

На правах рукопису

С К А Л Ь С Ь К И Й

Валентин Романович

**РОЗРОБКА МЕТОДИК ОЦІНКИ МЕТОДОМ
АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПАРАМЕТРІВ
ТРИЩИННОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ
ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ
ТА ДІЇ СЕРЕДОВИЩА**

01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла

05.11.16 — інформаційно-вимірювальні системи

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



00778921 (Y)

Робота виконана в Фізи
ім. Г.В.Карпенка АН України

Наукові керівники - член-кор. АН України, доктор техніч-
них наук, професор
АНДРЕЙКІВ Олександр Євгенович
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ЛИСАК Микола Васильович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
СТРИЖАЛО Володимир Олександрович
- кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
КОШОВИЙ Володимир Вікторович

Провідна установа - Інститут електрозварювання (ІЕЗ)
ім. Є.О.Патона АН України

Захист відбудеться "23" 06 1993 р.
о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 016.42.01 при Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка
Академії наук України (290601, Львів, МСП, вул. Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Фізико-меха-
нічного інституту ім. Г.В.Карпенка АН України.

Автореферат розісланий "18" 05 1993 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

НИКИФОРЧИН

Григорій Миколайович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Руїнування відповідального обладнання, наприклад, в нафтопереробній промисловості, енергетиці, авіації і т.п. має катастрофічні наслідки як для людини, так і для навколишнього середовища. Тому проблема забезпечення надійності експлуатації таких конструкцій вимагає створення та застосування з цією метою сучасних діагностичних комплексів для пошуку та виявлення небезпечних дефектів. Для розв'язання цих актуальних завдань використовуються методи неруйнівного контролю, застосування яких економічно доцільне. Одним із таких методів є метод акустичної емісії /АЕ/, що дозволяє отримувати інформацію про динаміку зародження та розвитку дефектів безпосередньо із об'єкту контролю /ОК/ в процесі його навантаження чи деформації. Фізична суть методу – випромінювання акустичних хвиль, що виникають внаслідок динамічної локальної перестройки структури матеріалу.

Високоміцні матеріали, які закладені в основу виготовлення сучасних конструкцій або їх елементів, схильні до крихкого руїнування, що відбувається шляхом зародження та поширення тріщиноподібних дефектів. Значчи співвідношення між параметрами тріщиностійкості матеріалів та сигналами АЕ, можна ефективно розв'язувати проблеми технічної діагностики виробів і прогнозувати надійність їх експлуатації.

Проте на сьогодні проблема ідентифікації пошкодженості матеріалів конструкцій по параметрах сигналів АЕ та встановлення взаємозв'язку сигналів АЕ із характеристиками руїнування далека від свого завершення. Особливо мало в літературі публікацій про розробку експериментальних методик застосування методу АЕ для розв'язання вказаної проблеми. Це зумовлюється значною тривалістю відпрацювання таких методик, складністю виготовлення виміральної апаратури та недостатністю теоретичних досліджень. Крім того у відомих джерелах відзначаються різні підходи до розв'язку проблеми, а отримані результати досліджень мають великий діапазон розкиду і часто носять суперечливий характер. Тому виникла необхідність в розробці відповідних методик і проведенні експериментальних досліджень процесів субкритичного підростання тріщини в матеріалах.

Мета роботи. Створення експериментальних методик визначення характеристик докритичного росту тріщини в матеріалах при дії статичного навантаження та робочого середовища методом АЕ.

Наукова новизна. Встановлено взаємозв'язок між шириною спектру сигналів АЕ та коефіцієнтом інтенсивності напружень / $K_{I\dot{N}}$ / на різних стадіях докритичного росту тріщини в матеріалах. Для згаданих досліджень розроблено інформаційно-вимірвальну систему на базі КРЕЙТ КАМАК-ВОМ МЕГА і швидкодіючих процесора та аналогово-цифрового перетворювача. Показано, що основний спектр частот сигналів АЕ залежить від $K_{I\dot{N}}$ і лежить у смузі частот нижче 1 МГц. Розроблено загальні методичні підходи застосування методу АЕ для визначення параметрів тріщиностійкості матеріалів при статичному навантаженні та дії середовища і базову вимірвальну систему для реалізації таких досліджень. Встановлено діаграму направленості акустичних випромінювань в режимі взаємовпливу поперечних і поздовжніх хвиль одночасно, що відповідає реальним умовам АЕ-випромінювань на ОК при проведенні їх діагностики. Встановлено взаємозв'язок сигналів АЕ із величиною $K_{I\dot{N}}$ в момент старту тріщини та з біжучим значенням його в процесі навантаження матеріалів, а також із величиною одиничного скачка тріщини та довжиною її підростання, визначено константи докритичного росту тріщини конструкційних матеріалів, які дозволяють використовувати в інженерній практиці та діагностиці відомі в літературі аналітичні залежності. Запропоновано розроблені методики прискореного визначення методом АЕ нижнього порогового значення $K_{I\dot{N}} - K_{I\dot{N}SC}$ при корозійному та водневому розтріскуванні матеріалів, що дозволяють скорочувати час досліджень при визначенні $K_{I\dot{N}SC}$ та методики оцінки динаміки розвитку тріщиноутворення матеріалів в результаті дії водню.

Практична цінність роботи. Розроблені вимірвальні системи для дослідження спектральних характеристик сигналів АЕ, діаграми АЕ-випромінювань та параметрів статичної тріщиностійкості матеріалів дають можливість використовувати їх як для науково-пошукових робіт, так і безпосередньо для неруйнівного контролю /НК/ різних об'єктів.

методику визначення $K_{I\dot{N}}$ моменту старту тріщини та біжучого

значення КІН в процесі росту тріщини, а також величини одиничного скачка і довжини її підростання, являється ефективними при застосуванні цих методик для створення діагностичних комплексів, що базуються на використанні явища АЕ. В цьому аспекті можуть бути використані і методики визначення K_{ISCC} .

Особливо перспективні методики оцінки динаміки тріщиноутворення матеріалів в результаті дії водню на ранніх стадіях діагностики. Разом із вищевказаними методиками та вимірвальними системами вони можуть знайти своє застосування в центральних заводських лабораторіях машинобудівних та металургійних заводів, науково-дослідних центрах, при виготовленні та випробуваннях відповідальних конструкцій, в технологічному циклі, а також в процесі здійснення НК виробів під час їх експлуатації.

Реалізація роботи. результати роботи використані при роботі та оптимізації нових технологій наплавки захисного шару на основний метал корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти, що розроблялася в інституті електровварювання ім. В.О. Патона АН України м. Київ та об'єднанні "Прометей" м. Санкт-Петербург. Методика визначення ступеню фрагментації сталей в результаті дії водню і швидкого охолодження по сигналах АЕ передана Центральному науково-дослідному інституту хімічного машинобудування м. Москва, а методики визначення водневої пошкодженості матеріалів труб енергетичного обладнання методом АЕ у Науково-дослідний інститут теплоенергетики м. Горлівка. Економічний ефект від впровадження отриманих результатів становить близько 133,5 тис.крб. в рік /по цінах 1986-1988 р.р./

На захист виносяться наступні наукові положення. 1. Розробка вимірвальної системи для дослідження спектральних характеристик сигналів АЕ при докритичному рості тріщини. 2. Розробка загальних методичних підходів по вимірванню параметрів сигналів АЕ при дослідженні тріщиностійкості матеріалів та базова вимірвальна система їх реалізації. 3. Методики визначення КІН при старті та докритичному рості тріщини і визначення довжини її підростання. 4. Методики прискореного визначення K_{ISCC} матеріалів при водневому та корозійному розтріскуванні їх. 5. Методики оцінки динаміки тріщиноутворення та процесів руйнування матеріалів в результаті дії водню. 6. Методики визначення водневого пошкодження матеріалів.

Апробація. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних та Всесоюзних конференціях, сим-позиумах та семінарах: IV Всесоюзному семінарі "Водород в металлах" /Москва, 1984/; Всесоюзній конференції "Использование современных физических методов в неразрушающих исследованиях и контроле" /Хабаровськ, 1984/; I Всесоюзній конференції "Акустическая эмиссия материалов и конструкций" /Ростов-на-Дону, 1984/; 6-му Всесоюзному з'їзді по теоретичній і прикладній механіці /Ташкент, 1986/; 2-й Республіканській конференції "Интегральные уравнения в прикладном моделировании" /Київ, 1986/; XIII Конференції молодих вчених ФМІ АН України /Львів, 1986/; I Всесоюзній конференції "Механика разрушения материалов" /Львів, 1987/; II Всесоюзній конференції по акустичній емісії /Кишинів, 1987/; Всесоюзній конференції "Использование современных физических методов в неразрушающем контроле" /Хабаровськ, 1987/; I Всесоюзному симпозиумі "Механика и физика разрушения композиционных материалов и конструкций" /Ужгород, 1988/; XII Всесоюзній науково-технічній конференції "Неразрушающие физические методы контроля" /Свердловськ, 1990/; Міжнародній конференції "Сварные конструкции" /Київ, 1990/; III Всесоюзному симпозиумі "Механика разрушения" /Житомир, 1990/; Міжнародному семінарі "Металл-водород-92" /Донецьк, 1992/.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в двох пропрінтах, дев'ятнадцяти статтях та трьох авторських свідоцтвах. В загальному по результатах роботи опубліковано 36 друкованих праць.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, основних результатів роботи та коротких висновків, списку цитованої літератури, додатку. Робота викладена на сторінках машинописного тексту, містить 66 рисунків, 23 таблиці, 238 найменувань літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність та важливість завдань, що складають предмет дослідження, коротко викладені основні результати роботи.

В першій главі викладені основні відомості про метод АЕ, зроблено літературний огляд, проводиться аналіз та синтез результатів, що зв'язані із застосуванням явища АЕ для досліджен-

ня процесів статичної тріщиностійкості матеріалів, корозійного та водневого розтріскування.

Друга глава присвячена розробці апаратурних засобів та вимірювальних систем по дослідженню сигналів АЕ при докритичному рості тріщини в матеріалах.

Для дослідження спектральних характеристик був розроблений апаратурний комплекс на базі обчислювальної системи КАМАК-МЕРА-60-45 та швидкодіючого периферійного процесора "Електроніка-МТ-70" із застосуванням швидкодіючого АЦП типу Ф-4226 /рис. 1/.

Дисплейний набір модулів /ДНМ/ виконував додаткові функції АЦП, ввід в ЕОМ оцифрованої виборки сигналу АЕ, функціональну обробку, перетворення результатів обробки у зручну для візуалізації форму. Додатковий канал, що складається із попереднього підсилювача 6, приладу АВН-3 та реєстратора Н-338/4 дозволив провести попередню оцінку та вибір режимів вимірювання комплексу. Частота дискретизації сигналу АЕ становила 20 мГц, тривалість виборки 100 мкс.

Було встановлено, що перехід руйнування від стадії деформації та мікро-руйнування до стадії докритичного росту тріщини характеризується зрушенням смуги частот спектру сигналів АЕ обернено пропорційно квадрату КІН і лежить у діапазоні частот нижче 1 МГц.

В залежності від умов експерименту інформація із ЕОМ ски-

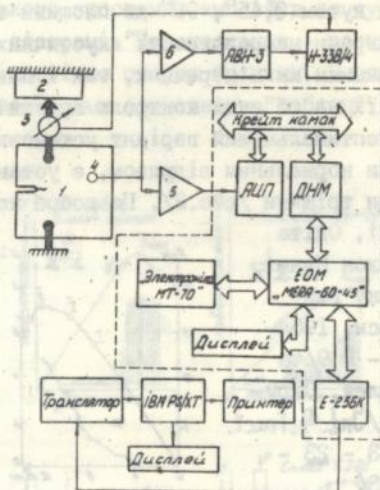


Рис. 1. Блок-схема вимірювально-обчислювальної системи сигналів АЕ.

1 - зразок, 2 - навантажувальний пристрій, 3 - датчик зусилля навантаження, 4 - п'єзопретворювач /ПАЕ/, 5 - блок попереднього підсилення сигналів АЕ, 6 - попередній підсилювач приладу АВН-3.

далася на квазідиск Э-256К, а потім за допомогою транслятора вводилась в пам'ять персональної ЕОМ типу IBM-РС/XT для обробки, візуалізації та зберігання.

При докритичному рості тріщини важливо знати також діаграму направленості акустичних випромінювань при одиничному скачку тріщини, що дозволяє оптимально вибрати місце установки датчика АЕ при проведенні експериментальних робіт і в процесі НК. Сигнали АЕ реєстрували по трьох паралельних каналах, використовуючи в якості первинних перетворювачів /ПАЕ/ серійні пьезоперетворювачі із комплекту апаратури АФ-15, які встановлювали під кутом $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ до площини тріщини. Результати вимірювань діаграми направленості акустичних випромінювань /ДНАВ/ із врахуванням як поперечних, так і поведовжніх хвиль, коли розділення їх на об'єкті контролю практично неможливе, показали, що найоптимальніший варіант установки ПАЕ, при механізмі росту тріщини нормальним відривом, є установка ПАЕ під кутом 45° до площини тріщини /рис.2/. Це добре корелює із відомими результатами Кісі, Окіта

/Нихон Кан-
дзоку гак-
кайси, 1984г
48 - № 9/та
Вадлея, Скру-
бі /Int. J. Fract.
1983 - 23 -
№ 23/

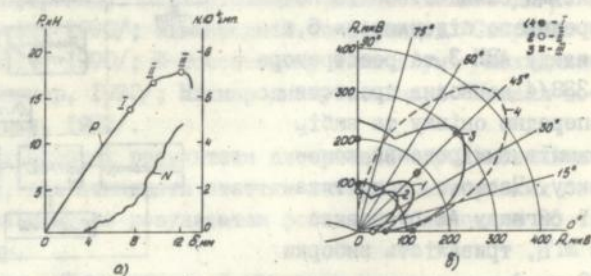


Рис. 2. Діаграма руйнування зразка із сплаву І20І-Т в координатах навантаження Р-розкриття берегів тріщини δ з відповідною їм залежністю сумарного рахунку N сигналів АЕ /а/ та ДНАВ у характерних точках діаграми /б/.

Врахову-
ючи результа-
ти вищенаве-
дених дослід-
жень, розроб-
лена базова
вимірювальна

система для визначення процесів росту тріщини та систематизовано загальні методичні рекомендації по проведенню необхідних вимірювань. Вони передбачають використання АЕ для дослідження тріщиностійкості широкого класу матеріалів при статичному навантаженні і в умовах дії робочого середовища. Вимірювальна система

передбачає виділення корисних сигналів із фонових завад /А.с. №1758545/; просторову селекцію сигналів, запис АЕ на накопичувач інформації, обробку інформації на персональних ЕОМ чи спектроаналізаторах. Крім того проведено систематизацію як набутого практичного досвіду АЕ-вимірювань при проведенні такого роду експериментальних робіт, так і відомих літературних даних.

В главі 3 приведені результати досліджень ряду матеріалів з метою розробки методики визначення початку докритичного росту тріщини /моменту старту тріщини/ і визначення відповідного йому $K_{IH}-K_{IS}$, а також визначення K_{IH} в процесі докритичного росту тріщини та величини її підростання. По результатах досліджень встановлено, що момент різкого зростання амплітуд та сумарного рахунку сигналів АЕ на діаграмі "Навантаження - розкриття берегів тріщини" - $(P-\delta)$ відповідає старту тріщини. Значення K_{IH} співвідношеннях до K_{IC} та K_{max} приведено в таблиці I та на рис. 3.

Величина усередненого скачка тріщини при її докритичному рості оцінювалася наступним чином. Спершу на основі відомих аналітичних залежностей Черепанова /Механіка хрупкого руйнування. - М : Наука - 1974/ і наближених розв'язків трьохмірної пружної задачі для тіла із тонкими включеннями, отриманих Стадником /Фіз.-хім. мех. матер. - 1988 - №1/, визначали розмір пластичної зони, що утворюється у вершині ростучої тріщини. Після цього розраховували рівновелику пластичну зону на концентраторі із заданим апріорі радіусом вершини його. На реальному зразку досліджуваного матеріалу

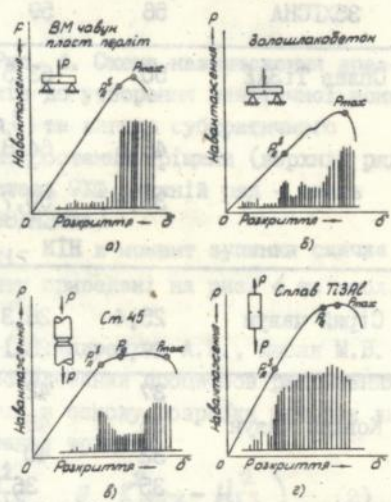


Рис. 3. Діаграми руйнування матеріалів і відповідні зміни амплітуд сигналів АЕ /схема/.

Таблиця І

Співвідношення між K_{IS} , K_Q та K_{max} матеріалів при
рості тріщини

Матеріал	K_{IS} , МПа√м	K_{IQ} , МПа√м	K_{max} , МПа√м	Примітка
38ХНЗМФА	107	116	125	Вирізка вздовж прокату
	70,4	101	116,5	Вирізка поперек прокату
9ХФ	21,7	30,6	34	Середня зона валка стану І700
Ст. 45	26	28	52,8	Стан поставки
40Х	27	30	47,0	"-
І20І-Т	27	34	42	"-
35ХГСА	56	59	60,1	"-
Сплав ТіЗАℓ	50	63,5	117	Бездефектний, пластина, І-а бокова тріщина
	46,6	64,8	85,6	"- 2-і бокові тріщини
	36,4	50,7	62,1	Дефектний, пластина, 2-і бокові тріщини
Сірий чавун	25,4	26,3	39,2	Матриця: -50%ферит, 50%перліт
	27,5	28,1	40,1	-ферит
Ковкий чавун	37	42	67	-ферит
	36	45	87	-перліт пластин.
	32	40	84,8	-перліт зернистий
	35	36	78,8	-перліт, 20%ферит
Високоміцний чавун	47	57,5	94	- ферит
Золошлакобетон	0,09	-	0,16	

створювали таку пластичну зону і паралельно записували сигнали АЕ при її утворенні. Цим встановлювали рівень сигналів АЕ, що супроводжують ріст пластичної зони. Сигнали АЕ, що перевищували цей рівень відповідали докритичному підростанню тріщини. В цей спосіб були визначені величини одиничних скачків тріщини та константи матеріалів, які дозволяють використовувати аналітичну залежність (2)

$$\Delta S = \pi a^2 (K_{I0}^4 + K_{II}^4) / 4, \quad (1)$$

де ΔS - площа одиничного скачка тріщини, a - константа матеріалу. K_{I0} - K_{II} в момент старту тріщини, K_{I1} - K_{II} в момент зупинки скачка тріщини. (Результати експерименту приведені на рис. 4 та табл. 2).

Аналітичні залежності (2)-(5)/Андрейків А.Е., Лысак М.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Киев, Наукова думка - 1989/ лягли в основу розробки методик визначення K_{II} та довжини підростання тріщини:

$$N = -\beta \frac{K_{max}^2}{K_I^2 + K_{II}^2} \left(\frac{K_I^2 - K_{II}^2}{K_{max}^2} + \ln \frac{K_{max}^2 - K_{II}^2}{K_{max}^2 - K_I^2} \right); \quad (2)$$

$$-\gamma \sum_{k=1}^K A^{2/3} = \frac{K_I^2 - K_{II}^2}{K_{max}^2} + \ln \frac{K_{max}^2 - K_{II}^2}{K_{max}^2 - K_I^2}; \quad (3)$$

$$\Delta l = L \sum_{k=1}^K A^{2/3} \quad (4)$$

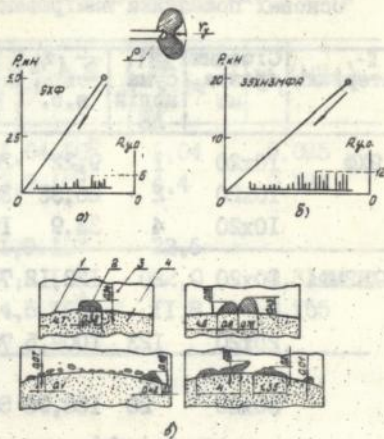


Рис. 4. Схема навантаження зразків до утворення пластичної зони (а,б) та вигляд субкритичного підростання тріщини (верхній ряд - сталь 9ХФ, нижній ряд - сталь 38ХНЗМФА)

Таблиця 2

Основні показники вимірювання докритичного росту тріщини

Матеріали	Січення зразка, мм	$\Sigma \Pi$, сума подій АЕ	$\Sigma A^{2/3}$ в.о. ¹	K_{IS} , МПа $\sqrt{м}$	K_{I1} , МПа $\sqrt{м}$	ΔS , мм ²	$\frac{\Delta S_{ср.}}{\Sigma \Pi}$	$a_i 10^7$, (МПа) ²
9ХФ	10x20	1	9,22	28,4	-	0,1	0,1	4,6
	10x20	2	26,35	32,3	-	0,55	0,27	5,6
	10x20	4	33,9	19,7	27,0	0,73	0,18	5,8
36ХНЗМФА	10x20	20	122,12	76,4	108,0	0,185	9,25	0,8
	20x20	123	1009,5	76,8	106,8	1,7	14,0	1,0
	30x20	20	158,96	58,5	81,0	0,343	17,0	1,9
	40x20	50	373,3	64,0	90,0	1,064	21,10 ⁻³	1,8

Примітка: $\Sigma \Pi$ - сума подій за час підростання; $\Sigma A^{2/3}$ - сума амплітуд за час підростання.

$$\Delta l = \frac{\alpha (K_{IS}^2 + K_{I1}^2)}{2}, \quad (5)$$

де: N - сумарний рахунок сигналів АЕ, K_{max} - КІН при руйнуванні зразка, що відповідає максимуму навантаження, K_{IS} - КІН моменту старту тріщини K_I - біжуче значення КІН при докритичному рості тріщини, A - амплітудні значення сигналів АЕ, K_{I1} - КІН при зупинці тріщини, $\alpha, \beta, \gamma, \alpha$ - константи матеріалів, Δl - величина підростання тріщини.

Спочатку проводили навантаження зразка матеріалу до повного руйнування його. Визначали K_{IS} і K_{max} . Потім на зразках проводили часткове підростання тріщини і визначали K_I , A і N . Це лягло в основу визначення констант по вказаних залежностях. Маючи константи матеріалу $\alpha, \beta, \gamma, \alpha$, по цих залежностях легко визначати біжуче значення КІН - K_I та величину підростання тріщини Δl при субкритичному її розвитку (рис. 5, табл. 3).

Таблиця 3

Експериментально визначені константи деяких матеріалів

Матеріали	$\alpha, \text{мм/В}^{2/3}$	$\beta, \text{імп.}^{-1}$	$\gamma, 10^{-2} \text{В}^{-2/3}$	$\varepsilon, (\text{Мпа})^{-2}$
38ХНЗМФА	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,04 \cdot 10^6$	1,04	0,095
40Х (Гарт. 860°C, відп. 400°C)	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^5$	4,4	0,094
40Х (Ст. пост.)	-	$1,9 \cdot 10^4$	22,6	-
35ХГСА (Ст. пост.)	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^4$	22,0	0,31
9ХФ	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^4$	11,8	0,155

Глава 4 присвячена розробці методик прискореного визначення $K_{I\text{SCC}}$ при статичному навантаженні та дії робочого середовища методом АЕ.

Часто при проведенні таких експериментальних досліджень виникають ситуації, коли в силу ряду причин безпосередній доступ до об'єкту досліджень здійснити технічно складно (високі температури, тиски, агресивне середовище, тощо).

В таких випадках доцільно застосовувати хвилеводи сигналів АЕ. В цій главі проведені дослідження по визначенню робочої смуги частот розбірного хвилевода багаторазового використання, в якій сигнали АЕ передавалися б із найменшими втратами. Вони проводилися по двох напрямках: 1) фіксація сигналів АЕ від

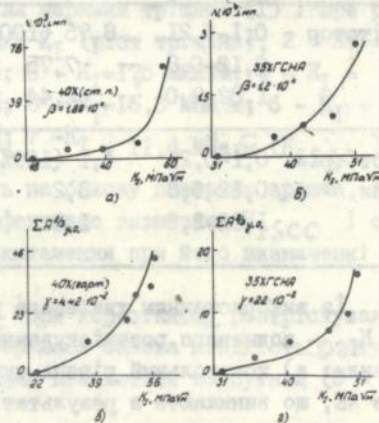


Рис. 5. Залежність сумарного рахунку N (а, б), амплітуди A (в, г) сигналів АЕ від величини K_{IH} .

тріщини і 2) від імітатора сигналів АЕ. Послідовно досліджували проходження сигналів АЕ у смузі частот від 0,1 до 2 МГц: а) безпосередньо на зразку, б) через зразок і хвилевід та в) по системі зразок-хвилевід-камера. Встановлено, що найбільш ефективно з цієї метою можна використовувати низькочастотні вузькосмугові ПАЕ із розрахованим по відомих з літератури залежностях хвилеводом. При цьому втрати на системі зразок-хвилевід-камера найменші і становлять 20-60% від рівня сигналів АЕ, що фіксуються безпосередньо на зразку /табл. 4/.

Таблиця 4

Характеристики втрат сигналів АЕ на хвилеводі

Природа сигналу АЕ	Смуга пропускання ПАЕ, МГц	Амплітуди сигналу АЕ, В		
		на зразку	на хвилеводі	зразок-хвилевід-камера
імітатор	0,1-0,21	8,75 (100%)	7,5 (85%)	7,0 (80%)
	0,12-0,8	7,75	5,6 (72%)	5,5 (71%)
	1,82-2,0	2,44	1,4 (57%)	1,25 (51%)
ріст тріщини	0,1-0,21	4,1 (100%)	2,3 (56%)	1,8 (44%)
	0,12-0,8	3,2	2,1 (66%)	1,6 (50%)
	1,82-2,0	1,3	0,6 (46%)	0,48 (37%)

Із використанням хвилевода розроблена методика визначення K_{ISCC} водневого розтріскування матеріалів. Спочатку встановили: а) контрольний рівень сумарного рахунку N_1 , сигналів АЕ, що виникають в результаті дії газоподібного водню на зразок із концентратором і частину хвилевода в камері, б) аналогічний рівень N_2 від утворення пластичної зони на зразку із концентратором відомого радіусу ρ (див. гл. 3) в камері, у середовищі газоподібного водню і в) рівень N_3 від утворення пластичної зони на повітрі в вершині тріщини, в середовищі повітря, у камері, при низьких значеннях K_{IH} /рис. 6.1/. Всі ці дослідження проводилися із використанням отриманих експериментально амплітудно-частотних характеристик системи зразок-хвилевід-камера. Перевищення дискретними сигналами АЕ встановленого рівня $N_0 = N_3$ (N_3 - найбільше за одиницю часу

спостереження) приймалося за скачок тріщини.

Навантажені зразка починали із величини зусиль навантаження при яких

$$K_I > K_{Isc}.$$

Результати експериментальних робіт показали, що старт та субкритичний ріст тріщини при водневому розтріскуванні під напруженням проходить локально по фронту тріщини і, при незначному пресуванні Π , не виходить на бокову поверхню зразка, а також те, що метод АЕ дозволяє ефективно визначати K_{Isc} і скорочувати час між ступенями навантаження при його визначенні (рис. 6).

Методика визначення K_{Isc} при корозійному розтріскуванні полягає в тому, що априорі вибирається базова швидкість росту тріщини, коли її макропроростання вважається відсутнім ($C = 10^{-9}$ м/с).

Після цього по формулі (6)

$$t = B \cdot c^{-1} \cdot K_I^2, \quad (6)$$

де B - константа матеріалу, яка визначається при великих значеннях c , розраховували часовий інтервал t від моменту прикладання навантаження до моменту появи сигналів АЕ (старту тріщини). Навантажуючи зразок у робочому середовищі, отримували точки, що

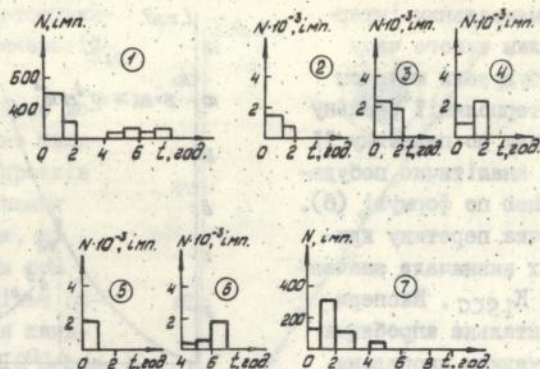


Рис. 6. Гістограми розподілу сумарного рахунку N сигналів АЕ від утворення пластичної зони біля вершини тріщини (I) і при різних значеннях K_I (ріст тріщини); 2 - $K_I = 20,15$ МПа $\sqrt{м}$; 3 - $K_I = 17,5$ МПа $\sqrt{м}$; 4 - $K_I = 16,35$ МПа $\sqrt{м}$; 5 - $K_I = 15,3$ МПа $\sqrt{м}$; 6 - $K_I = 14,03$ МПа $\sqrt{м}$; 7 - $K_I = 11,4$ МПа $\sqrt{м}$ (K_{Isc})

відповідали експериментальним інтервалам такого часу і будували методом інтерполяції реальну криву до перетину її із аналітично побудованою по формулі (6). Точка перетину кривих визначала значення K_{IGSS} . Експериментальна апробація методики проведена на зразках із сталі 9ХФ в 0,5 нормальному розчині NaCl в дистильованій воді (рис. 7).

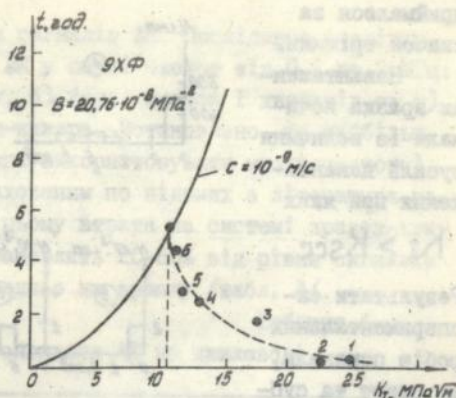


Рис. 7. Залежність часу появи сигналів АЕ від K_{IN}

В главі 5 викладено методики визначення динаміки процесів руйнування матеріалів в результаті дії водню та виявлення водневого пошкодження їх методом АЕ.

Досвід експлуатації реакторів гідрокрекінгу нафти /РГН/ показав недостатню водневу стійкість матеріалів їх корпусів, коли в карбідному прошарку між основним металом та наплавленим захисним шаром виникають тріщини, що в кінцевому результаті призводять до аварій. Разом із ІЕЗ ім. Є.О. Патона АН України були проведені АЕ - та УЗ - дослідження на предмет можливості застосування традиційної технології наплавки, а також розробки нових технологій. Суть дослідження полягала у наводненні зразків при робочих параметрах реакторів гідрокрекінгу нафти в середовищі газоподібного водню, їх охолодженні на повітрі з подальшим (від $t_0 = 40^\circ\text{C}$) АЕ - контролем процесів тріщиноутворення. Отримані дані (рис. 8) показали хорошу кореляцію АЕ-контролю із результатами УЗ-досліджень. Таким чином встановлено, що застосування серійної традиційної технології наплавки вітчизняними типами стрічок зумовлює підвищену схильність до тріщиноутворення наплавленого шару, а значить не може бути рекомендована для виготовлення РГН. В такий спосіб були підібрані нові оптимальні техноло-

гії наплавки із застосуванням проміжного антикорозійного шару.

Поряд із цим було досліджено також вплив швидкості охолодження зразків на процеси розшарування та тріщиноутворення, що важливо враховувати при зупинках РІН. Найбільш оптимальною виявилася швидкість охолодження $10^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

При вивченні впливу водню високих концентрацій на утворення фрагментів у трубчатих зразках разом із методом АЕ застосували ще і металографічні дослідження. Результати робіт показали, що інтенсивність процесів утворення та росту тріщин найбільша в період між першою та шостою годиною досліджень (рис. 9) і однотипна для всіх режимів наводнення. Встановлено, методом АЕ, що на утворення фрагментів та розвиток макротріщин визначальний вплив має дія газоподібного водню та насичення ним матеріалу, що підтвердилося металографічними дослідженнями, ці процеси супроводжуються дискретною АЕ малої та великої амплітуд.

Аналіз причин руйнування труб енергетичного обладнання показав, що воно проходить внаслідок водневого окрихчення їх металу. З метою виявлення водневого пошкодження таких металів розроблені методики АЕ – досліджень, що полягали у випробуванні зразків із труб, які мали технологічне напрацювання, статичним навантаженням та методом АЕ – прозвучування.

Перший підхід показав, що поява сигналів АЕ на тестових зразках із наводненням сталі 50ХГ (рис. 10) відбувається при

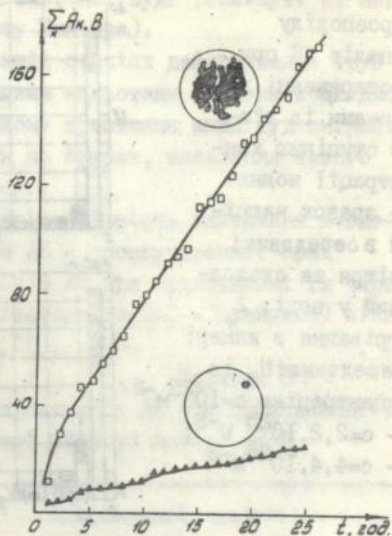
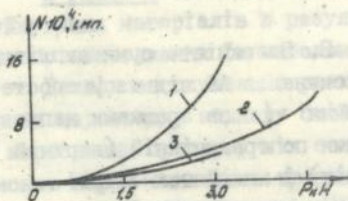
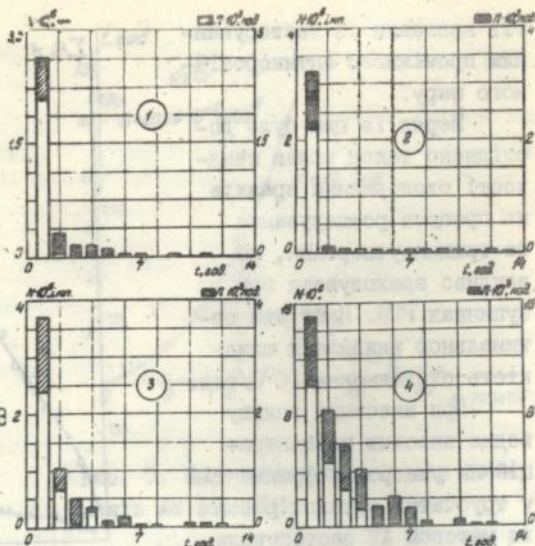
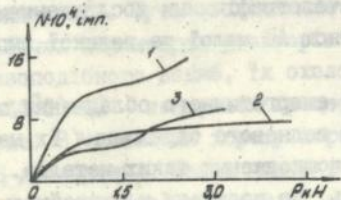


Рис. 8. Залежність суми амплітуд ΣA_k сигналів АЕ від часу спостереження t за зразками наплавленими по традиційній (верхній графік) і новій технології.

Рис. 9. Гістограми розподілу сигналів АЕ при спостереженні за зразками із різною ступінню концентрації водню: 1 - зразок нагрітий в середовищі повітря та охолоджений у воді; 2 - нагрівання в камері у середовищі H_2 із концентрацією $c=10^{25} M^{-3}$; 3 - $c=2,2 \cdot 10^{25} M^{-3}$; 4 - $c=4,4 \cdot 10^{25} M^{-3}$.



a)



б)

Рис. 10. Залежність сумарного рахунку N сигналів АЕ при випробуванні тестових зразків до наведення (а) і після дії на них газоподібного водню (б).

навантаження значно нижчих від тих, які були досягнуті на них до наводнення (відсутність ефекту Кайзера).

Було встановлено, що на ранніх стадіях деформування труб котлів високого тиску із незначними нальотами окалини пошкодження воднем можна виявити по різкому зростанню амплітуд сигналів АЕ. При значному нальоті окалини на трубах, виявлення такого пошкодження суттєво ускладнюється.

У другому підході встановлено можливість виявлення водневого пошкодження металів методом АЕ - прозвучування. Вона ґрунтується на послабленні сигналів АЕ при проходженні їх через наводнений зразок (від ПАЕ - імітатора до ПАЕ - приймача) більше ніж через ненаводнений (табл. 5).

Таблиця 5

Результати вимірювань втрат сигналів АЕ при проходженні їх через ненаводнені і наводнені ділянки металу труб

Кільцеві зразки Ø/42x5, (І2ХІМФ)				Пластинчаті зразки 6x35x106,5 (ст. 20)					
Вид імітації	№ серії	Середній в серії сумарний рахунок сигналу АЕ імп.		% співвіднош. затухання сигналу АЕ	Вид імітації	№ серії	Середній в серії сумарний рахунок сигналу АЕ імп.		
		без Н ₂	Н ₂				без Н ₂	Н ₂	
Електричний імпульс	1	240,8	131,4	3,9	Електричний імпульс	1	189,8	172,4	9,2
	2	328,4	290,3	11,6		2	239,3	192,4	19,6
	3	408,6	301,6	26,2		3	266,8	221,7	16,9
с.з.		326	274,4	15,8	с.з.		232	195,5	15,7
Джерело Хсу-Нельсона	1	626,2	595	5	Джерело Хсу-Нельсона	1	1923	1215,6	37
	2	686	619	97		2	1853	1112,3	39,97
	с.з.	656	607	8,6		с.з.	1888	1163,95	38,4

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА КОРОТКІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено вимірвальний комплекс за допомогою якого встановлено взаємозв'язок між стадіями докритичного росту тріщини в матеріалах та спектром сигналів АЕ і діаграмою направленості АЕ випромінювань.
2. Розроблені загальні методичні рекомендації по визначенню статичної тріщиностійкості матеріалів методом АЕ і апаратурну базу систему проведення АЕ-вимірювань.
3. Розроблені методики визначення КІН при старті та докритичному рості тріщини і довжини її підростання.
4. Розроблені методики прискороного визначення K_{ISCC} при водневому та корозійному розтріскуванні матеріалів. Показано суттєвий вплив на передачу сигналів АЕ хвилевода та приведено відповідні рекомендації по його використанню.
5. Експериментально визначено константи докритичного росту тріщин ряду матеріалів.
6. Розроблено методику АЕ-досліджень динаміки зародження та розвитку росту тріщин в матеріалах корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти.
7. Встановлено експериментальні залежності впливу ступеню наводнення та режимів охолодження на процеси фрагментації сталі по сигналах АЕ.
8. Розроблено експериментальні підходи до АЕ-контролю водневого пошкодження труб енергетичного обладнання, які ґрунтуються на аналізі сигналів АЕ при статичному навантаженні матеріалу та його АЕ-прозвучуванні.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В НАСТУПНИХ РОБОТАХ

1. Лысак Н.В., Сергиенко О.Н., Скальский В.Р. Акустическая эмиссия при росте водородных трещин. // Тез. докл. IV Все-союзн. семинаре "Водород в металлах" Москва, 1984, с. 166.
2. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н. Теоретические исследования амплитуд сигналов акустической эмиссии при образовании трещин // Тез. докл. Всесоюзн. конференции "Использование современных физических методов в неразрушающих исследованиях и контроле". Хабаровск 1984, С. 250.

3. Лысак Н.В., Скальський В.Р. Исследование субкритического роста трещин с помощью акустической эмиссии // Физ.-хим. механика матер. - 1986 - №4 - С. 113-114.
4. Скальський В.Р. Применение метода акустической эмиссии для определения старта и субкритического роста трещин в металлах // Матер. XIII конф. мол. ученых ФМІ, Львов, 1986. Деп. ВИНТИ, 1987, №3007 - В87, С. 77-80.
5. Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н., Скальський В.Р. /Препринт №137 / ФМІ ім. Г.В. Карпенко АН України/ - 1987 - 49 с.
6. Лысак Н.В., Сергиенко О.Н., Скальський В.Р. Акустико-эмиссионный метод диагностики параметров хрупкого разрушения. // Тез. докл. I Всесоюзн. конференции "Механика разрушения материалов", Львов, 1987, С. 211.
7. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Зазуляк В.А., Сергиенко О.Н., Скальський В.Р. Определение направленности акустических излучений при образовании и росте трещин // Тез. докл. конференции "Использование современных физических методов в неразрушающем контроле." Хабаровск - 1987 - С. 5.
8. Ткач А.Н., Лысак Н.В., Дьськів Т.Я., Обчинников В.А., Шарков В.А., Скальський В.В. Методические особенности определения статической трещиностойкости чугунов // Физ.-хим. механика матер. - 1988 - №1 - С. 68-73.
9. Лысак М.В., Скальський В.Р., Іваницький Я.Л., Ковчик С.С., Сергиенко О.М. Застосування акустичної емісії для дослідження утворення тріщин під захисною наплавкою корпусів реакторів. // Физ.-хим. механика матер. - 1989 - №2 - С. 79-81.
10. Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. Использование метода акустической эмиссии для исследования разрушения чугунов. // Технич. диагностика и неразруш. контроль. - 1989 - №3 - С. 37-45.
11. Лысак Н.В., Скальський В.Р., Лучко И.И. Акустическая эмиссия и разрушение бетона при статическом нагружении. // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1989 - №2 - С. 48-52.
12. Андрейків О.С., Скальський В.Р., Зазуляк В.А., Корниляк Р.В. Застосування акустичної емісії для визначення статичної тріщиностійкості литих титанових сплавів. // Физ.-хим. ме-

ханика матер. - 1990 - №1 - С. 103-107.

13. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Каленский В.К., Скальський В.Р. и др. Диагностика развития трещин по границе сплавления в наводороженных образцах. // Технич. диагностика и неразр. контроль. - 1990 - №3 - С. 32-36.
14. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии при определении статической трещиностойкости материалов. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. /Препринт №165/ ФМІ АН України/ - 1990 - 34 с.
15. Андрейків О.Е., Лысак М.В., Сергиенко О.М., Скальський В.Р. Застосування методу акустичної емісії при дослідженнях матеріалів у водневому та корозійному середовищах // Физ.-хим. механика матер. 1990 - №5 - С. 26-36.
16. Каленский В.К., Николенко Т.Д., Козин А.Н., Иваницкий Я.Л., Лысак Н.В., Скальський В.Р. Повышение стойкости нержавеющей стали, наплавленного на сталь 10Х2ГНМА против отслоения при эксплуатации в среде водорода // Автоматическая сварка - 1990 - №2 - С. 27-33.
17. Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. О методологии АЭ - диагностирования трещинообразования // Технич. диагн. и неразруш. контроль, 1991 - №3 - С. 9-14.
18. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. Методика определения значения K_{Isc} стали в среде водорода с помощью метода акустической эмиссии. / Там же - 1992 - №1 - С. 18-26.
19. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р. Контроль водородного растрескивания сталей акустико-эмиссионным методом. // Тез. докл. I-го Междунар. семинара "Металл-водород - 92" Донецк - 1992 - С. 88-89.
20. Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р. и др. Водородное растрескивание металлов и сплавов и его акустико-эмиссионный контроль. // Физ.-хим. механика матер. - 1992 - №4 - С. 63-69.
21. А.с. 1755121. МКИ:G01M17/00. Способ определения порогового коэффициента интенсивности напряжений // Андрейків А.Е., Скальський В.Р., Лысак Н.В. Опубл. БИ. №30- 1992.
22. А.с. 1758545. МКИ G01M29/14. Способ контроля роста трещины в образцах материалов. // Андрейків А.Е., Скальський В.Р.

Лысак Н.В. Оpubл. БИ №32 - 1992.

23. А.с. I769086. МКИ.G01 #I7/00. Способ определения нижнего порогового значения коэффициента интенсивности напряжений. // Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н. Оpubл. БИ №38. 1992.
24. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Скальский В.Р., Коваль Л.А., Васылына Ю.Т., Сергиенко О.Н. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии растущей трещины // Технич. диагностика и неразруш. контроль. - 1993 - №1 - С. 77-86.

А.Е. Андрейкив

Ав 27.451

Підписано до друку 10. 05. 93. Формат 60×84^{1/16}. Папір друкарський № 1.
Друк офсетний. Обсяг видання в умовно-друкарських листах 1,22. Умов-
них фарбовідбитків 1,22. Зам. 447. Тираж 100. Безкоштовно.

ЕДД УНДІПП, Львів, вул. Володимира Великого, 4.