

УДК 539.42: 620.179.17

З. Т. Назарчук, д.-р фіз.-мат. наук,
В. Р. Скальський, д-р техн. наук,
С. І. Гірний, канд. техн. наук,
Д. В. Рудавський, канд. техн. наук

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
(м. Львів e-mail: skal@ipm.lviv.ua, nazarchuk@ipm.lviv.ua, hirnyj@ipm.lviv.ua,
denrud@ipm.lviv.ua)

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ТРІЩИН У Cr-Mo-V СТАЛЯХ РІЗНИХ СТУПЕНІВ ДЕГРАДУВАННЯ

Проведено АЕ-дослідження руйнування зразків сталі 15X2МФА та 15X2МФА-А на різних ступенях їх деградування. Виявлено основні особливості зміни параметрів сигналів АЕ за квазістатичного поширення тріщини. Встановлені параметри можуть бути використані при створенні нових засобів АЕ-моніторингу корпусів реакторів АЕС.

Проведены АЭ-исследования разрушения образцов стали на разных стадиях их деградации. Найдены характерные особенности изменения параметров сигналов АЭ при квазистатическом росте трещины. Установленные параметры могут быть использованы при создании новых средств АЭ-мониторинга корпусов реакторов АЭС.

Вступ

Модифіковані ванадієм низьколеговані феритні хромомолібденові сталі успішно використовують у ядерній енергетиці та інших галузях промисловості завдяки високим механічним (міцність, пластичність, тріщиностійкість) і технологічним (здатність до кування, прогартовування, зварювання) характеристикам [1, 2]. Стійкість фізичних властивостей сталей до тривалого впливу температури та сильних радіаційних потоків забезпечила, зокрема, їхню популярність у виготовленні товстостінних великогабаритних виробів, насамперед ємностей, які працюють під тиском. Саме зі сталі цього класу виготовлено корпуси всіх 15 ядерних реакторів типу ВВЕР, що працюють в Україні, та десятків інших у Російській Федерації й інших країнах світу [3].

Високі термо-механічні характеристики низьколегованих Cr-Mo-V сталей знижуються під час тривалої експлуатації матеріалу в умовах інтенсивних механічних, теплових та радіаційних полів [2–4]. Нейтронне опромінення є визначальним чинником у зниженні в'язкості руйнування сталі 15X2МФ, а тому ресурс корпусів ядерних реакторів напряму залежить від радіаційної стійкості сталі. Оскільки більшість реакторів ВВЕР в Україні працює вже понад 20 років, наближаючись до свого проектного ресурсу, дуже гостро постають питання продовження терміну їх закриття та безпечного подальшого експлуатування. Дослідження стану корпусів реакторів ВВЕР-1000 в Україні показало, що серед них існують два, метал зварних швів яких має підвищену схильність до радіаційного окрихчування, а також один, в якого прискорено окрихчується основний метал [5]. З огляду на розміри, радіаційно-небезпечний характер та нормативні вимоги до технічного діагностування таких об'єктів, виняткової актуальності набуває потреба ефективної і достовірної оцінки ступеня їхньої дефектності, а отже, і рівня безпеки [6].

Метод акустичної емісії (АЕ) ще на зламі 1970-1980-х років вважали перспективним не тільки на етапі виготовлення, але і на етапі експлуатування корпусів реакторів, включно з відстежуванням активності існуючих дефектів [7]. Впровадження методу АЕ-діагностування на діючих ядерних реакторах свого часу наштовхнулося на деякі труднощі, серед яких:

а) відносно низький рівень інтенсивності сигналів АЕ у в'язких корпусних сталях,

- б) значний рівень кавітаційних шумів, верхня границя спектра яких сягає 1000 кГц,
в) збільшення коефіцієнта згасання сигналів АЕ із збільшенням частоти.

Використання на корпусі реактора АЕ-перетворювачів зі смугою 1,5–2,5 МГц дозволяє елімінувати вплив кавітації та реєструвати корисні сигнали АЕ на віддалі до 1 м від джерела емісії [8]. За певними оцінками один імпульс АЕ, зареєстрований на діючому реакторі, відповідав би зростанню площі тріщини на 2 мм² (за певних режимів відбору та обробки інформації) [7], хоча достовірність таких кількісних оцінок виявилась досить низькою [9].

Розвиток АЕ методу у 1980-х – поч. 1990-х років додав оптимізму у його впровадження для моніторингу цілісності корпусів промислових ядерних реакторів, зокрема, в області найвищого радіаційного опромінення, а відтак, найшвидшого окрихчування сталі [10]. Було сформульовано можливі механізми виникнення сигналів АЕ у корпусах ядерних реакторів – рух дислокацій і утворення мікротріщин у процесі розвитку пластичних зон; утворення мікротріщин через відшарування і розтріскування неметалевих включень (напр. MnS), ріст тріщини за механізмом коалесценції мікропор, тертя берегів тріщини – та запропоновано шляхи до їх ідентифікування [11–13].

Метод АЕ ефективно використовують і для контролю товстостінних ємностей, що працюють під тиском у нафтопереробній та хімічній галузях, а от його нормативне впровадження для відстежування руйнування корпусів ядерних реакторів поки що не відбулося, незважаючи на існуючі в Україні нормативні документи [14]. Однак за останні 20 років він пройшов черговий етап у своєму розвитку [15]. Принципово підвищились якість та функціональні можливості АЕ-систем для збору АЕ даних, поглиблено теоретичні основи інтерпретування АЕ сигналів та розширено перелік методів математичної обробки АЕ сигналів, в тому числі пов'язаних з їх часово-спектральними характеристиками.

Мета роботи – встановити особливості зміни параметрів сигналів АЕ під час ранніх стадій поширення руйнування у низьколегованих хромомолібденованадієвих сталях за різних ступенів їх деградації.

Експериментальний підхід

Випробовували зразки двох сталей 15Х2МФА і 15Х2МФА-А у різних станах: від стану поставки до стану окрихчення за тривалий термін експлуатування (нормативний хімічний склад матеріалів наведений у табл. 1), з яких виготовили три групи зразків, утворених таким чином:

1 – сталь 15Х2МФА, конструкційна міцність КМ-60 (КП-60) у стані поставки з подальшим старінням на повітрі 25 років. КМ-60 відповідає $\sigma_{0,2} \geq 590$ МПа;

2 – сталь 15Х2МФА, конструкційна міцність КМ-100 (КП-100), штучно зістарена спеціальною термообробкою (еквівалентно терміну експлуатування 40 років) із подальшим старінням на повітрі 25 років. КМ-100 відповідає $\sigma_{0,2} \geq 980$ МПа;

3 – сталь 15Х2МФА-А у стані поставки з подальшим старінням на повітрі 10 років.

Таблиця 1. Нормативний хімічний склад досліджуваних сталей (мас. %) *

Марка, документ	C	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu
15Х2МФА, ТУ 108-131-75/86	0,13–0,18	2,5–3,0	0,4 max	0,6–0,8	0,25–0,35	0,015 max	0,012 max	0,10 max
15Х2МФА-А, ТУ 302.02.014-89	0,13–0,18	2,5–3,0	0,4 max	0,6–0,8	0,25–0,35	0,007 max	0,007 max	0,07 max

* – нормативний вміст елементів Si – 0,17–0,37%, Mn – 0,3–0,6%.

Сталь 15Х2МФА, з якої спочатку виготовляли корпуси реакторів ВВЕР-440, мала підвищені концентрації шкідливих домішок. Із встановленням окрихчувальної ролі фосфору та міді граничні концентрації цих та споріднених елементів було суттєво зменшено, що ві-

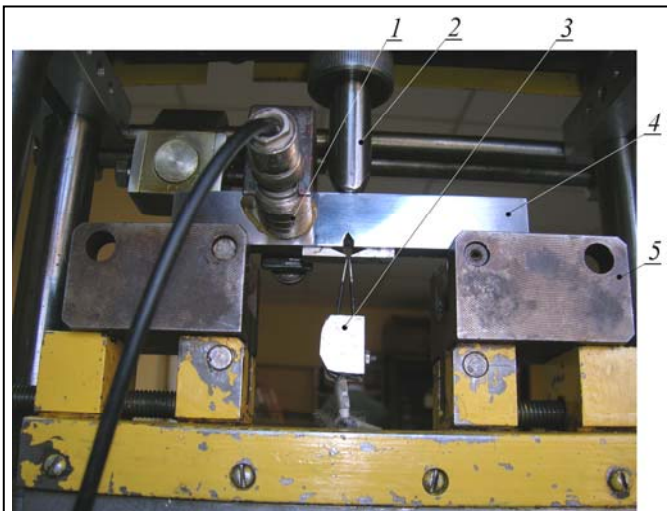


Рис. 1. Випробувальне обладнання:

1 – первинний перетворювач АЕ; 2 – індентор навантажувального пристрою; 3 – перетворювач розкриття берегів тріщини; 4 – зразок; 5 – опора

добразилося в ТУ 108-131-75/86, перезатверджених у поправленому варіанті в 1986 році. Покращена модифікація 15Х2МФА-А з'явилася вже через три роки (табл. 1).

Для встановлення кореляцій між параметрами сигналів АЕ та характеристиками тріщиностійкості на балкових зразках перерізом 10×20 мм створювали втомну тріщину згідно з [16], після чого здійснювали квазістатичне навантаження триточковим згином зі швидкістю переміщення рухомого захоплювача 1 мм/хв із одночасним реєструванням сигналів АЕ (рис. 1).

Для синхронного реєстрування АЕ-сигналів та величин переміщення індентора і розкриття тріщини використовували акустико-емісійну

систему SKOP-8. Сигнали АЕ аналізували, зіставляючи із діаграмою руйнування за такими характеристиками: амплітуда, частотний спектр, час наростання переднього фронту імпульсу, тривалість події, коефіцієнт вейвлет-перетворення тощо. Момент появи сигналів АЕ із амплітудами, вищими від контрольного рівня, приймали за початок руйнування у зразках [15]. Аналіз доломів зразків (рис. 2) підтвердив, що старт макротріщини відповідає якісній зміні параметрів АЕ, після чого проведено аналіз сигналів АЕ у цей момент, а також на різних ділянках діаграми руйнування з метою встановлення їх кількісних показників.

Як показано раніше [15], сигнали АЕ реєструються ще до початку поширення макротріщини, відображаючи пластичне деформування перед її вершиною, де формується пластична зона із тривісним напруженим станом. Можливо, АЕ виникає в момент мікротріщиноут-



Рис. 2. Вигляд зразків:

а) – розлом зразка групи I; б) – долом зразка групи I; в) – деформування зразка групи III і вигляд пластичної зони перед вершиною тріщини; г) – долом зразка групи III

ворення, що пов'язане з розтріскуванням вторинних фаз або їхнього відшарування від матриці α -Fe. Тому за початок росту макротріщини приймали момент якісної зміни інтенсивності сигналів АЕ, записаних синхронно із діаграмою руйнування в координатах «навантаження P – розкриття берегів тріщини v » (рис. 3).

Визначена у такий спосіб за значеннями P_{AE} , а не за P_Q , як того вимагає нормативно-технічна документація, величина K_{IAE} має нижчі значення від K_{IC} і є інваріантною до товщини зразка, способу навантаження та температури випробувань [17–19]. Отже, АЕ-визначення моменту старту тріщини за величиною K_{IAE} є достовірнішим, ніж за K_{IC} .

Результати досліджень та їх обговорення

Випробування зразків усіх трьох груп показали, що сигнали АЕ з'явилися за навантажень набагато нижчих від P_Q , за яким визначають момент старту макротріщин у випадку квазікрихкого руйнування (рис. 3) та виконання умов автомодельності (табл. 2). Вони характеризувалися низькими амплітудами та короткою тривалістю імпульсів. Далі впродовж навантаження амплітуди наростали і спостерігалось чергування низькоамплітудних і високоамплітудних сигналів АЕ. Домінування останніх відбувалося із наближенням до точки P_Q на діаграмі P - v аж до повного руйнування зразка.

Таблиця 2. Параметри тріщиностійкості досліджуваних сталей, визначені за стандартом ГОСТ 25.506-85 та за сигналами АЕ [15, 19, 20]

Група зразків	K_{IAE}	K_{IQ}	K_{IC}	K_C	Примітка
	МПа $\sqrt{м}$				
1	27,93	88,35	88,35	132,28	–
2	29,26	82,96	82,96	134,79	–
3	15,81	39,68	—	58,54	не виконуються умови автомодельності

Перші сигнали АЕ (рис. 4) з'явилися на рівні шумів (рис. 4, а) незадовго від початку навантаження. Їхні амплітуди на виході первинного перетворювача не перевищували 0,1–0,2 мВ (рис. 4, б). Для першої групи зразків поява сигналів відповідала коефіцієнту інтенсивності напружень $K_1 \approx 2$ –3 МПа $\sqrt{м}$, для другої – $K_1 \approx 3$ –4 МПа $\sqrt{м}$, а для третьої – $K_1 \approx 4$ –5 МПа $\sqrt{м}$. Слід зазначити, що амплітуди перших сигналів АЕ зі зразків групи III були найвищими – приблизно 0,5 мВ. Зі зростанням навантаження поодинокі сигнали АЕ у всіх типів зразків частішали, а їхні амплітуди поступово збільшувались. Із наближенням до точки P_Q вони нерідко сягали амплітуд 0,2–0,3 мВ (для зразків групи III – 0,5–0,7 мВ), а за цією точкою вже перевищували ці показники і зростали до амплітуд у декілька мВ (рис. 4, в).

Далі сигнали АЕ посилювалися, сягаючи амплітуд, що чергувалися між кількома мВ і долями мВ, що свідчить про чергування механізмів руйнування. Припускаємо, що стрибкоподібне макропідростання змінювалося мікропідростанням та утворенням пластичної зони перед новоутвореною макротріщиною, аж до повного руйнування зразків. На ділянці від точки P_Q до точки P_{max} середні амплітуди сигналів АЕ невинно зростали.

Для подальшого розвитку методологічних засад моніторингу корпусних реакторних сталей та для створення нових АЕ-систем визначали також показники згасання пружних хвиль АЕ, використовуючи стрижень $\varnothing 50$ мм, $L = 3120$ мм. Апроксимуючи експоненційно згасання виміряних амплітуд, отримали коефіцієнт згасання $\delta = 0,45 \dots 0,52$ м $^{-1}$.

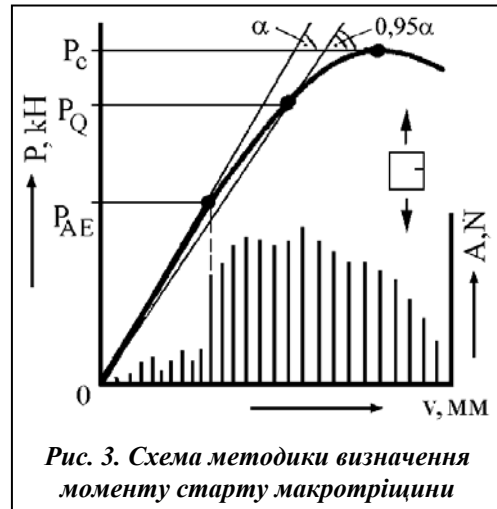
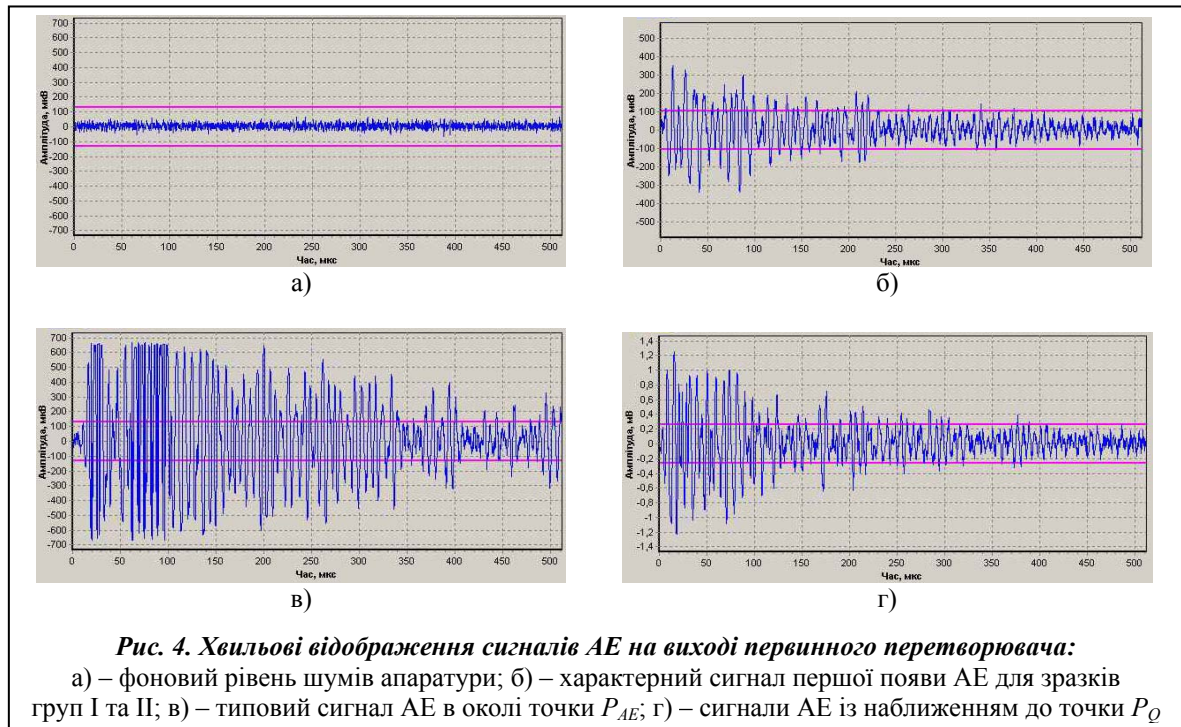


Рис. 3. Схема методики визначення моменту старту макротріщини



Висновки

Проведено попередні АЕ-дослідження руйнування корпусних реакторних сталей, що перебувають у різних мікроструктурних станах. Встановлено характерні особливості параметрів сигналів АЕ за умов квазістатичного росту тріщини, зареєстровані АЕ-системою SKOP-8. Отримані параметри можна використовувати для створення нових засобів АЕ-моніторингу корпусів реакторів АЕС.

Література

1. Jatzak C. F. Effect of microstructure and cooling rate on secondary hardening of Cr-Mo-V steels / C. F. Jatzak // Trans. ASM. – 1965. – Vol. 58. – P. 195–209.
2. Service characteristics of carbon and low-alloyed steels // ASM Metals Handbook, 10th edition, Vol 1, Materials Park: ASM. – 1990. – P. 615–754.
3. Ясній П. В. Пластично деформовані матеріали: втрома і тріщинотривкість / П. В. Ясній. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
4. Lucas G. E. An evolution of understanding of reactor pressure vessel steel embrittlement / G. E. Lucas // J. Nuclear Materials. – 2010. – Vol. 407. – P. 59–69.
5. Ревка В. М. Контроль радіаційного окрихчування металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 в Україні / В. М. Ревка, Л. І. Чирко // Тези наук. конф. Ін-ту ядерних досліджень НАНУ, 25–28 січня 2011 р. – 1 с.
6. Хмара Д. О. Зауваження громадськості щодо продовження експлуатації енергоблоків АЕС України у понадпроектний термін / Д. О. Хмара // Ядерна та радіаційна безпека. – 2010. – № 1. – С. 43–47.
7. Bently P. G. A review of acoustic emission for pressurized water reactor applications / P. G. Bently // NDT Int. – 1981. – Vol. 14. – P. 329–335.
8. Hutton P. H. Detecting acoustic emission in the presence of hydraulic noise / P. H. Hutton // Non-Destructive Testing. – 1969. – Vol. 2. – P. 111–115.
9. Runow P. The use of acoustic emission methods as aids to the structural integrity assessment of nuclear power plants / P. Runow // Int. J. Pressure Vessels and Piping. – 1985. – Vol. 21. – P. 157–207.
10. Hutton P. H. Progress for on-line acoustic emission monitoring of cracks in reactor systems / P. H. Hutton, R. J. Kurtz, M. A. Friesel // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – Vol. 98. – P. 135–140.
11. Ohira T. Microcrack initiation and acoustic emission during fracture toughness tests of A533B / T. Ohira, Y.-H. Pao // Metall. Trans. – 1986. – Vol. 17A. – P. 843–852.

12. *Ohira T.* Quantitative characterization of microcracking in A533B steel by acoustic emission / T. Ohira, Y.-H. Pao // *Ibid.* – 1989. – Vol. 20A. – P. 1105–1114.
13. *Gries H.* Results of acoustic emission during mechanical and thermal loadings of vessel components and their fracture mechanical interpretation / H. Gries, E. Waschki // *Nuclear Engineering and Design.* – 1988. – Vol. 106. – P. 399–403.
14. *ДСТУ 4227-2003.* Рекомендації щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 25 с.
15. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К.: Наук. думка, 2009. – 877 с.
16. *ГОСТ 25.506-85* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 38 с.
17. *Смирнов В. И.* Об оценке размеров дефектов методом акустической эмиссии с позиции линейной механики разрушения / В. И. Смирнов // *Дефектоскопия.* – 1979. – № 2. – С. 45–50.
18. *Коровкин Е. Д.* Определение старта трещины акустическим методом / Е. Д. Коровкин, А. В. Скоболо, Л. П. Дунина // *Завод. лаборатория.* – 1980. – № 9. – С. 865–867.
19. *Determination of threshold values of stress intensity factor using acoustic emission method / O. Ye. Andreykiv, M. V. Lysak et al.* // *Proc. 18-th Symp. Experimental Mechanics of Solids (Jachranka near Warsaw, Poland, 14–16 October 1998).* – Warsaw, 1998. – P. 114–119.
20. *Скальський В. Р.* Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії / В. Р. Скальський, О. Є. Андрейків. – Львів: В-во Львів нац. ун-ту ім. І. Франка, 2006. – 330 с.

Надійшла до редакції
10.11.12

УДК 539.3

Ю. В. Ромашов, канд. техн. наук

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
(г. Харьков, e-mail: romashov_yu_v@ukr.net)

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТИНУАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Рассматривается оценка долговечности элементов конструкций энергетического оборудования на основе континуальной механики разрушения. Предложено подход к определению показателей долговечности: гамма-процентного и среднего ресурса с учетом разброса условий эксплуатации энергетического оборудования. Представлена обобщенная формулировка и численное решение методом Бубнова–Галеркина задач континуальной механики разрушения, которое необходимо для определения показателей долговечности. В качестве примера использования предложенных подходов рассмотрено определение показателей долговечности для теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов в условиях ползучести и коррозионного растрескивания. Показано, что оценка долговечности по среднему ресурсу может оказаться завышенной, поэтому наиболее полным показателем долговечности является гамма-процентный ресурс.

Розглядається оцінка довговічності елементів конструкцій енергетичного обладнання на основі континуальної механіки руйнування. Запропоновано підхід щодо визначення показників довговічності: гама-відсоткового та середнього ресурсу з урахуванням вірогідного розкиду умов експлуатації енергетичного обладнання. Подано узагальнене формулювання та числове розв'язування методом Бубнова–Гальоркіна задач континуальної механіки руйнування, що потрібно для визначення показників довговічності. Як приклад використання запропонованих підходів розглянуто визначення показників довговічності