

**АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРОЗІЙНИХ
ПОШКОДЖЕНЬ МАТЕРІАЛІВ (Огляд).
Ч. 2. КОРОЗІЙНЕ РОЗТРІСКУВАННЯ МЕТАЛІВ.
ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ**

*В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ¹, З. Т. НАЗАРЧУК¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА¹,
Р. Я. ЯРЕМА², Т. В. СЕЛІВОНЧИК³*

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² ПрАТ "Львівський локомотиворемонтний завод";

³ Луцький національний технічний університет

Проаналізовано результати досліджень акустико-емісійного (АЕ) діагностування корозійних пошкоджень матеріалів. Встановлено взаємозв'язок між сумарним рахунком, енергією, амплітудою акустичного випромінювання і корозійним розтріскуванням сталей та металевих сплавів. Наведено приклади застосування методу АЕ для виявлення корозійних пошкоджень низки промислових об'єктів.

Ключові слова: акустична емісія, корозійне розтріскування, водневе окрихчення, корозія, сталі, металеві сплави.

Одним із найнебезпечніших чинників, що знижує міцність і довговічність металевих елементів конструкцій, є одночасний вплив корозивного середовища та механічного навантаження. Така ситуація виникає під час експлуатації обладнання відповідального призначення в різних галузях промисловості. Особливу увагу тут слід приділяти корозійному розтріскуванню (КР) конструкційних матеріалів, яке має деякі особливості: ранні стадії протікають в середині металу і тривалий час без виходу на зовнішню поверхню матеріалу, що додатково ускладнює їх виявлення. Для вивчення і контролю цього явища широко використовують метод акустичної емісії (АЕ). Адаже таке локальне руйнування супроводжується процесами, які генерують пружні хвилі АЕ. Сьогодні вже отримано задовільні кореляції між конкретними параметрами АЕ та показниками КР [1–6]. Розвивається апаратурна база методу, зокрема, створено багатоканальні акустико-емісійні комплекси для виявлення локації джерел АЕ на великогабаритних об'єктах.

Корозійне розтріскування сталей. Автори праці [7] протестували на КР неіржавну сталь типу 304 у розчині $5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 5\text{M NaCl}$ при 298 К, а також феритні та високоміцні мартенситні в киплячому водяному розчині хлориду магнію (MgCl_2) при 416 К. Вимірювали АЕ і зміну електричного опору або прогин консольних зразків. Використовували високочастотний смуговий фільтр у діапазоні від 1 до 2 МГц для тестів у киплячому розчині MgCl_2 , щоб позбутися фонового шуму від кипіння. Виявили, що у феритних неіржавних і сталях типу 304 домінує електрохімічне розчинення і активність АЕ тут незначна, а висока, навпаки, під час КР високоміцної мартенситної неіржавної сталі, і тому зробили висновок, що КР викликано водневим окрихченням (ВО).

Інші дослідники [8] випробовували сталь типу 304, щоб продемонструвати доцільність АЕ-аналізу для виявлення розвитку КР. Зразки зі заздалегідь виведе-

ними тріщинами використовували, щоб досягти лінійної залежності АЕ від зростальної довжини тріщини, а для спрощення експерименту вивчали розвиток великих тріщин. Зразки піддавали циклічним робочим навантаженням 20 kN і максимальним 30 kN. Під час періоду утримання циклу робочого навантаження застосовували 3,5%-й розчин NaCl, який імітував корозійну атмосферу над морською водою. Встановили, що ріст тріщини під час максимального циклу можна виявляти за сигналами АЕ. Інтенсивна АЕ, ймовірно, є результатом швидкого росту тріщин і перед руйнуванням фіксували великі амплітуди сигналів. У таких тестах важко сподіватися на відтворюваність загального рахунку АЕ N для заданого коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I , оскільки АЕ залежить від структури металу, термообробки тощо, а також змін його властивостей під час механічної обробки. Вимірювали також АЕ під час щілинного КР сталі типу 304 у 3%-му розчині NaCl, використовуючи подвійний консольний зразок зі штучно створеною щілиною [9–11]. На рис. 1 подано сумарні рахунки N подій АЕ і її енергію G під час тестування.

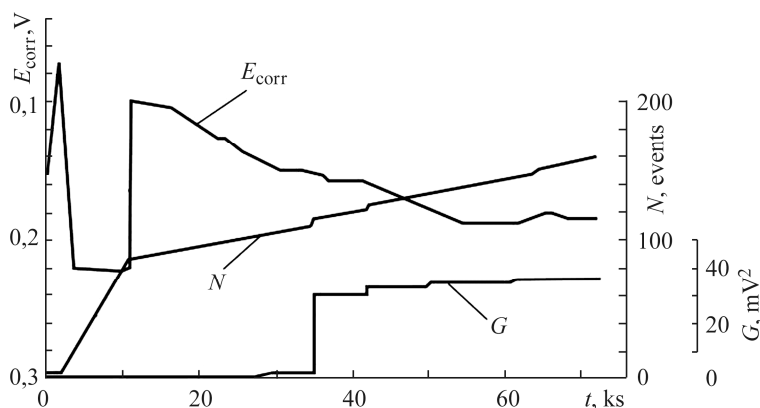


Рис. 1. Зміна потенціалу зразка E_{corr} , сумарного рахунку N подій та енергії G АЕ під час щілинної корозії зразка з неіржавної сталі марки 304 у 3%-му розчині NaCl при 308 К, КІН $K_I = 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [11].

Fig. 1. Change of the sample potential E_{corr} , total count events N and energy G AE during crevice corrosion of the 304 stainless steel grade sample in 3% NaCl solution at a temperature of 308 K, SIF $K_I = 15.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [11].

Після індукування щілинної корозії за допомогою поляризаційного скану потенціал зразка (E_{corr}) залишався приблизно $-0,22 \text{ V}$ і водень виділявся декілька годин. Проте він різко зростав до $-0,10 \text{ V}$ до кінця цього проміжку, а потім поступово зменшувався. Припускають, що різкий приріст E_{corr} відповідає періоду, коли іони водню поглинаються під час завершення катодної реакції всередині щілини. Градієнт кривої сумарного рахунку подій АЕ суттєво змінюється, коли потенціал E_{corr} зростає, однак, залишається сталим, коли він повільно зменшується. При цьому сумарна енергія АЕ суттєво збільшується у проміжку приблизно 35 ks. Під час експерименту спостерігали високоамплітудну емісію (в межах мілівольт). Значну кількість енергії АЕ виявили посередині вимірюваної зони, зокрема, у вершині тріщини. Тому зробили висновок, що високоамплітудна АЕ стала причиною раптового приросту енергії АЕ впродовж 35 ks і що тріщина КР виникла саме тоді.

Автори праці [12] вивчали КР низько- і високоміцних сталей, а також характеристики АЕ під час цього процесу за швидкістю рахунку АЕ, формою кривої і типами хвиль (поздовжня або зсувна). Виявили, що руйнування під час активної корозії можна відрізнити від ВО, досліджуючи характеристики АЕ саме так.

Автори праці [13] встановили, що зразки зі сталі D6aC, до яких прикладали напруження за допомогою шурупів з посадкою натягом, створювали сигнали АЕ зі швидкістю рахунку, безпосередньо пов'язаною з їхнім напруженим станом і з кількістю поглинутого перед цим водню. Після додавання води до напруженого, але ненаводненого зразка форма сигналів АЕ була така ж, як і під час випробувань наводнених зразків. Тому зробили висновок про їх ініціювання КР. Отже, методом АЕ-моніторингу можна вивчати заповільнене розтріскування, оскільки він високочутливий і здатний забезпечувати оперативні показники росту тріщини.

Для АЕ-дослідження КР аустенітної неіржавної сталі AISI304 [4] зразки завтовшки 1 mm занурювали в 3%-й NaCl з рН 2. Для пришвидшення корозії використовували потенціостат. Параметри АЕ визначали приладом LOCAN 320 з пороговим значенням амплітуди 45 dB. Виявили точні місця появи корозії всередині зразка. Великий об'єм АЕ-даних свідчить про близьку до лінійної залежність між сумарним рахунком і амплітудою. Імпульси АЕ від КР спочатку були високі, а далі експоненціально зменшувались з часом.

АЕ, пов'язану з КР сталей 817M40, 897M39 і AISI 4340 у 3%-му розчині NaCl і в газоподібному водні за тиску 0,025...0,1 МПа, описано у праці [13]. Встановили, що АЕ інтенсивніша за інтеркристалітного розтріскування проти транскристалітного. Зі збільшенням розміру зерен її рівень також суттєво підвищився, а середовище суттєво вплинуло на траєкторію поширення тріщини. Ці типи емісії виявились надзвичайно чутливими до ініціювання і росту тріщини та в багатьох випадках детектували ініціювання раніше, ніж прилади, якими вимірювали електричний опір.

У деяких дослідженнях активність АЕ визначали на різних стадіях КР під напруженням: вона була найвища якраз поза границею плинності аж до остаточного руйнування матеріалу [14]. Її активність під час поширення корозійних тріщин крізь кристалічні зерна зазвичай на один порядок вища, ніж під час їх руху вздовж меж зерен кристала [15]. З іншого боку, середні значення амплітуди і часу наростання сигналів АЕ, зареєстрованих в обох випадках, виявились подібними [16]. У працях [17, 18] також вказували, що еволюцію активності АЕ можна пов'язати з ініціацією тріщини, її поширенням і кінцевим руйнуванням [17].

У праці [19] зразки сенсibilізованої неіржавної сталі AISI 304 піддавали постійному навантаженню і впливу водного розчину тіосульфату натрію. Міжкристалітне КР контролювали одночасно методами електрохімічного шуму та АЕ. Виявили, що електрохімічний шум пов'язаний з поширенням тріщин на ранніх стадіях, тоді як АЕ – зі завершальною стадією перелому. Розвиток тріщини фіксували у всіх вимірюваннях, хоча активність АЕ виникала тільки тоді, коли тріщина була досить великою. Водночас спалахи АЕ вказують на переривчастий характер контрольованих міжкристалітних процесів КР. Результати узгоджуються з припущенням про те, що сплески АЕ під час такого КР викликані розривами перешийків між тріщинами.

У праці [20] аналізували сигнали АЕ, щоб визначити мікропроцес під час КР під напруженням неіржавної сталі AISI типу 316LN в 45%-му $MgCl_2$ при 413 К, яке викликає АЕ. Фіксували сигнали АЕ з амплітудами від 27,6 до 46,5 dB з різними значеннями енергій і часу наростання під час КР. Аналіз сигналів АЕ в поєднанні з фрактографією засвідчив, що сплеск сумарного рахунку АЕ і її енергія вказують на початок КР. Виявили, що АЕ неперервна до початку КР. Часовий проміжок між подіями АЕ збільшувався під час ініціації і додатково – з ростом тріщини. Тріщини зароджувались і поширювались за транскристалітним механізмом.

У праці [21] для детектування і підрахунку АЕ, яка випромінювалась під час КР сталі типу 4340, спричиненого ВО, використали серійну АЕ-систему. Стандартні зразки з короткими надрізами готували за чотирьох температур відпуску:

477; 589; 700 і 811 К. Довжину тріщини контролювали відповідним первинним перетворювачем. Порівнюючи отримані результати, встановили залежність швидкості подій АЕ від КІН згідно зі швидкістю росту тріщини, але АЕ виникала при цьому набагато раніше.

У праці [22] для визначення швидкості КР сталі типу 4340 під час ВО використовували метод АЕ, що дало можливість прогнозувати руйнування в певних конструкційних вузлах. Квазістатично навантажували зразки стандартних розмірів. Перед цим їх електролітично наводнювали, покривали кадмієм і витримували 3 h при 423 К, а потім виводили втмну тріщину. Нахили кривих сумарного рахунку АЕ вимірювали для декількох значень КІН K_I . Встановили, що значення $K_{I0} = 6,37 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ є пороговим для КІН, нижче якого розтріскування не відбувалось. Тому припускали, що безперервний АЕ-моніторинг деяких конструкцій з підростальною тріщиною ВО дасть можливість прогнозувати наближення макроруйнування. Однак найважливішим висновком тут є те, що незалежно від початкового навантаження, часу ініціювання розтріскування або будь-яких інших чинників, пов'язаних з геометричними відмінностями зразків, за інтенсивністю АЕ можна визначити час досягнення КІН такого значення, коли настає швидке руйнування.

Автори праці [23] досліджували ВО сталі типу 4340, щоб встановити механізм джерела неперервної АЕ, яка генерується у високоміцних сталях. Встановили, що сумарний рахунок її подій пропорційний кількості мікроскопічних інтеркристалітних розтріскувань, які виявляли на поверхні тріщини сканівним електронним мікроскопом, і що сумарна енергія АЕ пропорційна площі нової тріщини, розвиток якої спричинила інтеркристалітна тріщина. Отже, домінуючим джерелом АЕ тут є індивідуальне інтеркристалітне розтріскування, що індукується воднем.

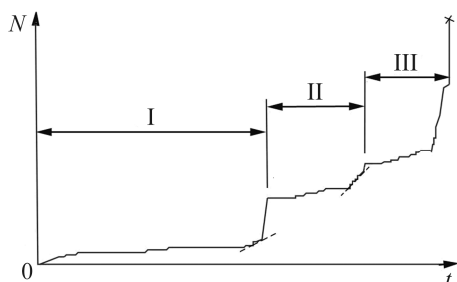


Рис. 2. Діаграма росту субкритичних корозійних тріщин: I – первинна інкубаційна зона (повільне наростання подій АЕ); II – вторинна (повільне наростання подій АЕ); III – стадія закритичного розвитку [24].

Fig. 2. Diagram of subcritical crack corrosion growth: I – initial incubation zone (slow growth of AE events); II – secondary (slow growth of AE events); III – super-critical phase of development [24].

Час первинної інкубації тут визначали від початку витримки до першого швидкозростального нахилу (стрибка) на кривій сумарного рахунку АЕ з часом, а вторинної – як середній між наступними такими стрибками після первинної інкубації. Характер зміни сумарного рахунку сигналів АЕ при 294 К проти 347 К вказує на поступово зростаючий нахил кривої до останнього моменту перед руйнуванням, а різка його зміна свідчить про стрибок тріщини.

Досліджено [26] кінетику росту тріщини під час КР сталі 38ХНЗМФА. Призматичні зразки розмірами $10 \times 20 \times 120 \text{ mm}^3$ навантажували триточковим згином за кімнатної температури у 3%-му розчині NaCl у робочій камері, а на боковій по-

Інші дослідники [24, 25] проаналізували АЕ під час субкритичного розтріскування неіржавної сталі з 18% нікелю впродовж двох нагрівань до 523 К, яку заздалегідь піддавали впливу циркулюючої води при 294 та 347 К. Для тестів на субкритичне розтріскування використовували зразки з виведеними втмними тріщинами. Побудували (рис. 2) схему стрибкоподібного розвитку тріщини під час цього процесу за часовою зміною сумарного рахунку АЕ під постійним навантаженням.

Час первинної інкубації тут визначали від початку витримки до першого швидкозростального нахилу (стрибка) на кривій сумарного рахунку АЕ з часом, а вторинної – як середній між наступними такими стрибками після первинної інкубації. Характер зміни су-

верхні поза камерою розташовували первинний перетворювач АЕ (ПАЕ). За формою і тривалістю сигналів АЕ спостерігали осцилографічно. З початком навантаження безперервно, синхронно з руйнуванням зразка, записували акустограми сигналів АЕ. Будували часову залежність швидкості їх рахунку \dot{N} та довжини тріщини від значень КІН K_I , а також залежність зміни \dot{N} від швидкості росту корозійної тріщини (рис. 3).

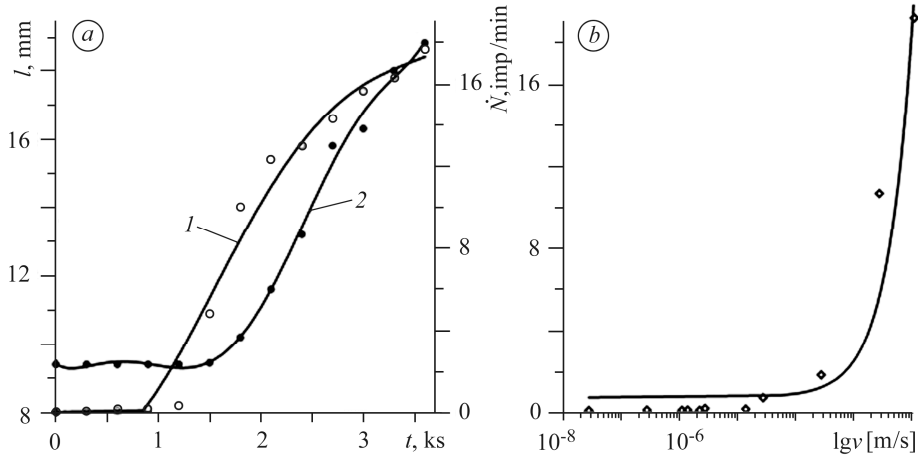


Рис. 3. Часові залежності зміни швидкості рахунку \dot{N} сигналів АЕ (крива 1), приросту довжини тріщини l (крива 2) (а) та залежність зміни швидкості рахунку \dot{N} від швидкості росту тріщини v (b) у сталі 38ХНЗМФА.

Fig. 3. Time dependences of changes of the counting rate \dot{N} AE signals (curve 1), crack length l increment (curve 2) (a) and change of the counting rate \dot{N} on crack growth speed v (b) in 38ХНЗМФА steel.

Встановили, що за $K_I = 16,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ і початкової швидкості $v = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ сигнали АЕ вже перевищують фоновий рівень завад і реєструються зі швидкістю рахунку $\dot{N} = 2 \dots 3 \text{ imp/min}$. Вони суттєво збільшують свою амплітуду приблизно через $0,72 \dots 0,9 \text{ ks}$ від початку випробувань, коли швидкість росту тріщини приблизно $(1,4 \dots 1,8) \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Подальше підвищення швидкості росту тріщини призводить до зростання параметра \dot{N} .

Запропоновано [27] поліпшену експрес-методику АЕ-оцінки нижнього порогового значення статичної тріщиностійкості конструкційних сталей $K_{I\text{SCC}}$, за якою вдається виявити приховані стадії КР, які не фіксують традиційні методи.

Корозійне розтріскування кольорових металів. Алюмінієві та магнієві сплави. У праці [28] досліджували КР алюмінійцинкмагнієвого (Al-Zn-Mg) сплаву (з відношенням цинк/магній близько 0,5) з високою чутливістю до розтріскування. Зразки деформували згинанням у рамі з текстоліту, яку наполовину занурювали в 0,5 М розчині NaCl з додаванням пероксиду водню (H_2O_2) і азотної кислоти (HNO_3) для інтенсифікації розтріскування. Встановили, що через 20 min після появи сигналів АЕ тріщина виходить на поверхню зразка. З її підростанням характер АЕ зберігався, проте потім емісія поступово зменшувалась і припинилась у момент, коли зупинилась тріщина. У всіх випадках можна було зафіксувати момент появи тріщини за АЕ раніше, ніж за прямого спостереження. АЕ підвищувалась з ростом тріщини і тривала короткий проміжок часу, за якого тріщина здійснює елементарний стрибок.

Метод АЕ використовували також для виявлення зародження корозійної тріщини під час КР сплаву Al–Zn–Mg, який витримували під навантаженням за температури 423 К упродовж різних часових інтервалів [13]. Випробовували в 1 М розчині NaCl з реєстрацією сумарного рахунку подій АЕ, видовження зразка і зміни анодного і катодного струмів корозії. Виявили, що АЕ може детектувати ініціювання тріщини дуже точно і швидко.

У працях [29, 30] досліджували поширення транскристалітних тріщин під час КР сплаву Mg–7,5Al за кімнатної температури у водному розчині NaCl і хромату калію (K₂CrO₄). Дискретна АЕ випромінювалась під час докритичного росту тріщини. Автори припускають, що ці випромінювання є результатом дискретного її підростання. Аналіз зразків, які зазнавали корозії, виявив абсорбцію водню, тому, без сумніву, зворотне окрихчення в занурених зразках є результатом його впливу. Отже, можна стверджувати, що розтріскування пов'язане з повторними циклами дифузії водню в зону перед вершиною тріщини (повільний процес) з подальшим перетинанням цієї зони, збагаченої воднем (пришвидшений процес).

Активність АЕ, пов'язану з розтріскуванням у різноманітних системах КР та ВО алюмінієвих і магнієвих сплавів, бронзи і м'якої сталі, вивчали у праці [31]. Виявили, що різні системи КР і ВО можна зіставляти за допомогою одного і того ж обладнання АЕ і що сумарний рахунок АЕ задовільно описує їх відносну акустичну активність. Оскільки швидкість рахунку АЕ в цій системі суттєво залежить від швидкості росту тріщини, зробили висновок, що цей підхід надає необхідну інформацію для оцінки придатності емісії для контролю росту тріщин у подібних умовах.

Корозійне розтріскування міді та її сплавів. У праці [32] експериментально досліджували транскристалітне КР чистої міді в 0,05 М розчині NH₄OH при 343 К. Встановили момент руйнування плівки, яке відбувалося з регулярними інтервалами, за зміною потенціалу корозії і струму після 23 h поляризації за насиченого каломельного електрода –50 mV і за параметрами сигналів АЕ, які спостерігали за постійної швидкості розвитку КР. Детектовану АЕ приписували крихкому руйнуванню плівки, зіставляючи результати АЕ і зміни потенціалу або струму корозії. Дійшли висновку, що описаний результат і та обставина, що поверхня руйнування вся покрита товстою чорною плівкою навіть у вершині поширеної тріщини, свідчать про відповідність механізму КР моделі крихкого руйнування плівки.

Розвиток транскристалітного КР у сплаві Cu–30Zn методом АЕ вивчали у праці [33]. Для цього зразки згинали з постійною деформацією в розчині 15n, і при цьому реєстрували АЕ. Сканівним електронним мікроскопом фіксували точки зупинки КР на поверхнях руйнування за певних умов. Це вказувало на дискретність випромінювання АЕ, яку розглядали як наслідок підростання тріщин. Отже, транскристалітне КР в цій системі відбувається шляхом неперервного розгалужування тріщини на площинах (110), тому модель окрихчення (це може бути і тип ВО) у цьому випадку придатна для технічного діагностування.

Корозійне розтріскування уранових сплавів. Автор праці [34] контролював КР уранового сплаву U–4,5Nb, вимірюючи розкриття тріщини методом АЕ в сухому лабораторному повітрі. При цьому деякі тести виконував в атмосфері кисню і водяної пари. Добру кореляцію отримав між значеннями швидкості КР і рахунку АЕ для всіх КІН. Виявив, що зі збільшенням швидкості розтріскування кількість імпульсів на одиницю площі новоутвореної поверхні тріщини зростає, що свідчить про доцільність АЕ для тестування КР.

Аналогічні дослідження виконали у праці [35]. Корозивним середовищем тут слугувала насичена киснем вода з іонами хлориду. Результати АЕ-контролю

КР сплаву засвідчили про прямий взаємозв'язок між швидкістю корозії (за втраченою вагою) і сумарним рахунком АЕ.

Автори праці [36] встановили, що АЕ, яка супроводжує КР у відкритому повітрі, за температури навколишнього середовища для сплаву U-10Mo пов'язана з пластичністю і мікророзтріскуванням, які супроводжували макророзтріскування. АЕ дещо зростала під час випробувань, але не вказувала на залежність напруження-інтенсивність АЕ, як результати, отримані у праці [34].

Корозійне розтріскування титанових і цирконієвих сплавів. Автори праць [37, 38] вивчали КР сплавів Ti-6Al-4V після різної термічної обробки в розчині 0,5% (CH₃OH)+0,5I₂. Вимірювали розкриття вершини тріщини і АЕ. Зразки товщиною 0,7 mm зі заздалегідь виведеною втомною тріщиною випробовували за постійних навантажень. Виявили, що джерелом АЕ тут є ріст тріщини, а також задовільну кореляцію між швидкістю її росту і швидкістю рахунку АЕ, які добре корелюють із КІН. Детальні спостереження за мікроструктурою вздовж траєкторії розтріскування і аналіз дискретної АЕ, яку реєстрували під час росту тріщини, засвідчили, що розтріскування відбувалось стрибкоподібно: на декілька діаметрів α -зерен для невеликих стрибків і на діаметр зерна в β -фазі – для великих. Дійшли висновку, що метод АЕ може стати потужним інструментом для контролю КР титанових сплавів.

За допомогою метало- та фрактографічних методів, а також АЕ виявили [39], що сплав Ti-8Al-1Mo-1V у розчині NaCl і в газоподібному водні руйнується площинами (101) впоперек α -пластин. В обох випадках гідрид титану фіксували на поверхнях тріщини, а її ріст, за результатами АЕ досліджень, мав дискретний характер. Тому припустили, що руйнування відбувається згідно з моделлю гідридного руйнування, яку вперше запропонували у праці [40], тобто протікає за багатократного утворення і руйнування гідридної фази.

У праці [41] зіставили сигнали АЕ під час КР цирконієвих сплавів з метало- і фрактографічними результатами для подій, які відбуваються на різних етапах розтріскування. Самонапружені двоконсольні зразки і відрізки довжиною 12,7 mm стандартної труби з покривом тестували в розчинах метанол-1% гідрохлористої кислоти, метанол-1% йодину і в 5%-му NaCl за кімнатної температури, а також в суміші азотно-йодистої солі при 573 K. АЕ контролювали диференційним лічильником, який встановлювали безпосередньо на двоконсольному зразку або на захопі зразка з розрізаним кільцем для випробувань за кімнатної температури. За підвищеної температури (573 K) стрижень довжиною 125 mm \varnothing 3,2 mm з цирконію вкручували в торець двоконсольного зразка поряд з гвинтами навантаження, а лічильник встановлювали на контактній площадці на торці цього стрижня, який за необхідності охолоджували повітряним потоком. Виділили два типи АЕ – неперервну і дискретну. Проте пояснити кожний феномен було важко. Тому припустили, що неперервний тип спричинений або електрохімічним розчиненням, або генеруванням рухомих дислокацій, тоді як дискретний, можливо, є результатом або розповсюдження крихкої тріщини, двійникування гексагонального металу або розтріскування захисного оксиду (за підвищених температур).

Промисловий АЕ-контроль корозійних пошкоджень. Сьогодні дуже важливо забезпечити надійну експлуатацію та ефективну роботу складних технічних систем і устаткування. Особливо, коли в них з'являються корозійні дефекти. Для цього необхідно вдосконалити систему діагностичного контролю таких об'єктів. Як засвідчує практика [42–50], тут найефективніший метод АЕ. Нижче наведено деякі випадки його застосування.

Контроль КР у доменних печах. Методом АЕ досліджували КР конструкційної сталі, яку використовують для склепіння доменних печей [13]. Спочатку,

щоб в'яснити доцільність його застосування, створили матрицю з 32 первинних перетворювачів АЕ, які розміщували по всій площині склепіння, за винятком верхньої форсунки і нижніх ділянок зварних з'єднань. Для тарування чутливості вимірювальних АЕ-каналів використовували джерела дискретних пакетів пружних хвиль, генерованих стрибкоподібним підростанням тріщин. Система АЕ-контролю призначена для роботи в неперервному режимі, принаймні впродовж терміну служби доменної печі (вісім років), і встановлена на чотирьох печах на заводі Реткар, Великобританія.

Виявили, що КР дає порівняно велику кількість АЕ-імпульсів великої амплітуди, за якими можна визначити початок руйнування під час експлуатації навіть за дуже високого рівня фонового шуму.

Контроль КР абсорбційної башти. Абсорбційну башту заввишки 50 м, виготовлену з вуглецевої сталі марки А-212-В, обстежували АЕ-методом під час контрольного опресування після ремонту [51]. Шість вимірювальних комплексів з чотирма перетворювачами в кожному закріпили на поверхні башти магнетними фіксаторами. Башту вивели з експлуатації для ремонту низки ділянок, які піддавалися ВО. Після завершення ремонту, що охоплював заміну кількох сопел, башту випробовували пневматичним тиском і контролювали за пробного робочого пуску. Відсутність АЕ-сигналів від відремонтованих ділянок засвідчила високу якість ремонту. Однак емісію виявили поблизу склепіння башти (яке, як і передбачали, не піддавалося ВО), причому акустична активність цих ділянок проявилася як під час опресування, так і під час пуску. З урахуванням можливості подальшого розвитку ВО перетворювачі, попередні підсилювачі і кабелі системи АЕ-контролю залишили на башті для подальших досліджень. Під час експлуатації виявили дві ділянки з високою інтенсивністю АЕ. Перша знаходилася поблизу склепіння башти і була активною під час контрольного опресування і пробного пуску. Другу зафіксували в середній частині башти, яка і раніше не виявляла акустичної активності. Хоча УЗ-дефектоскопія оболонки корпусу на обох ділянках не виявила дефектів, башту тимчасово вивели з експлуатації для огляду через високу інтенсивність АЕ на цих ділянках, а також з технологічних причин.

Оглядом встановили, що піддон башти практично повністю прокородував якраз там, де зафіксували АЕ. Крім того, вгорі башти, де знаходилося друге інтенсивне АЕ-джерело, виявили дефекти в тарілках, які спричинили порушення технологічного процесу і різке підвищення швидкості протікання газу через абсорбер. Після заміни зруйнованого корозією піддона і усунення дефектів у тарілках технологічний процес відбувався без порушень і джерела АЕ зникли.

АЕ-діагностування трубопроводів теплових мереж. Діагностуючи методом АЕ теплопроводи підземного прокладання, на внутрішній їх поверхні зафіксували низку ділянок, пошкоджених локальною корозією [52, 53]. До розкриття рекомендували ділянки трубопроводу, значення інтегральних показників акустико-емісійного пошкодження (АЕП) яких у перерахунку на довжину в 40 м (АЕП/(L/40)) було максимальне і становило не менше $1 \cdot 10^5$ (dB·μs). Розміри АЕП, які рекомендовані до обстеження, такі: для Т1 – від $3,7 \cdot 10^6$ до $31,5 \cdot 10^6$; для Т2 – від $0,1 \cdot 10^6$ до $1,0 \cdot 10^6$; для Т3 – від $0,7 \cdot 10^6$ до $1,14 \cdot 10^6$; для Т4 – від $0,2 \cdot 10^5$ до $0,8 \cdot 10^6$ (Т1, Т2, Т3, Т4 – тривалість сигналів з перетворювачів). Розмір зони корозійного пошкодження (суцільна, плямиста корозія) досліджених зразків від 0,5 до 3 мм. Під час технічного діагностування трубопроводів теплових мереж (~3 км у двотрубному виконанні) за результатами АЕ-контролю виявили вісім таких зон (ділянки з глибиною корозії до 4 мм) [53].

У праці [54] виконали натурні АЕ дослідження локалізації корозійних дефектів на ділянці чинного трубопроводу тепломережі зі сталі Ст20, який мав такі

параметри: \varnothing 500 mm, товщина стінки труби 10 mm, робочий тиск 0,6 МПа. Термін експлуатації ділянки на момент дослідження 28 років. Застосовували АЕ систему Samos-24 згідно з методикою ПБ 03-593-03 [55]. Використовували ПАЕ ДР6І, які розташовували послідовно зверху на поверхні трубопроводу. Середня відстань між ними 60 m. Загальний коефіцієнт підсилення 40 dB за рівня відсікання шумів 25...30 dB. Навантажували трубопровід від 0,4 до 0,8 МПа з проміжною витримкою на позначці 0,6 МПа. Впродовж усього циклу навантаження, на підйомах і витягах, з'являлися джерела небезпеки класу II, згідно з ПБ 03-593-03 [55]. Місце джерел АЕ встановлювали згідно зі схемою локації між першим, другим і третім ПАЕ, виявили ділянки з виразковою корозією металу глибиною до 2,5 mm.

Встановили, що під час виразкової корозії генеруються сигнали АЕ з амплітудою не більше 47 dB і тривалістю від 20 до 6500 μ s (рис. 4). Амплітудний розподіл мав два максимуми в області малих і середніх амплітуд. Така поведінка пов'язана, очевидно, з розвитком корозійних дефектів.

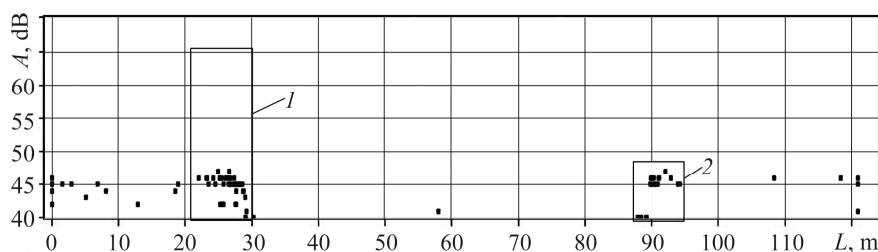


Рис. 4. Діаграма зміни амплітуди A сигналів АЕ: 1 – зона джерела 1; 2 – зона джерела 2.

Fig. 4. Changes of AE signal amplitudes A : 1 – zone of sources 1; 2 – zone of sources 2.

АЕ-контролем виявили корозійні пошкодження [56] підземних ділянок технологічних нафтопроводів на нафтопомпувальних станціях. Дослідження виконували за чинним внутрішнім регламентом у робочому режимі без виведення об'єкта з експлуатації, використовуючи АЕ-систему A-Line фірми "ІНТЕРІОНІС". Довжина діагностованої ділянки за один цикл вимірювання 24-канальною системою становила 2 km. Гранично допустима відстань між перетворювачами АЕ під час діагностики трубопроводу не перевищувала 60 m. Під час АЕ-контролю на основному металі труби виявили витік і локалізовані інтенсивні осередки корозійного пошкодження (виразкові, пітингові). За результатами локальних методів неруйнівного контролю (НК) з визначення параметрів виявлених дефектів (розкриття пітингів менше 2 mm, глибина проникнення – близько 80...90% від товщини стінки труби) зробили висновок, що витік нафти відбувся саме з корозійного пітинга.

Виявили [57], що акустичне випромінювання під час корозійного руйнування трубопроводу найефективніше проявляється на статичних ділянках за експлуатаційного тиску і вище. Таким чином, АЕ-діагностування розвитку корозійних дефектів доцільне в режимі безперервного контролю за поточної експлуатації трубопроводу.

У працях [58–63] описано також застосування методу АЕ для виявлення корозійних пошкоджень низки промислових об'єктів: плоскодонних резервуарів, танкерів, ємностей високого тиску, труб і опор трубопроводів. Зокрема, для моніторингу танкера АЕ-перетворювачі встановили у його відсіках для водяного баласту [63]. Виявили активну АЕ з амплітудою до 65 dB приблизно від 1,5 до 2,5 m нижче встановленого перетворювача. Таким чином, два перетворювачі перемістили з верхньої ділянки в ділянку знайденої активності АЕ. В результаті

АЕ-обстежень зафіксували продукти корозії на ділянці завдовжки близько 0,23 м і максимальної глибини 2,7 мм (рис. 5), які видалили.

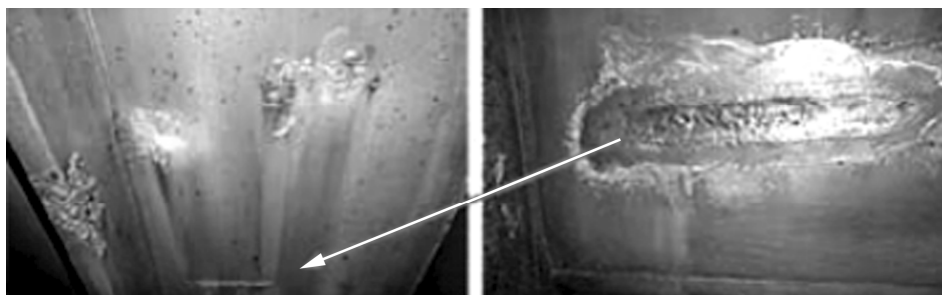


Рис. 5. Продукти корозії в танкері для водяного баласту.

Fig. 5. Products of corrosion in ballast water tankers.

За результатами АЕ-контролю [58] зафіксували сильну корозію під ізоляцією під час герметизації ємності високого тиску. Ці ж автори виконали АЕ-діагностування труби та опор трубопроводів з підвищенням тиску. АЕ виникала головню внаслідок корозії і/або розтріскування продуктів корозії. За зростання тиску від 13 до 24 bar коефіцієнт оцінки кластерів мав постійне максимальне значення. Значення відкорегованих амплітуд знаходилися в невеликому діапазоні (50 і 65 dB), але за тиску вище 21 bar зростали приблизно до 70 dB. Частота подій майже не змінювалась (18 до 25 bar). Продукти корозії між трубою і трубними опорами видалили.

Відоме застосування АЕ для контролю КР реакторів каталітичного крекінгу та гідрокрекінгу [51]. Оскільки середовище в киплячому реакторі досить шумне, виділити достовірні сигнали АЕ з фонового шуму важливіше під час АЕ-контролю інтеркристалітного КР. Відомо, що рівень шумової емісії на виході первинного перетворювача під час нормальної роботи киплячого реактора становить декілька сотень мікрвольт [13], проте пікові амплітуди сигналів АЕ інколи сягають мілівольта під час зупинки або пуску реактора (в результаті механічних вібрацій, ударів, тертя, гідравлічного потоку, кавітації тощо).

Отже, методом АЕ можна вивчати локальну корозію двома шляхами. Перший полягає у фундаментальному дослідженні процесу з аналізом механізму. Він добре проявив себе в лабораторних дослідженнях КР сталей і сплавів. Другий полягає в детектуванні і неперервному контролі локальної корозії під час експлуатації на інженерних конструкціях. Аналіз АЕ в поєднанні з тестуванням успішно використовують для оцінювання стану ємностей високого тиску, трубопроводів та інших елементів конструкцій. Оскільки метод АЕ є унікальним для виявлення часу і місця локальної корозії, то придатний для детектування і моніторингу цього процесу у цих випадках.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы результаты исследований акустико-эмиссионного (АЭ) диагностирования коррозионных повреждений материалов. Установлена взаимосвязь между суммарным счетом, энергией, амплитудой акустического излучения и коррозионным растрескиванием сталей и металлических сплавов. Приведены примеры применения метода АЭ для выявления коррозионных повреждений ряда промышленных объектов.

SUMMARY. The results of acoustic-emission (AE) diagnostics of corrosion damage of materials have been analyzed. The relationship between the total count, energy, amplitude of acoustic radiation and corrosion cracking of steels and metal alloys was established. Examples of applying the AE method to detect corrosion damage of a number of specific industrial facilities have been considered.

1. *Mazille H. and Rothea R.* The use of acoustic emission for the study and monitoring of localized corrosion phenomena // *Modelling aqueous corrosion*. – Kluwer Academic Publishers, 1994. – P. 103–127.
2. *Acoustic emission monitoring of stress corrosion cracking / W. W. Gerberich, R. H. Jones, M. A. Friesel, and N. Nozue* // *Mat. Sci. and Eng.* – 1988. – **103**. – P. 185–191.
3. *Cowking R. and Carswell A.* An acoustic emission study of stress corrosion cracking in GFRP: 40519 Hill // *NDT&E Int.* – 1997. – **30**, № 2. – P. 59–68.
4. *Jomdecha C., Prateepasen 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.
5. *Jones R. H., Friesel M. A., and Pathania R.* Evaluation of stress corrosion cracking initiation using acoustic emission // *Corr.* – 1991. – **47**. – P. 105–115.
6. *Alvarez M.G., Lapitz P., and Ruzzante J.* Analysis of acoustic emission signals generated from SCC propagation // *Corr. Sci.* – 2012. – **55**. – P. 5–9.
7. *Okada H., Yukawa K., and Tamura H.* Application of acoustic emission technique to study of stress corrosion cracking in distinguishing between active path corrosion and hydrogen embrittlement // *Corr.* – 1974. – **30**. – P. 253–265.
8. *Brihmadessam J. S. and McCormic N. J.* Acoustic emission analysis of stress corrosion cracking in type 304 stainless steels // *Nuclear Techn.* – 1976. – **29**, № 1. – P. 127–135.
9. *Yuyama S., Kishi T., and Hisamatsu Y.* AE analysis during corrosion, stress corrosion cracking and corrosion fatigue processes // *J. Acoustic Emission*. – 1983. – **2**, № 1/2. – P. 71–93.
10. *AE analysis during corrosion, stress corrosion cracking, and corrosion fatigue processes on type 304 stainless steel / S. Yuyama, Y. Hisamatsu, T. Kishi, and H. Nakasa* // *The 5th Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1980. – P. 115–124.
11. *Yuyama S., Kishi T., and Hisamatsu Y.* Detection and analysis of crevice corrosion-SCC process by the use of AE technique // *J. of the Iron and Steel Institute of Japan*. – 1982. – **64**, № 14. – P. 2019–2028.
12. *Monden Y., Murata T., and Nagumo M.* Acoustic emission characteristics in stress corrosion cracking // *Proc. 4th Int. Acoustic Emission Symp.* – Tokyo, 1978. – **6**. – P. 1–19.
13. *Yuyama S.* Fundamental aspects of acoustic emission applications to the problems caused by corrosion / Eds.: G. C. Moran, P. Labine // *Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods: ASTM STP 908*. – Philadelphia, 1986. – P. 43–74.
14. *Nieuwenhove R. Van and Bosch R.-W.* Acoustic emission detection during stress corrosion cracking at elevated pressure and temperature // *J. Acoust. Emission*. – 2000. – **18**. – P. 293–299.
15. *Lapitz P., Ruzzante J., and Alvarez M. G.* AE response of a-brass during stress corrosion crack propagation // *Corr. Sci.* – 2007. – **49**. – P. 3312–3325.
16. *Alvarez M. G., Lapitz P., and Ruzzante J.* AE response of type 304 stainless steel during stress corrosion crack propagation // *Corr. Sci.* – 2008. – **50**. – P. 3382–3388.
17. *Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique / S. Ramadan, L. Gaillet, C. Tessier, and H. Idrissi* // *Appl. Surf. Sci.* – 2008. – **254**. – P. 2255–2261.
18. *Assessment of the stress corrosion cracking in a chloride medium of cables used in prestressed concrete structures by the acoustic emission technique / S. Ramadan, L. Gaillet, C. Tessier, and H. Idrissi* // *Meas. Sci. Techn.* – 2008. – **19**. – P. 115–202.
19. *Correlation of electrochemical noise, acoustic emission and complementary monitoring techniques during intergranular stress-corrosion cracking of austenitic stainless steel / J. Kovaca, C. Alauxb, T. James Marrowb, E. Govekarc, and A. Legata* // *Corr. Sci.* – 2010. – **52**, № 6 – P. 2015–2025.
20. *Evaluation of stress corrosion cracking phenomenon in an AISI type 316LN stainless steel using acoustic emission technique / H. Shaikh, R. Amirthalingam, T. Anita, N. Sivaibharasi, T. Jaykumar, P. Manohar, and H. S. Khatak* // *Corr. Sci.* – 2007. – **49**, № 2. – P. 740–765.
21. *Chaskelis H. H., Cullen W. H., and Kraft J. M.* Acoustic emission from 4340 steel during stress corrosion cracking // *Fracture Toughness and Slow-Stable Cracking: ASTM STP 559*. – Philadelphia, 1974. – P. 31.
22. *Dunegan H. L. and Tetelman A. S.* Non-destructive characterization of hydrogen-embrittlement cracking by acoustic emission techniques // *Eng. Fract. Mech.* – 1971. – **2**. – P. 387–402.
23. *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.

24. *Use of AE for the detection of weld and stress corrosion cracking* / C. E. Hartbower, W. G. Reuter, C. F. Marais, and P. P. Crimins // *Acoustic Emission: ASTM STP 505*. – Philadelphia, 1972. – P. 187–221.
25. *Reuter W. G. and Hartbower C. E. Stress corrosion cracking in an air-melted and vacuum-arc-remelted grade-250 maraging steel* // *Eng. Fract. Mech.* – 1971. – **3**, № 4. – P. 493–510.
26. *Скальський В. Р., Селівончик Т. В. Акустико-емісійна оцінка корозійного розтріскування конструкційної сталі* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип.* – 2006. – **2**, № 5. – С. 768–771.
27. *Патент України № 82808. МПК(2006): G01N29/14. Спосіб експрес-оцінки водневої та корозійної тріщиностійкості матеріалів* / В. Р. Скальський, З. Т. Назарчук, О. С. Андрейків, Т. В. Селівончик. – Опубл. 12.05.2008; Бюл. № 9.
28. *Бакулин А. В., Малишев В. Н. Акустическая эмиссия в процессе расслаивающей коррозии алюминиевых сплавов* // *Защита металлов*. – 1978. – **14**, № 2. – С. 197–201.
29. *Chakrapani D. G. and Pugh E. N. The transgranular SCC of Mg–Al alloy: crystallographic, fractographic and acoustic-emission studies* // *Metallurgical Transact.* – 1975. – **6A**. – P. 1155–1163.
30. *Chakrapani D. G. and Pugh E. N. Hydrogen embrittlement in a Mg–Al alloy* // *Metallurgical Transact.* – 1976. – **7A**. – P. 173–178.
31. *Pollock W. J., Hardiet D., and Holroyd N. J. H. Monitoring sub-critical crack growth due to stress corrosion or hydrogen embrittlement by acoustic emission* // *British Corr. J.* – 1982. – **17**, № 3. – P. 103–111.
32. *Suzuki Y., Tsujikawa S., and Hisamatsu J. Studies on the mechanism of stress corrosion cracking of pure copper by using acoustic emission technique* // *Boshoku Gijitsu (Corr. Eng.)*. – 1976. – **25**. – P. 155.
33. *Beavers J. A. and Pugh E. N. The propagation of transgranular stress-corrosion cracks in admiralty metal* // *Metallurgical Transact. A.* – 1980. – **11**, № 5. – P. 809–820.
34. *Magnani N. J. Acoustic emission and stress-corrosion cracking of U-4 1/2 wt% Nb* // *Experimental Mech.* – 1973. – **13**, № 12. – P. 526–530.
35. *Mah R., Kochen R. L., and Macki M. Corrosion-induced acoustic emissions from uranium 4.5 weight percent niobium binary alloy* // *ROCKWELL INT.* – 1975. – 10 p.
36. *Bedere D. and Miannay D. Analyse de l'émission acoustique produite au cours de la fissuration de corrosion sous contrainte de l'alliage U-Mo a 10% Mo en poids* // *J. of Nuclear Mat.* – 1973. – **48**, № 2. – P. 183–192.
37. *SCC characteristics of Ti–6 Al–4V alloy and analysis of cracking process by visual observations and AE technique* / S. Yuyama, Y. Hisamatsu, T. Kishi, T. Kakimi // *Boshoku Gijutsu (Corr. Eng.)*. – 1981. – **30**. – P. 684.
38. *Acoustic emission from environmental cracking of a high strength titanium alloy* / S. Yuyama, T. Kishi, Y. Hisamatsu, T. Kakimi // *J. Acoustic Emission*. – 1983. – **2**, № 1/2. – P. 19–27.
39. *A comparison of gaseous hydrogen embrittlement, slow-strain-rate hydrogen embrittlement, and stress-corrosion cracking InTi–8Al–1Mo–1V* / G. H. Koch, A. J. Bursle, R. Liu, and E. N. Pugh // *Metallurgical Transact. A.* – 1981. – **12**. – P. 1883–1843.
40. *Nelson H. G. A film-rupture model of hydrogen-induced slow crack-growth in acicular alpha beta titanium* // *Metallurgical Transact. A.* – 1976. – **7**, № 5. – P. 621–627.
41. *Cox B. A correlation between acoustic emission during SCC and fractography of cracking of the zircalloys* // *Corr.* – 1974. – **30**, № 6. – P. 191–202.
42. *Труды IV Международной научно-технической конференции “Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных производственных объектов”*. – М., 2015. – 300 с.
43. *Незрушаючий контроль: Справ. в 7-ми т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии*. – М.: Машиностроение, 2005. – 830 с.
44. *Иванов В. И. Оценка дополнительного времени эксплуатации объектов с применением акустико-эмиссионного контроля* // *Дефектоскопия*. – 1982. – № 11. – С. 60–64.
45. *Баранов В. М., Губина Т. В. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов*. – М.: МИФИ, 1990. – 72 с.
46. *Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса* / В. М. Баранов, А. И. Гриценко, А. М. Карасевич, Е. Н. Кудрявцев, В. В. Ремизов, Г. А. Сарычев. – М.: Наука, 1998. – 304 с.

47. *Труды III Международной научно-технической конференции “Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных производственных объектов”*. – М., 2013. – 280 с.
48. *32nd European Conf. on Acoustic Emission Testing (Prague, September 7–9, 2016)*. – 306 p.
49. *Рыхтер О. А., Ступин А. В.* Диагностика трубопроводов с применением метода акустической эмиссии // Науч. альманах. – 2016. – № 11–2(25). – С. 217–220.
50. *Назарчук З. Т., Неклюдов І. М., Скальський В. Р.* Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів атомних електростанцій. – К.: Наук. думка, 2016. – 306 с.
51. *Коллакот Р.* Диагностика повреждений. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
52. *Диагностирование теплопроводов подземной прокладки методом акустической эмиссии / Л. В. Лагутина, В. А. Лукьяненко, В. И. Кусайко, А. А. Кувшинников // Энергетик.* – 2000. – № 10. – С. 30–31.
53. *Лукьяненко В. А.* Применение метода акустической эмиссии при диагностировании трубопроводов тепловых сетей // *Новости теплоснабжения.* – 2014. – № 3 (163). – С. 30–34.
54. *Бигус Г. А., Счастливцев А. Б., Сабреков М. А.* Применение метода акустической эмиссии по выявлению эксплуатационных повреждений в трубопроводах тепловых сетей Норильского промышленного района // *Технология машиностроения.* – 2016. – № 7. – С. 46–49.
55. *ПБ 03-593-03.* Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М.: ПИО ОБТ, 2003. – 26 с.
56. *Жуков А. В., Кузьмин А. Н., Стюхин Н. Ф.* Контроль трубопроводов с применением метода акустической эмиссии // *В мире неразр. контроля.* – 2009. – № 1(43). – С. 29–31.
57. *Акустико-эмиссионная диагностика коррозионных дефектов трубопроводов / А. Н. Кузьмин, А. В. Жуков, Н. Ф. Стюхин, В. Г. Харебов, Е. Г. Аксельрод // Технадзор.* – 2007. – № 7. – 68–69.
58. *Tscheliesnig P., Jagenbrein A., and Lackner G.* Detecting corrosion during inspection and maintenance of industrial structures using acoustic emission // *32nd European Conf. on Acoustic Emission Testing (Prague, September 7–9, 2016)*. – P. 253–259.
59. *Inspection of flatbottomed storage tanks by acoustical methods; classification of corrosion related signals / P. Tscheliesnig, G. Lackner, M. Gori, H. Vallen, and B. Herrmann // J. Acoustic Emission.* – 2014. – **18**. – P. 167–173.
60. *Lackner G. and Tscheliesnig P.* Field testing of flat bottomed storage tanks with acoustic emission – a review on the gained experience // *J. Acoustic Emission.* – 2004. – **22**. – P. 201–207.
61. *Baran I. and Lackner G.* Analysis of corrosion processes and leak in aboveground storage tanks with AE monitoring // *30th European Conf. on Acoustic Emission Testing & 7th Int. Conf. on Acoustic Emission.* – University of Granada, 2012.
62. *Baran I., Novak M., and Lackner G.* The acoustic emission monitoring system of aboveground storage tanks // *31th Conf. of the European Working Group on Acoustic Emission.* – Germany, Dresden, 2014.
63. *Acoustic Emission monitoring of structural elements of a ship for detection of fatigue and corrosion damages / I. Baran, M. Novak, A. Jagenbrein, and H. Buglacky // 30th European Conf. on Acoustic Emission Testing & 7th Int. Conf. on Acoustic Emission.* – University of Granada, 2012.

Одержано 09.02.17