕ до змін структурних і механічних характеристик матеріалу під час корозії відповідає своє джерело АЕ зі специфічними властивостями [1]. Наприклад, енергія АЕ від розчинення металу недостатня, щоб виявити сигнали. У цьому випадку навіть максимальна амплітуда АЕ не перевищувала 10  $\mu\text{V}$ . Руйнування товстих оксидних плівок на поверхні металу викликає АЕ вибухового типу з відносно невеликими амплітудами [2–5] через незначну енергоємність процесу. Розриву оксидних плівок відповідають імпульси амплітудою до 10  $\mu\text{V}$  [6–8].

Виділення водню – одне з найпотужніших джерел АЕ під час корозії за деяких умов у лужних розчинах, де відновлення водневого іона домінує як катодна реакція [9–19]. Утворення бульбашок водню, його абсорбція і десорбція, утворення водневих блістерів як передвісників пітингової корозії [20], а також формування гідридів у деяких сплавах забезпечують досить високу енергію сигналів АЕ для їх детектування. Амплітуди цих джерел досягають декількох сотень мікрівольт [7, 9].

У пластичній зоні вершини тріщини, що розвивається, відбуваються деякі акти, які можуть бути джерелами АЕ. Зокрема, деформація ковзання або двійни-

кування, мартенситне перетворення, розтріскування або декогезія включень, мікророзтріскування. Деформація ковзання і електрохімічне розчинення металу проявляються у вигляді неперервної емісії з амплітудами в декілька десятків мікрвольт [21–26]. З іншого боку, під час двійникування та пластичного деформування у вершині тріщини спостерігається вибухоподібна (дискретна) АЕ, амплітуда якої до двох сотень мікрвольт [27–29]. Дискретні імпульси з частотою 400...500 kHz відповідають пластичній деформації у вершині тріщини, що підростає [3, 4].

У метатривких аустенітних неіржавних сталях, зокрема типу 304 і 316, мартенситне перетворення індукують напруження або водень, що генерує амплітуди емісії 200...300  $\mu\text{V}$  [30, 31].

Іншим найважливішим джерелом АЕ під час локалізованих корозійних процесів, зокрема корозійного розтріскування і КВ, є ініціювання тріщин і їхнє поширення, викликане корозивним середовищем. Цей тип АЕ тісно пов'язаний з т. зв. “стрибком тріщини” – перехідним вивільненням локальної пружної енергії під час докритичного її росту. Встановлено кількісні співвідношення між АЕ, пов'язані зі стрибком тріщини і площею її підростання [20, 32, 33]. Злиття мікропор, транскристалітний або міжзеренний відколи, стрибок мікротріщини в межах розмірів зерна під час КВ або корозійного розтріскування супроводжуються випромінюванням з амплітудами до десятків мілівольт [1, 34]. Під час коалесценції великих пор і утворення тріщин, розмір яких перевершує розмір зерна, з'являються сигнали з амплітудами в декілька десятків мілівольт [27–29, 35, 36]. Вивільнення енергії під час стрибка магістральної тріщини і утворення другорядних мікротріщин в окрихченій зоні супроводжується високоамплітудною АЕ з домінантною частотою сигналу, яка змінюється від 150 до 300 kHz [2, 3, 5].

Енергетичний рівень АЕ, створений тріщиною або декогезією включення чи частинки другої фази, зокрема видовженого сульфїту марганцю (MnS) в сталях, збагаченими залізом включеннями в алюмінієвих сплавах і карбіди, які осідають на межах зерен в неіржавних сталях, очевидно, залежить від їх розміру, геометрії, орієнтації тощо [37–42]. Досить високу амплітуду АЕ, яка перевищує 1 mV, може в деяких випадках випромінювати таке джерело. Виявлено, що індуковані воднем блістери, які можуть розвиватися в тріщині в трубних сталях, проявляються як видовжені включення MnS у середовищах сірководню [43, 44]. Це індуковане воднем розтріскування повинно забезпечити досить високі амплітуди АЕ. Максимальна амплітуда АЕ від мікророзтріскування в пластичній зоні становить декілька мілівольт [27, 28, 35].

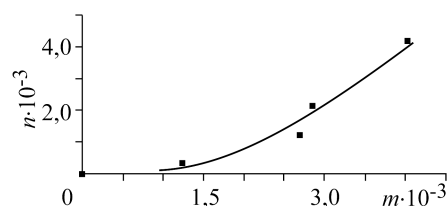
Звичайно, вказані абсолютні значення енергії АЕ можна вважати лише дуже наближеними. Через відсутність єдиних метрологічних вимог до калібрування АЕ-апаратури, вимірювального тракту, невизначеність амплітудно-частотних характеристик п'єзоперетворювачів, недостатні відомості про процеси зникання і відображення хвиль, зміну моди хвиль і спектра імпульсів ускладнюється ідентифікація джерел випромінювання під час корозії за амплітудними характеристиками АЕ. В умовах корельованості випромінювання діагностика ще більше ускладнена. Проте, на наш погляд, проблему можна вирішити багатопараметричним аналізом сигналів АЕ.

**Акустична емісія під час електрохімічної корозії.** Є спроби вивчити суто електрохімічні типи корозії – рівномірну [14, 45, 46] або точкову [14, 16, 47]. В останньому випадку досліджували в основному алюміній і аустенітні неіржавні сталі в присутності іонів хлориду. В обох випадках активність АЕ (кількість подій) корелює зі швидкістю корозії, яку оцінювали за падінням ваги, густини прикладеного струму або швидкості виділення водню. Безпосереднє кількісне співвідношення встановили навіть між кількістю подій АЕ і кількістю ямок або їх площ (рис. 1) [47]. Тривалий період генерування акустичних сигналів пов'язу-

вали з розвитком бульбашок водню [14, 16, 47, 48]. Встановили [49], що найчутливіші під час дослідження акустичного випромінювання від локальних точкових корозійних пошкоджень активність і тривалість одиничних подій АЕ.

Рис. 1. Залежність кількості подій АЕ  $n$  від кількості  $m$  виявлених ямок корозії [47].

Fig. 1. Dependence of AE number of events  $n$  on number  $m$  of detected corrosion pits [47].



Метод АЕ застосовували [50] для вивчення зародження і поширення пітингової корозії у зразках з аустенітної неіржавної сталі AISI 316L у 3%-му розчині NaCl, рН 2. Виявили, що стадія зародження пітингової корозії не вирізняється активністю АЕ (записані сигнали АЕ не надто численні). Але вона посилюється під час розвитку пітингів. Це пов'язано з реєстрацією резонансних сигналів, які стають переважальними для розвитку пітингів (ямок) у формі закупорених комірок, де еволюція бульбашок водню супроводжується АЕ. Наступний етап, тобто перехід до рівномірної корозії, легко виявляють цим методом [50].

У праці [51] виконано АЕ-контроль пітингів (ямок), що розвинулися внаслідок потенціостатичної або гальваностатичної поляризації у двох аустенітних неіржавних сталях типу 316L у 3%-му розчині NaCl, підкисленому до рН 2. Вивчаючи еволюцію активності АЕ під час тесту, зафіксували тимчасову затримку перш ніж ями (пітинги) стали джерелами АЕ. Ця затримка і швидкість рахунку АЕ-подій, виміряна на стадії поширення ямок, тісно корелюють з чутливістю матеріалу до точкової корозії і процедурою поляризації. Встановили, що час наростання і сумарний рахунок сигналів АЕ є задовільними параметрами для контролю пітингової (точкової) корозії аустенітних неіржавних сталей методом АЕ незалежно від процедури поляризації.

Вивчали рівномірну, пітингову і щільну корозію аустенітної неіржавної сталі AISI 304 [52]. Електрохімічне середовище – 3%-ий розчин NaCl з рН 2. Застосовували 16-канальну АЕ-систему FPGA-PC, період виявлення джерел корозії 1 ms. За результатами АЕ-моніторингу виявили, що за рівномірної корозії значний сумарний рахунок сигналів АЕ, зареєстрованих у перші 4 h експерименту, пов'язаний з кількістю водневих бульбашок. Переважно реєструвались сигнали з високою амплітудою (між 45 і 63 dB) і сумарним рахунком, меншим 500 (рис. 2). Таку активність пов'язують з численним лусканням бульбашок, викликаним послідовно зруйнованими пасивними плівками поверхні матеріалу. У цей період швидкість руйнування перевершує швидкість утворення пасивної плівки. Іншим важливим моментом є те, що амплітуди розриву бульбашок порівняно високі у вузькому діапазоні. Далі кількість подій АЕ стрімко зменшилась, оскільки на цьому етапі швидкості руйнування і формування пасивної плівки однакові (рис. 3). Для точкової і щільної корозії показники АЕ виявились вищими з широким діапазоном амплітуд. Крім того, кореляція між сумарним рахунком і амплітудами АЕ близька до лінійної. Швидкість рахунку низька в початковий період, але далі стрімко збільшувалася. Високі амплітуду і сумарний рахунок АЕ пов'язують з руйнуванням пасивної плівки на початку обох типів корозійних процесів [53, 54].

Суттєвий вплив електричного поля на параметри АЕ під час електрохімічних реакцій зафіксували в праці [2]. Тут за анодного окислення алюмінію і титану за ступінчатої зміни струму поляризації від 500 до 1500 A/m<sup>2</sup> з кроком 100 A/m<sup>2</sup> швидкість рахунку  $\dot{N}$  збільшувалася. Це пов'язано з “ростом–руйнуванням” оксидного шару. Для струму 100 A/m<sup>2</sup> величина  $\dot{N}$  досить мала і дефек-

ти в плівці не виявляли (збільшення у 1000 разів). Зростання струму до  $500 \text{ A/m}^2$  супроводжувалось підвищенням значень  $\dot{N}$  і утворенням мікротріщин. Струм  $1500 \text{ A/m}^2$  спричиняв пробиття оксидного шару.

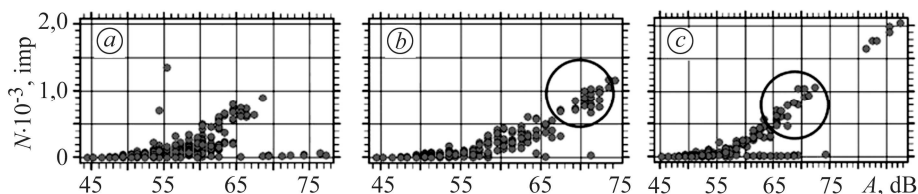


Рис. 2. Залежність сумарного рахунку  $N$  сигналів АЕ від амплітуди  $A$ :  
*a* – рівномірна корозія; *b* – пітингова; *c* – щілинна.

Fig. 2. Dependence of AE signals total counts  $N$  on amplitude  $A$ :  
*a* – uniform corrosion; *b* – pitting; *c* – crevice.

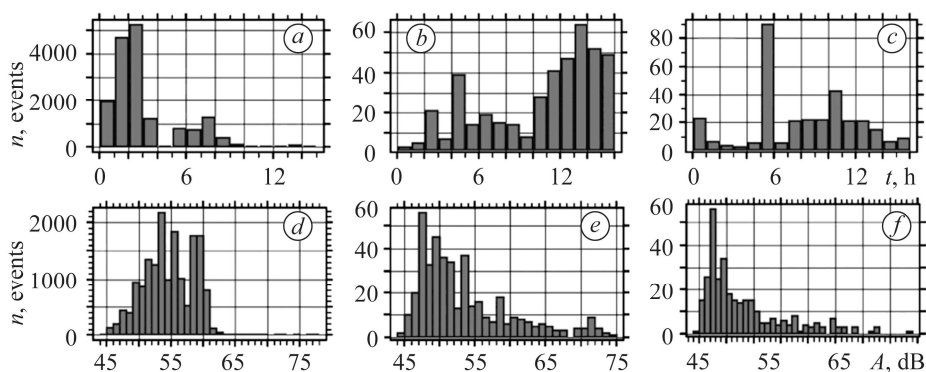


Рис. 3. Залежність кількості подій АЕ  $n$  від часу (*a-c*) та амплітуди (*d-f*):  
*a, d* – рівномірна корозія; *b, e* – пітингова; *c, f* – щілинна.

Fig. 3. Dependence of AE number of events  $n$  on time (*a-c*) and amplitude (*d-f*):  
*a, d* – uniform corrosion; *b, e* – pitting; *c, f* – crevice.

Встановили [53], що різні умови агресивного середовища обумовлюють різні джерела АЕ під час виявлення і дослідження корозії сталі AISI 304. Виконували два експерименти за кімнатної температури, використовуючи кислий 30%-ий розчин хлориду в пасивних випробуваннях і 3%-ий розчин NaCl – в електрохімічному процесі. Виявили, що джерелом корозії АЕ в хлориді високої концентрації є бульбашки водню, оскільки кількість зареєстрованих подій АЕ змінюється одночасно з їх кількістю. Крім того, частотна характеристика сигналу АЕ пов'язана з розміром бульбашок (на початковій стадії корозії їх розмір  $\sim 0,03 \dots 0,05 \text{ mm}$ , а частота сигналу  $125 \dots 225 \text{ kHz}$ ). Хоча корозія супроводжується проявом різних джерел АЕ (корозійна активність і руйнування пасивної плівки), її сигнал від дії бульбашки водню має вищу амплітуду і більшу кількість подій, ніж інші джерела. Під час електрохімічного випробування джерелами АЕ є руйнування пасивної плівки і точкова корозія. Тут кількість подій АЕ більша на початковому етапі і суттєво зменшується на стадії пітингової корозії. Натомість, у праці [55] спостерігали слабку кореляцію між амплітудою сигналу АЕ і діаметром бульбашки: мала бульбашка генерує високочастотний сигнал. Основним механізмом джерела АЕ є її еволюція [55].

У працях [2, 5, 40–44, 56] досліджували різні матеріали у корозивно-активних середовищах. У всіх випадках, спостерігаючи АЕ, автори аналізували її джерела і фільтрували сигнали завад. Далі, варіюючи довжину тріщини, навантаження і

середовище, змінювали коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН)  $K$  і шукали зв'язок між швидкістю рахунку  $\dot{N}$  і значенням  $K$ . Наприклад, встановили [5], що досить точно цей зв'язок описує напівемпіричне рівняння  $\dot{N} \approx aK_{\max}^6 / (K_c - K_{\max})$ , де  $a$  – швидкість тріщиноутворення;  $K_{\max}$  – максимальне значення КІН;  $K_c$  – в'язкість руйнування. Автори праці [40] отримали емпіричне рівняння, за яким можна розрахувати втрати міцності в умовах рівномірної, пітингової і міжкристалітної корозії. Також встановили [18, 57] кореляцію між параметрами АЕ і швидкістю корозії. Однак, оскільки залежність  $\dot{N} \sim K$  у всіх випадках конкретна, для діагностики стану об'єктів інформації про якісну відповідність цих параметрів недостатньо. Потрібні дані про швидкість тріщиноутворення, середовище, електричний потенціал, поточне значення КІН, алгоритм пошуку яких у працях [2, 5, 40–44, 56] не встановлено.

Виконано низку досліджень механізму руйнування матеріалів. Наприклад, метод АЕ застосовували як альтернативний термогравіметричний інструмент для вивчення аномального окиснення міді за температури 723 К [26]. Так вдалося пояснити незрозумілі причини відлущування оксидної плівки під час окиснювання і виміряти швидкість процесу.

У праці [58] вивчали відшаровувальну корозію алюмінієвих сплавів Al 2024 T3, Al 7449 T6 і T7. Зразки занурювали на чотири дні в модифікований солений розчин ASTM STP 1134. Запис емісії засвідчив зв'язок між активністю АЕ і швидкістю корозії. Виявили, що сплав Al 7449 T6 чутливіший до відшарування, ніж Al 7449 T7. Вимірюючи АЕ, встановили [5] дискретність випромінювання під час електрохімічної корозії латуні. За низкою стрибків АЕ зафіксували злам і міжзеренну тріщину завдовжки 300  $\mu\text{m}$ , що може свідчити про стрибкоподібний розвиток руйнування.

Метод АЕ виявився успішним під час дослідження корозії сплаву нікелю, алюмінію, бронзи, коли один з його компонентів переходив у розчин, міняючи структуру [42]. Встановили, що вибіркова корозія у двофазному сплаві починається на позитивно заряджених частинках структури і залежить від форми анодної фази. У цій ситуації АЕ-діагностикою зафіксували суттєву різницю амплітудних спектрів сигналів для зразків у стані постачання, зварних і прокородованих. На основі отриманих результатів запропонували метод ідентифікування стану об'єкта контролю шляхом аналізу функції розподілу амплітуд  $n(a) = (a/a_0)^{-b}$  ( $b$  – нахил кривої на графіку залежності  $\log n(a) - \log a/a_0$ ;  $a$  – амплітуда АЕ;  $a_0$  – її мінімальне значення). Довели, що під час інтенсифікації корозії амплітуда АЕ зростає, а кут нахилу кривої функції розподілу амплітуд зменшується.

Досліджуючи  $\alpha$ -латунь, встановили, що подібний розподіл за повільного росту корозійної тріщини в логарифмічних координатах можна апроксимувати прямою. На ділянках високих амплітуд тут іноді з'являється максимум [43]. Зміну амплітудного розподілу АЕ за міжкристалітної корозії і корозійного розтріскування аустенітних сталей у середовищі хлоридів зауважили й автори праці [56].

Для матеріалу в стані постачання і після наводнювання у сірководні енергія АЕ пов'язана з розміром зерна гіперболічною залежністю [59]. Отже, методом АЕ можна надійно діагностувати електрохімічну корозію, швидкість її розвитку, залежність від зовнішніх чинників, рівня прикладених напружень тощо, а також визначати механізм, стадію і кінетику руйнування матеріалів.

**АЕ-оцінювання корозійної втоми металів.** Відомі АЕ-дослідження КВ сталі типу D6aC, сплавів типу Ti–6Al–4V і алюмінієвого сплаву 7075-T6, де використали напружені зразки зі задалегідь виведеними втомними тріщинами від концентраторів напружень [60]. Корозійне розтріскування під час малоциклової втоми легко виявляли за суттєвим збільшенням швидкості рахунку АЕ.

У праці [61] контролювали розвиток пошкодження під час КВ відпущеної і загартованої вуглецевомарганцевої сталі в 3%-му розчині NaCl за допомогою АЕ, яку генерували під час періодичних максимальних навантажень. Виявили, що так можна оцінити розвиток втомних пошкоджень, а також встановити ініціювання прихованих втомних тріщин всього лише за час, що складає 5% від загальної тривалості КВ. Якісний метод, який базувався на насиченні АЕ під час періодичного навантаження, застосовували для прогнозування залишкового ресурсу.

Щоб вивчити ріст тріщин та особливості АЕ під час КВ, використовували високоміцний сплав Ti-6Al-4V [28]. Напружені компактні зразки готували так, щоб напрям розтріскування був паралельним (T-L) або нормальним (L-T) до напрямку первинного гарячого вальцювання. Випробовували у відкритому повітрі і за декількох електрохімічних потенціалів у 3,5%-му розчині NaCl під циклічним навантаженням. Хоча суттєвих розбіжностей у швидкостях росту тріщини у різних середовищах не виявили, але підвищену активність АЕ (сумарний рахунок подій АЕ і пікових амплітуд) спостерігали у розчині NaCl. Отже, метод АЕ може виявитись корисним для контролювання росту втомних тріщин. Спостерігаючи за допомогою оптичних і сканувальних електронних мікроскопів за траєкторією розтріскування і поверхневих тріщин, зафіксували, що морфологія тріщини поєднує інтеркристалітне розтріскування вздовж меж зерен  $\beta$ -фази, розтріскування по межовій поверхні  $\alpha/\beta$  (інтерфаза) внаслідок гідридів, утворених уздовж межових площин, і транскристалітне розгалуження або ріст гідридної тріщини. Можна розрізнити різні механізми розтріскування залежно від енергетичних рівнів випромінюваної АЕ і морфології тріщин за амплітудним розподілом.

У праці [62] вивчали поведінку АЕ під час КВ низькоміцної сталі, яку використовують для платформ на береговому шельфі. Для вимірювань застосовували плоский зразок зі сталі типу TTStE (границя міцності 360 МПа), який піддавали вібраційним навантаженням у морській воді. Аналіз рівнів навантаження, за яких детектуються сигнали АЕ, засвідчив, що за винятком певної фази руйнування, тертя в зоні тріщини є основною причиною ідентифікованих сигналів розтріскування. Методом АЕ вдається виявити приховані тріщини на ранній стадії, тобто значно швидше, ніж візуальними методами. Досліджували АЕ під час КВ аустенітної неіржавної сталі типу 304, потенціостатично поляризованої в розчинах  $\text{NH}_2\text{SO}_4 + 0,5\text{M NaCl}$  або  $1\text{N H}_2\text{SO}_4$ , використовуючи компактні напружені зразки [9, 63–66]. Швидкість росту тріщин за потенціалів  $E_{\text{согг}} = -0,8$  і  $-0,28$  V суттєво зросла проти швидкості у повітрі, де  $E_{\text{согг}} = +0,01$  V (некорозивні середовища), коли коефіцієнт  $\Delta K$  менш ніж  $37 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  і в пластичній зоні біля вершини тріщини характер деформації змінюється від розтягу до зсуву і відбувається наскрізне за товщиною течіння. Сумарний рахунок подій АЕ і її енергію описують ступінчасті криві, а швидкість рахунку тим вища, що інтенсивніший ріст тріщин.

Активність АЕ за потенціалу корозії  $-0,8$  і  $-0,28$  V (виділення водню) продовжує зростати навіть після переходу пластичної зони. З іншого боку, у повітрі або за потенціалу  $+0,1$  V вона чітко зменшувалась після цього переходу.

Виявлено [64–66], що джерела, які забезпечують високу активність АЕ під час росту втомної тріщини в сталях типу 304, зумовлені клиноподібним й інтеркристалітним розтріскуванням внаслідок сумісної дії тривісних напружень (механічна умова), корозивного середовища (інтеркристалітна корозія або виділення водню) і чинників, пов'язаних з якістю матеріалів (неметалічні включення тощо).

За результатами відомих досліджень [64] та випробувань на корозійне розтріскування напружених зразків з плівкою пасивації, сформованою в середовищі, що імітує киплячий реактор, склали репрезентативну карту розподілу амплітуд АЕ (рис. 4), що супроводжують мікропроцеси КВ або корозійного розтріскування.

Активність АЕ під час корозійного розтріскування сталі типу 316 вивчали у праці [63]. Швидкість рахунку АЕ вимірювали у високотемпературному 10%-му розчині гідроксиду натрію (NaOH), використовуючи зразки з U-подібним вигином та хвилевід. Високу інтенсивність АЕ спостерігали за підвищення температури розчину.

Рис. 4. Розподіл кількості сигналів АЕ  $N$  та їх амплітуд  $U$  залежно від різних джерел генерування під час корозійного розтріскування та корозійної втоми: 1 – розчинення металу, руйнування оксидної плівки; 2 – деформація ковзання, двійникування, виділення бульбашок водню; 3, 4 – мікротамакротріщиноутворення [64].

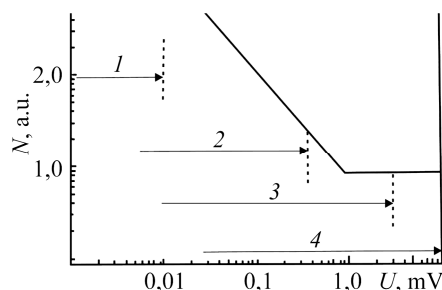
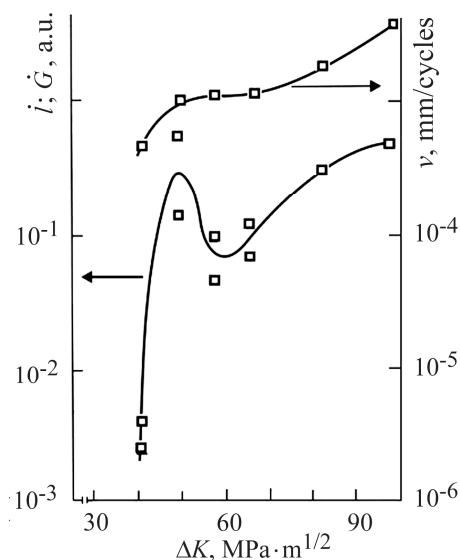


Fig. 4. Distribution of AE signals number  $N$  and their amplitudes  $U$  depending on various sources of generation during corrosion cracking and corrosion fatigue: 1 – dissolution of the metal, oxide film destruction; 2 – slip deformation, twinning, evolution of hydrogen bubbles; 3 – microcracking; 4 – macrocracking [64].

У праці [67] детектували і аналізували АЕ від КВ сталі А533В у модельному киплячому середовищі реактора з використанням зразків Т-ДСВ з хвилеводами з неіржавної сталі. Виявили, що дискретні сигнали АЕ можна ідентифікувати, знижуючи шуми тертя від навантажувальних інденторів і зразка та оцінюючи спектр сигналів, які випромінюють різні джерела. Емпіричне співвідношення між енергією АЕ і швидкістю росту тріщини (рис. 5) підтверджує висновок, що метод АЕ є напівкількісним засобом виявлення і контролю КВ у модельних середовищах киплячого реактора. Цей процес можна кількісно контролювати на електростанціях за умови вирішення інших технічних проблем, пов'язаних з оцінкою швидкості росту тріщини.

Рис. 5. Залежність швидкості росту тріщини  $\dot{l}$  та енергії АЕ  $\dot{G}$  від КІН  $\Delta K$  під час корозійної втоми сталі А533В у модельному середовищі [67].

Fig. 5. Dependence of crack growth rate  $\dot{l}$  and AE energy  $\dot{G}$  on SIF  $\Delta K$  during corrosion fatigue of A533V steel in model environment.



Для низькоміцних сталей типу SM50BV виявили [68] кореляцію між швидкістю рахунку АЕ і швидкістю росту тріщини або діапазоном інтенсивності напружень у повітрі і 3,5%-му розчині NaCl за циклічного навантаження. Встановили, що АЕ під час КВ таких сталей залежить від впливу не тільки окрихчення матеріалу у вершині тріщини, через що активізується АЕ, а й від зменшення розміру пластичної зони біля вершини тріщини, внаслідок чого АЕ послаблюється.

Останнім часом АЕ успішно використовують для діагностування корозійних процесів у залізобетонних конструкціях [69–75]. Вона може ідентифікувати початок корозії арматури і зародження бетонного розтріскування через набухання продуктів корозії під час КВ [73, 75].

Арматурна сталь (арматурний стрижень) в бетоні кородує так [72]. На першому етапі корозія виникає в арматурному стрижні. На другому її швидкість зменшується, а на третьому через розширення арматурного стрижня внаслідок продуктів корозії у бетоні утворюються тріщини. Тут для визначення корозії виконують безперервний АЕ-контроль в пришвидшеному КВ випробуванні. Встановили [72], що перша висока активність АЕ зумовлена початком корозії арматурного стрижня. На другому етапі її активність падає. Після другої високої активності АЕ продукти корозії візуально спостерігали на поверхні арматурного стрижня, що зумовило зародження тріщин у бетоні. Далі реєстрували суттєво більші амплітуди подій АЕ, які пов'язані з розтріскуванням бетону через набухання продуктів корозії, які можна фіксувати на третьому етапі моделі. Таким чином, феноменологічна модель корозійних втрат добре корелює з АЕ, яку реєстрували в залізобетоні.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що метод АЕ є перспективним і надійним для вивчення електрохімічної корозії та КВ конструкційних матеріалів і це буде висвітлено у другій частині статті.

*РЕЗЮМЕ.* Оценены основные аспекты акустико-эмиссионного (АЭ) диагностирования коррозионных процессов в конструкционных материалах. Приведены результаты многочисленных исследований электрохимической коррозии методом АЭ. Проанализировано применение метода для оценки коррозионной усталости материалов.

*SUMMARY.* The main aspect of acoustic emission (AE) diagnostics of corrosion processes in structural materials has been considered. The results of numerous studies of electrochemical corrosion by AE method have been presented. Application of the method for assessing the corrosion fatigue of materials has been analyzed.

1. *Задачи акустико-эмиссионной диагностики процесса коррозии (обзор) / Г. Б. Муравин, Л. М. Лезвинская, Н. О. Макарова, Г. С. Павловская // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 18–28.*
2. *Бакулин А. В., Попов В. И. Акустическая эмиссия при анодном оксидировании алюминия и титана // Защита металлов. – 1985. – 6, № 6. – С. 824–827.*
3. *Юяма С. Определение дефектов, обусловленных коррозией, методом акустической эмиссии // Босёку гидзюцу. – 1986. – 35. – С. 163–170.*
4. *Application of acoustic emission to detecting of reinforcing steel corrosion in concrete / M. S. Weng, S. E. Dunn, W. H. Hartt, and R. P. Brown // Corr. NACE. – 1982. – 38, № 1. – P. 9–14.*
5. *Newman R. C. and Sieradzki K. Correlation of acoustic and electrochemical noise in the stress-corrosion cracking of  $\alpha$ -brass // Scripta Metallurgica. – 1983. – 17. – P. 621–624.*
6. *Suzuki Y., Tsujikawa S., and Hisamatsu J. Studies on the mechanism of stress corrosion cracking of pure copper by using acoustic emission technique // Boshoku Gijutsu (Corr. Eng.). – 1976. – 25. – P. 155.*
7. *Yuyama S., Kishi T., and Hisamatsu Y. Corrosion fatigue characteristics of 304-stainless steel and AE analysis during the process monitoring of cracking and AE sources // J. Japan Inst. Metals. – 1982. – 46, № 1. – P. 85–93.*
8. *Kusanagi H., Kimura H., and Sasaki H. Stress effect on the magnitude of acoustic emission during magnetization of ferromagnetic materials // J. Acoustical Soc. America. – 1978. – 64. – P. 170–175.*
9. *Yuyama S., Kishi T., and Hisamatsu Y. AE analysis during corrosion, stress corrosion cracking and corrosion fatigue processes // J. of Acoustic Emission. – 1983. – 2, № 1/2. – P. 71–93.*
10. *Скальський В. Р., Андрейків О. С. Оцінка об'ємної пошкоженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.*



11. Андрейків О. С., Скальський В. Р., Сулим І. Т. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування. – Львів: Сполом, 2007. – 480 с.
12. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3-х т. – К.: Наук. думка, 2009. – Т. 1: Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. – 328 с.
13. Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Станкевич О. М. Акустико-емісійне діагностування макроруйнування конструкційних матеріалів. – К.: Наук. думка, 2014. – 264 с.
14. Retting T. W. and Felsen M. J. Acoustic emission method for monitoring corrosion reactions // *Corrosion*. – 1976. – **32**, № 4. – P. 121–126.
15. О микроакустике коррозионных процессов / В. А. Друченко, В. М. Новаковский, А. К. Чирва, Н. А. Хануков, А. М. Бердников // *Защита металлов*. – 1977. – **13**, № 3. – P. 236–240.
16. Mansfeld F. and Stocker P. J. Acoustic emission from corroding electrodes // *Corrosion*. – 1979. – **35**, № 12. – P. 541–544.
17. Rodgers J. M. The developing role of acoustic emission in aircraft maintenance and structural integrity // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 537–549.
18. Scott I. G. and Wilson L. Simple acoustic emission test for the detecting of corrosion // *Australasian Corr. Eng.* – 1979. – **23**. – P. 9.
19. Scott I. G. Acoustic emission and corrosion // *Proc. 9<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive Testing*. – Melbourne, 1979. – P. 46–53.
20. Bargeron C. B. and Givens R. B. Precursive blistering in the localized corrosion of aluminum // *Corrosion*. – 1980. – **36**, № 11. – P. 618–625.
21. Carpenter S. H. AE generated by dislocation mechanism during deformation of metals // *J. Acoustical Soc. America*. – 1978. – **64**. – S1–(S155).
22. Kishi T. AE and inhomogeneous deformation in plastic deformation // *J. Acoustical Soc. America*. – 1978. – **64**. – S1–(S155).
23. Hsu S. Y. and Ono K. Temperature-dependence of acoustic emission in an austenitic stainless steel // *Mater. Sci. Eng.* – 1979. – **38**, № 2. – P. 187–191.
24. Hsu S. Y. S. and Ono K. Acoustic emission of plastic flow – I. Metals // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 283–294.
25. Takashima K., Higo Y., and Nunomura S. Acoustic emission during the martensite transformation of 304 stainless steel // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 261–270.
26. Ono K., Randy R., and Ouchi C. On the amplitude distribution of burst emission due to MNS inclusions in HSLA steels // *Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1978. – P. 33–46.
27. SCC characteristics of Ti–6Al–4V alloy and analysis of cracking process by visual observations and AE technique / S. Yuyama, Y. Hisamatsu, T. Kishi, and T. Kakimi // *Boshoku Gijutsu (Corr. Eng.)*. – 1981. – **30**. – P. 684–690.
28. Acoustic emission from environmental cracking of a high strength titanium alloy / S. Yuyama, T. Kishi, Y. Hisamatsu, T. Kakimi // *J. of Acoustic Emission*. – 1983. – **2**, № 1/2. – P. 19–27.
29. Effects of environments, mechanical conditions and sensitization on crack growth, and AE behavior during corrosion fatigue process of sensitized 304-stainless steel (AE source identification by SEM observations) / S. Yuyama, T. Kishi, Y. Hisamatsu, and T. Kakimi // *J. Japan Inst. Met.* – 1982. – **46**, № 5. – P. 509.
30. Swindlehurst W. E. Carbide cracking as a source of acoustic emission in steel // *J. of Mat. Sci.* – 1978. – **13**, № 1. – P. 209–212.
31. Hamstad M. A. and Mukherjee A. K. Acoustic emission testing of unflawed 7075-T6 aluminum // *J. of Testing Evaluation*. – 1975. – **3**. – P. 167–72.
32. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій // *Методологічні аспекти відбору та обробки інформації*. – Львів: Сполом, 2005. – 396 с.
33. Gerberich W. W. and Hartbower C. E. Some observations on stress wave emission as a measure of crack growth // *Int. J. of Fract. Mech.* – 1967. – **3**, № 3. – P. 185–192.
34. AE classification and micro pop-in cracking in fracture toughness test / H. Nitsuma, M. Kikuchi, H. Takahashi, M. Suzuki, R. Sato // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 411–421.

35. *Nozue A. and Kishi T.* An acoustic emission study of the intergranular cracking of AISI 4340 steel // *J. of Acoustic Emission.* – 1982. – **1**. – P. 1–6.
36. *Nozue A. and Kishi T.* Evaluation of hydrogen-induced cracking unit of AISI 4340 steel by acoustic emission technique // *J. Japan Inst. Met.* – 1981. – **45**, № 1. – P. 1305–1309.
37. *Jaffrey D.* The failures of MnS inclusions in steel under uniaxial stress and their relevance to AE studies // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 249–261.
38. *Okajima K. and Ono K.* Temperature dependence of anisotropic AE behavior of A533B steel // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 270–283.
39. *Wilde B. E., Kim C. D., and Phelps E. H.* Some observations on the role of inclusions in the hydrogen induced blister cracking of linepipe steels in sulfide environments // *Corrosion.* – 1980. – **36**, № 11. – P. 625–632.
40. *Стороженко Н. А., Друченко В. А.* Определение коррозионного разупрочнения стали 2Х13 методом АЭ // Тез. докл. респ. конф. “Ресурсосберегающая технология в электрохимических производствах”. – Харьков, 1987. – Ч. 2. – С. 44.
41. *Culpan E. A. and Foley A. G.* The detection of selective phase corrosion in cast nickel aluminum bronze by acoustic emission techniques // *J. Mat. Sci. Eng.* – 1982. – **17**. – P. 953–964.
42. *Нодзюэ А.* Метод анализа сигналов АЭ, излучаемых при коррозионном охрупчивании // Токё дайгаку утю коху кэнсюсю хоноку. – 1980. – **16**, № 1. – С. 767–780.
43. *Khanna A. S. and Jha B. B.* Acoustic emission technique: an alternative method to study the drittle oxide formed on copper // *Oxidation Met.* – 1987. – **27**. – P. 95–102.
44. *Blaguschek I.* Schallemissionsmessungen bei der Korrosionsspreizung // *Ingenieurhochschule Zittau // Wissenschaftliche Berichtle.* – 1986. – **677**. – P. 9–11.
45. *The correlation of acoustic emission with rate of corrosion / K. H. W. Seah., K. B. Lim, C. H. Chew, S. H. Teoh // Corr. Sci.* – 1993. – **34**, № 10. – P. 1707–1713.
46. *Correlation of electrochemical noise, acoustic emission and complementary monitoring techniques during intergranular stress-corrosion cracking of austenitic stainless steel / Jaka Kovaca, Carole Alauxb, T. James Marrowb, Edvard Govekarc, Andraz Legata // Corr. Sci.* – 2010. – **52**. – P. 2015–2025.
47. *Mazille H., Rothea R., and Tronel C.* An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels // *Corr. Sci.* – 1995. – **37**, № 9. – P. 1365–1375.
48. *Darowicki K., Mirakowski A., and Krakowiak S.* Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods // *Corr. Sci.* – 2003. – **45**. – P. 1747–1756.
49. *Акустико-эмиссионная диагностика коррозионных дефектов трубопроводов / А. Н. Кузьмин, А. В. Жуков, Н. Ф. Стюхин, В. Г. Харебов, Е. Г. Аксельрод // Технадзор.* – 2007. – № 7. – С. 23–28.
50. *Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels: monitoring by acoustic emission / M. Fregonese, H. Idrissi, H. Mazille, L. Renaud, Y. Cetre // Corr. Sci.* – 2001. – **43**. – P. 627–641.
51. *Monitoring pitting corrosion of AISI 316L austenitic stainless steel by acoustic emission technique: Choice of representative acoustic parameters / M. Fregonese, H. Idrissi, H. Mazille, L. Renaud, Y. Cetre // J. of Mat. Sci.* – 2001. – **36**, № 3. – P. 557–563.
52. *Jomdechaa C., Prateepasena A., and Kaewtrakulpong P.* Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types // *NDT&E Int.* – 2007. – **40**. – P. 584–593.
53. *Prateepasen A., Jirarungsatean C., and Tuengsook P.* Identification of AE source in corrosion process // *Key Eng. Mat.* – 2006. – **321–323**. – P. 545–548.
54. *Prateepasen A., Kaewtrakulpong P., and Jirarungsatean C.* Semi-parametric learning for classification of pitting corrosion detected by acoustic emission // *Key Eng. Mat.* – 2006. – **321–323**. – P. 549–552.
55. *Jian Xu, Xinqiang Wu, and En-Hou Han.* Acoustic emission during the electrochemical corrosion of 304 stainless steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> // *Corr. Sci.* – 2011. – **53**. – P. 448–457.
56. *АЭ при коррозионном растрескивании стали 08Х18Н10Т / Ю. Б. Дробот, А. М. Лазарев, Л. Ю. Однопозов, А. Ф. Хрусталёв // Защита металлов.* – 1980. – **16**, № 1. – С. 49–51.
57. *Акустическая эмиссия при страгивании и распространении трещины в алюминиевом сплаве под действием агрессивной среды / А. В. Бакулин, С. Н. Исаев, А. П. Тишкин, А. М. Лексовский // Физ.-хим. механика материалов.* – 1989. – **25**, № 2. – С. 74–79.

- (Acoustic emission in initiation and propagation of the crack in an aluminum alloy under the effect of a corrosive medium / A. V. Bakulin, S. N. Isaev, A. P. Tishkin, A. M. Leksovskii // *Materials Science*. – 1989. – **25**, № 2. – P. 188–192.)
58. *Bellenger F., Maazille H., and Idrissi H.* Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion / *NDT&E Int.* – 2002. – **35**. – P. 385–392.
  59. *Разработка акустико-эмиссионного метода идентификации коррозии / Г. Б. Муравин, Ю. М. Палей, Н. О. Макарова, И. Г. Левитина // Дефектоскопия*. – 1991. – № 7. – С. 58–65.
  60. *Acoustic emission from low-cycle high-stress intensity fatigue / C. E. Hartbower, C. F. Moraes, W. G. Reuter, P. P. Crimmins // Eng. Fract. Mech.* – 1973. – **5**. – P. 765–789.
  61. *Mehdizadeh P.* Assessment of corrosion fatigue damage by acoustic emission and periodic proof tests // *Mat. Evaluation*. – 1976. – **34**. – P. 55–63.
  62. *Jax P. and Richter B.* Detection of corrosion fatigue by acoustic emission // *J. of Acoustic Emission*. – 1983. – **2**, № 1/2. – P. 29–39.
  63. *Yuyama S.* Fundamental Aspects of Acoustic Emission Applications to the Problems Caused by Corrosion // *Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods. ASTM STP 908 // American Soc. for Testing and Mat.* – Philadelphia, 1986. – P. 43–74.
  64. *AE analysis during corrosion, stress corrosion cracking, and corrosion fatigue processes on type 304 stainless steel / S. Yuyama, Y. Hisamatsu, T. Kishi, H. Nakasa // Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 115–124.
  65. *Yuyama S., Kishi T., and Hisamatsu Y.* Fundamental aspects of AE monitoring on corrosion fatigue processes in austenitic stainless steel // *J. of Mat. for Energy Systems*. – 1984. – **5**, № 4. – P. 212–221.
  66. *Yuyama S., Kishi T., and Hisamatsu Y.* Effect of environments, mechanical conditions, and materials characteristics on AE behavior during corrosion fatigue processes of austenitic stainless steel // *Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1982. – P. 115–125.
  67. *Detecting acoustic emission during cyclic crack growth in simulated BWR environment / H. Nakajima, T. Shoji, M. Kikuchi, H. Nitsuma, M. Shindo // Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis. ASTM STP 738 // American Soc. for Testing and Mat.* – Philadelphia, 1981. – P. 139–160.
  68. *Wang Z. F., Zhu Z., and Ke W.* Behavior of acoustic emission for low-strength structural steel during fatigue and corrosion fatigue // *Metal. Trans. A*. – 1991. – **22A**. – P. 2677–2680.
  69. *Idrissi H. and Limam A.* Study and characterization by acoustic emission and electrochemical measurements of concrete deterioration caused by reinforcement steel corrosion // *NDT & E Int.* – 2003. – **36**, № 8. – P. 563–569.
  70. *Acoustic emission monitoring of CFRP reinforced concrete slabs / Sandeep Degala, Piervincenzo Rizzo, Karthik Ramanathan, Kent A. Harries // Construction and Building Mat.* – 2009. – **23**, № 5. – P. 2016–2026.
  71. *Ohtsu M. and Tomoda Y.* Phenomenological model of corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission // *ACI mat. Technical paper*. – 2008. – **105**, № 2. – P. 194–199.
  72. *Acoustic emission monitoring of reinforced concrete under accelerated corrosion / M. Di Benedetti, G. Loreto, F. Matta, A. Nanni // J. of Mat. in Civil Eng.* – 2013. – **25**, № 8. – P. 1022–1029.
  73. *Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission / Yuma Kawasaki, Tomoyo Wakuda, Tomoe Koburai, Masayasu Ohtsu // Construction and Building Mat.* – 2013. – **48**. – P. 1240–1247.
  74. *Shilpa Patil, Bilavari Karkare, and Shweta Goyal.* Acoustic emission vis-à-vis electrochemical techniques for corrosion monitoring of reinforced concrete element // *Construction and Building Mat.* – 2014. – № 68. – P. 326–332.
  75. *Yuma Kawasaki, Yuichi Tomoda, and Masayasu Ohtsu.* AE monitoring of corrosion process in cyclic wet-dry test // *Construction and Building Mat.* – 2010. – № 24. – P. 2353–2357.

Одержано 09.02.2017