

УДК 539.3:629.179.17

В.Р. Скальський, Л.Н. Добровольська, Б.П. Клим, П.П. Великий
СТАТИЧНА ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ КОРПУСНИХ РЕАКТОРНИХ СТАЛЕЙ

Отримано кількісні показники статичної тріщиностійкості різних реакторних сталей. Показано, що у її визначенні важливу роль відіграє метод акустичної емісії, який дозволяє точніше встановити в'язкість руйнування сталей, а їх штучне старіння призводить до окрихчення матеріалу.

Ключові слова: сталі корпусів реакторів, статична тріщиностійкість, акустична емісія.

Рис. 8. Табл. 3. Літ. 15.

В.Р. Скальський, Л.Н. Добровольская, Б.П. Клим, П.П. Большой
СТАТИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОРПУСНОЙ РЕАКТОРНОЙ СТАЛЕЙ

Получены количественные показатели статической трещиностойкости различных реакторных сталей. Показано, что в ее определении важную роль играет метод акустической эмиссии, который позволяет точно установить вязкость разрушения сталей, а их искусственное старение приводит к охрупчиванию материала.

Ключевые слова: стали корпусов реакторов, статическая трещиностойкость, акустическая эмиссия.

V. Skalskyi, L. Dobrovolska, B. Klim, P. Velukyi
FRACTURE OF CASE REACTOR STEELS

The quantitative performance of different static fracture toughness of reactor steels. Shown that it plays an important role determining the acoustic emission method, which can more accurately set the fracture toughness of steels and their artificial aging leads to embrittlement of the material.

Keywords: steel reactor vessels, fracture, acoustic emission.

Згідно з вимогами Національного стандарту України [1], з метою запобігання передчасного виходу з ладу діючого обладнання підвищеної небезпеки необхідно застосовувати явище акустичної емісії (АЕ), як один із методів їх технічного діагностування. Для цього необхідно попередньо провести експериментальні дослідження на предмет оцінки рівня сигналів АЕ під час зародження мікро - та макроруйнування в зразках різних конструкційних матеріалів. Маючи такі вихідні дані, з урахуванням особливостей поширення пружних хвиль АЕ в реальних об'єктах контролю, будуть відповідні методики діагностування.

Стан проблеми. Для побудови корпусів реакторів атомних електростанцій (АЕС) спочатку найширшого застосування набула сталь 15Х2МФА, яка має 0,12% С, 2,8% Сг, 0,8% Мо і 0,2% V. З цієї сталі з категорією міцності КП-40 були виготовлені 32 корпуси ВВЕР-440, близько 300 корпусів реакторів для флоту і 18 – для атомних криголамів. Сталь забезпечувала проектний флюенс у межах $(2-2,4) \times 10^{20}$ н/см². Температура експлуатації 270 °С. Датою початку застосування сталі 15Х2МФА вважається 1958 рік [2].

Для ВВЕР-1000 вимоги були іншими і корпуси цих реакторів виготовляли зі сталі 15Х2НМФА (дата першого застосування – 1973 рік). На відміну від менших реакторів, у корпусну сталь для ВВЕР-1000 додавався нікель у кількості від 1 до 1,5%. У сталі для тисячників була інша категорія міцності (КП - 45), вища експлуатаційна температура 290 °С, але занижений порівняно зі сталями для ВВЕР-440 проектний флюенс $(4-6) \times 10^{19}$ н/см².

Роботи з удосконалення корпусних сталей ведуться практично безперервно. За рахунок зниження вмісту шкідливих домішок зі сталі 15Х2МФА було отримано сталь 15Х2МФА-А. Наступним кроком стала поява марок 15Х2МФА-А модифікацій А і Б.

Сталь модифікації А можна називати сталлю 15Х2МФА-А, у якій відкоректований марочний хімічний склад. У нього був введений нікель, але в менших кількостях, ніж у сталь для тисячників – від 0,2 до 0,4%. Дещо більший вміст нікелю – від 0,6 до 0,8% – відрізняє сталь 15Х2МФА-А модифікації Б.

Але в тих кількостях, в яких нікель присутній у сталях, він не призводить до помітного збільшення темпів радіаційного окрихчення. Крім цього, введення нікелю до складу сталі 15Х2МФА-А супроводжувалося зниженням шкідливих домішок. Це призвело до того, що темп радіаційного окрихчення (визначається коефіцієнтом A_F) суттєво покращився: для сталі 15Х2МФА він дорівнює 15, для сталі 15Х2НМФА – від 29 до 30, а для сталі 15Х2МФА-А коефіцієнт радіаційного окрихчення дорівнює 12. Це дає змогу підвищити термін експлуатації корпусів реакторів (рис. 1).

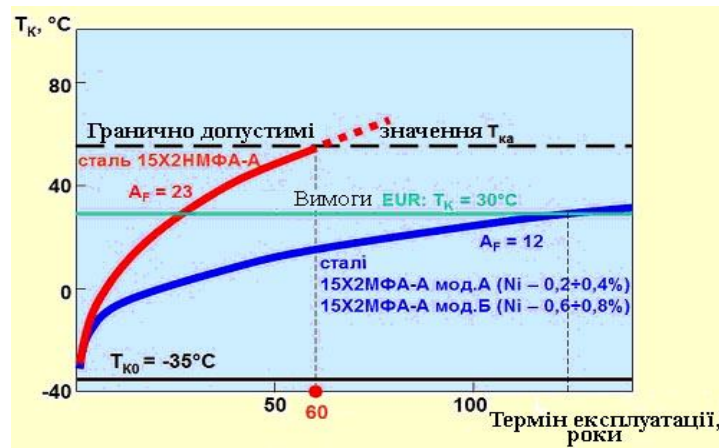


Рис. 1. Вплив коефіцієнта радіаційного окрихнення корпусних сталей на термін експлуатації реакторів

В Україні побудовано кілька АЕС, серед яких більшість становлять ВВЭР-1000. Матеріалом корпусів для цих станцій слугує корпусна сталь 15X2МФА. На інших станціях використано з цією метою сталь 15X2НМФА. Очевидно, що з плином часу експлуатації все нагальнішою постає проблема забезпечення їх безаварійної експлуатації, особливо з урахуванням деградації вказаних марок сталі.

Підготовка зразків для випробувань. Таким чином, як впливає з викладеного вище, найцікавішими з точки зору розробки технічного АВЕ - діагностування таких відповідальних об'єктів тривалого експлуатування, як корпуси реакторів АЕС, є сталі 15X2МФА та 15X2НМФА у різних станах: від стану поставки до стану окрихнення за тривалий термін експлуатування. У зв'язку з цим, нами була використана методика оцінки статичної тріщиностійкості вказаних конструкційних сталей за навантаження призматичних зразків матеріалу триточковим згином (рис. 2), під час якої реєстрували сигнали АЕ протягом усього часу експериментів.

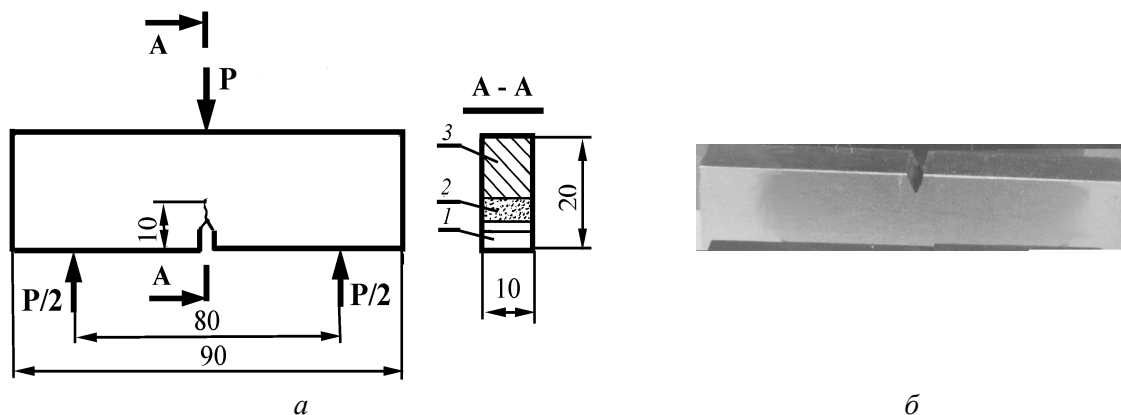


Рис. 2. Розміри зразків для проведення випробувань зі схемою їх навантаження (а) та загальний вигляд зразка (б)

Випробовували 3 групи зразків з корпусних сталей, які мали різну міцність. Хімічний склад сталей приведено у табл. 1. Отже, групи зразків були утворені таким чином:

- 1 – сталь 15X2МФА, конструкційна міцність КП-60 у стані поставки з подальшим старінням на повітрі 25 років;
- 2 – сталь 15X2МФА, конструкційна міцність КП-100, штучно зістарена спеціальною термообробкою (еквівалентно терміну експлуатування 40 років) із подальшим старінням на повітрі 25 років;
- 3 – сталь 15X2МФА-А у стані поставки з подальшим старінням на повітрі 10 років.

Виведення втомних тріщин. Для експериментального визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) потрібно вибрати раціональну форму та розміри зразка, створити штучну втомну тріщину, забезпечити необхідну точність реєстрації навантаження та

інших величин для побудови діаграми руйнування. Після цього зразок із заздалегідь виведеною втомною тріщиною руйнують і записують необхідну інформацію.

Таблиця 1. Хімічний склад сталей, використаних у експериментальних дослідженнях

Марка сталі	C	Mn	Cr	Mo	Ni	V	P	S	Cu
15X2МФА	0,13- 0,18	0,30- 0,60	2,50- 3,00	0,60- 0,80	≤0,40	0,10- 0,12	≤0,020	≤0,020	≤0,30
15X2НМФА	0,12- 0,20	0,40- 0,90	1,6-2,7	0,40- 0,75	1,0- 1,5	0,25- 0,35	≤0,025	≤0,020	≤0,20

Оскільки деякі характеристики, що визначають із експерименту і описують тріщиностійкість металевих сплавів, залежать від форми та розмірів зразка, то для зіставлення отриманих результатів із аналогічними літературними даними, такі дослідження повинні проводитися в рамках єдиної уніфікованої методики. Така методика регламентована у [1] і поєднує відповідні стандарти провідних країн світу. Тому розміри зразків, їх форму, розрахунки необхідних силових й інших показників тощо тут і далі приведені у відповідності із вимогами цього документа.

Отже, штучну втомну тріщину створювали циклічним навантаженням. Для цього задавали значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{fmax} , виходячи із умови $K_{fmax} \leq 0,75 K_{IC}$. Кінцевий відтинок тріщини, що становив 0,3 довжини всієї втомної тріщини, створюють за умови $K_{fmax} \leq 0,6 K_{IC}$. Оскільки значення K_{IC} для досліджуваних зразків було невідомим, то правильність режимів виведення втомної тріщини коректували після руйнування першого дослідного зразка. Для цього також додатково користувались залежністю $\sigma_{CO} \leq 0,5\sigma_{02}$, де σ_{CO} – максимальне напруження на кінцевому етапі виведення втомної тріщини.

Існує широка гама машин і випробувальних установок для виведення втомних тріщин у зразках конструкційних матеріалів [3–5]. Більша їх частина є серійними лабораторними машинами відомих виробників (Instron, SANS, MTS тощо). Проте на практиці у випадках, коли необхідно зароджувати втомні тріщини у зразках конструкційних матеріалів малої товщини (до 10 мм), застосування потужних і дорогих установок є економічно недоцільним. Тому часто вирішують цю проблему виготовленням власних розробок, адаптованих під конкретні розміри зразків випробуваних конструкційних матеріалів та умов проведення досліджень. Результати таких розробок знайшли своє застосування у низці виробничих та науково-технічних лабораторій [4, 5], однак їх удосконалення під кожні конкретні задачі випробовувань і досі перебуває на стадії розвитку.

У лабораторній практиці досліджень тріщиностійкості матеріалів відомо три методи навантаження зразків, для отримання втомних тріщин: 1) випробування за постійного навантаження P , коли розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK , що є функцією прикладеного навантаження, геометрії зразка та довжини тріщини, монотонно збільшується; 2) випробування за постійного коефіцієнта інтенсивності напружень ($\Delta K = \text{const}$), що досягають вибором геометрії зразка або зміною напружень, які прикладають до нього; 3) випробування за постійної деформації, коли коефіцієнт інтенсивності напружень монотонно змінюється з ростом тріщини [5]. Ми використовували установку третього типу [6] для дослідження зародження та розвитку втомних тріщин у призматичних (балкових) зразках прямокутного чи квадратного поперечного перерізів. За конструкційним принципом дії установка нагадує силову схему машин типу Шенк-Ерлінгер [7] і працює за схемою консольного згину (рис. 3, 4).

Технічні характеристики установки

Максимальне зусилля на важелі.....	3,0 кН;
Тип зразка	балковий;
Частота навантаження.....	0,1 – 100 Гц;
Габарити	680×445×490 мм;
Вага.....	560 Н.

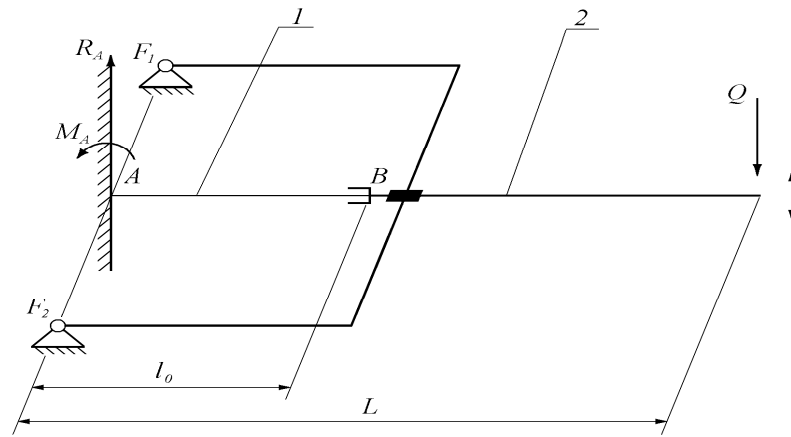


Рис. 3. Розрахункова схема зусилля навантаження на зразок через силу Q прикладену до важеля: 1 – зразок; 2 – рухомий важіль

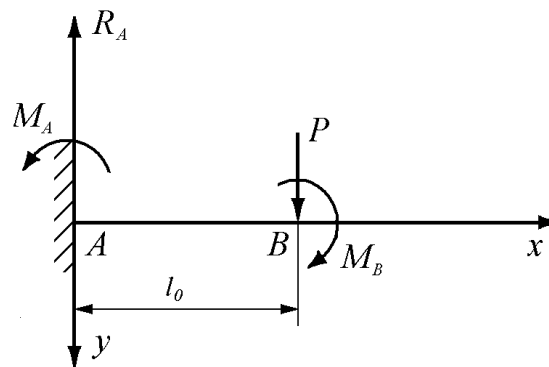


Рис. 4. Розрахункова силова схема прикладеного до зразка навантаження

У табл. 2 подано показники виведення втомних тріщин на призматичних зразках, які використовували у експериментальних дослідженнях.

Таблиця 2. Характеристики виведення втомних тріщин у призматичних зразках перерізом 10×20 мм вибраних трьох типів конструкційних матеріалів

Тип зразків	Радіус концентратора ρ , мм	Довжина тріщини l , мм	Кількість циклів навантаження N	Коефіцієнт т асиметрії циклу, R	Кінцеве навантаження циклу P_{\max} , Н	Швидкість росту тріщини на кінцевому етапі виведення $v \times 10^{-8}$, мм/цикл.
1	0,165	8,74	69130	0,18	17,5	5,88
2	0,165	9,34	141610	0,19	15,45	3,63
3	0,163	8,98	196730	0,125	16,8	2,0

Таким чином, виведення втомних тріщин здійснювали як строго регламентовану операцію із дотриманням вимог стандарту [8], що дало змогу вивести втомну тріщину із гострою вершиною.

Методика випробувань. Синхронно з навантаженням зразків записували по 2-х вимірювальних каналах АЕ-інформацію, як показано на рис. 5.

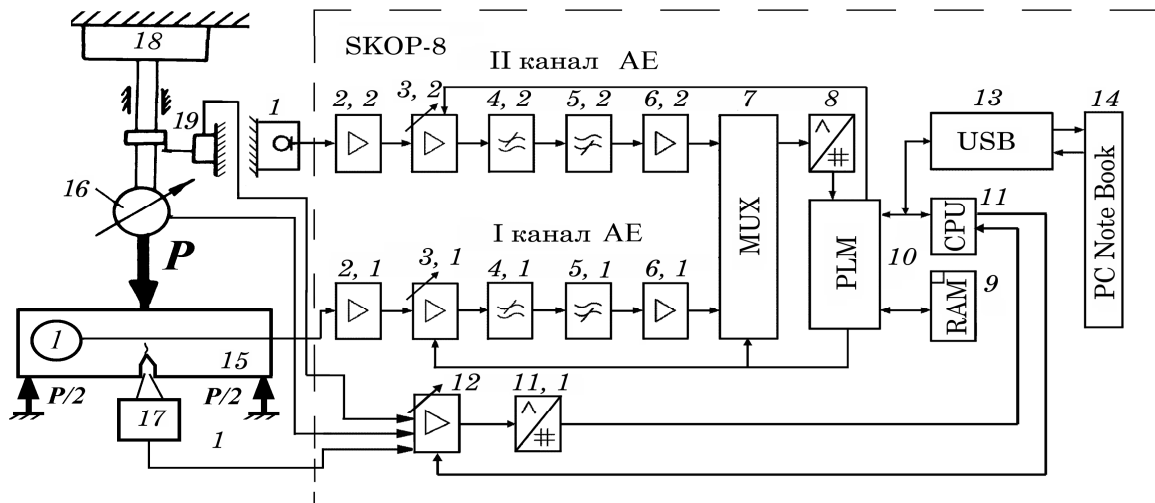


Рис. 5. Структурна схема випробування зразків з корпусних матеріалів за навантаження триточковим згином та із записом пружних хвиль АЕ: 1 – ПАЕ; 2 – попередній підсилювач; 3 – підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення; 4 – фільтр низьких частот; 5 – фільтр високих частот; 6 – масштабуючий підсилювач; 7 – комутатор; 8 – аналого-цифровий перетворювач; 9 – оперативно-запам'ятовуючий пристрій; 10 – програмована логічна інтегральна схема; 11 – сигнальний процесор; 12 – підсилювачі параметричних каналів; 13 – приймач-передавач USB; 14 – персональний комп'ютер; 15 – досліджуваний зразок; 16 – тензометричний динамометр; 17 – тензометричний перетворювач розкриття берегів тріщини; 18 – навантажувальна установка; 19 – тензометричний перетворювач переміщення навантажувального індентора

Сигнали АЕ аналізували за такими їхніми характеристиками: амплітуда, частотний спектр, час наростання переднього фронту імпульсу, тривалість події, коефіцієнт вейвлет – перетворення, швидкість рахунку тощо. Навантажували зразок зі швидкістю переміщення рухомого захопу 1 мм/хв. Налаштування АЕ – системи SKOP-8 були такими: кількість вимірювальних каналів – 2; тривалість вибірки (мс) – 2; період дискретизації (мкс) – 0,5; фільтр низьких частот (кГц) – 600; фільтр високих частот (кГц) – 40; поріг дискретизації (%) – 28; рівень власних шумів (приведених до входу попереднього підсилювача (мкВ) – 7.

Підсилення АЕ-каналів (у дискретах): канал № 1 – 5; канал № 2 – 4; канал № 3 – 5. Параметричні канали мали такі показники режимів вимірювання: канал № 1 (розкриття тріщин) – 300 один./мм; канал № 2 (переміщення) – 80 один./мм; канал № 3 (навантаження) – 23 один./мм;

Таким чином, в експериментах на визначення статичної тріщиностійкості матеріалів реакторів АЕС ми використовували призматичні зразки, які навантажували триточковим згином, дотримуючись вимог регламентованих у [8]. Так, зразок із виведеною втомною тріщиною плавно навантажували із записом діаграми руйнування $P - v$ та синхронною реєстрацією сигналів АЕ (САЕ). У момент появи САЕ із амплітудами вищими від контрольного рівня навантаження, яке позначали як $P_{АЕ}$, приймали за початок руйнування зразків [9].

Аналіз доломів зразків підтвердив гіпотезу про те, що методика визначення старту макротріщини за якісною зміною САЕ на акустограмі, тобто за моментом різкого зростання їх амплітуд, відповідає істинному моменту старту макротріщини. Ураховуючи сказане, нами проведено аналіз САЕ у цей момент, а також на різних ділянках діаграми руйнування з метою встановлення їх кількісних показників, що далі будуть закладені для вибору режимів роботи створених апаратних засобів.

Обговорення результатів досліджень. Як показано нами раніше [10], випромінювання АЕ відбувається ще до початку макроскопічного поширення макротріщини і безпосереднього зв'язку із цим процесом немає. Тобто виникнення АЕ залежить від пластичного деформування у її вершині і пропорційне до об'єму пластичної зони, де виникає тривісний напружений стан. Генерується АЕ саме у момент формування там мікротріщин, коли в цій зоні виникає розтріскування частинок вторинної фази або їхнє відшарування від матриці. Ці науково обгрунтовані положення підтверджують раніше опубліковані результати досліджень [11, 12], де запропоновано за початок росту макротріщини брати момент якісної зміни інтенсивності САЕ на

акустограмі, записаній паралельно із діаграмою руйнування в координатах навантаження – розкриття берегів тріщини “ $P - v$ ”. Визначена у такий спосіб за значеннями P_{AE} , а не за P_Q , як того вимагає нормативно-технічна документація [16], величина K_{IAE} має нижчі значення від K_{IC} і є інваріантною до товщини зразка, способу навантаження та температури випробувань [13–15]. Отже, АЕ-визначення моменту старту макротріщини за величиною K_{IAE} є достовірнішим, ніж за K_{IC} .

Як показали результати наших випробувань зразків корпусних сталей реакторів АЕС усіх 3-х груп, сигнали АЕ появлялися за навантажень, які набагато нижчі від навантаження P_Q , за яким визначають момент старту макротріщин у випадку квазікрихкого руйнування за виконання умов автомодельності [8] (табл. 3).

Таблиця 3. Характеристики тріщиностійкості корпусних сталей, визначені за регламентованими методиками [8] та за сигналами АЕ [9, 10]

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 [8]

Вони характеризувалися низькими амплітудами та короткою тривалістю імпульсів. Далі впродовж навантаження їхні амплітуди наростали і спостерігалось чергування низько амплітудних і високо амплітудних сигналів АЕ. Домінування останніх відбувалося з наближенням до точки P_Q на діаграмі $P - v$ аж до повного руйнування зразка.

На рис. 6 показано навантаження зразка триточковим згином, а на рис. 7 – результати випробувань зразків зазначених вище різних груп.

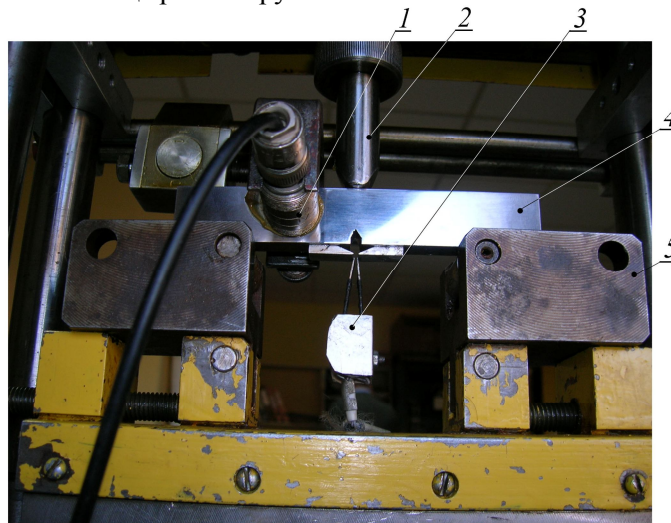


Рис. 6. Випробувальне обладнання: 1 – первинний перетворювач АЕ; 2 – індентор випробувальної установки; 3 – перетворювач розкриття берегів тріщини; 4 – зразок; 5 – опора

Розглянемо коротко специфіку генерування сигналів АЕ протягом випробування призматичних зразків всіх трьох груп. Перші сигнали появлялися на фоні рівня шумів (рис. 8, а) незадовго від початку навантаження. Їхні амплітуди на виході первинного перетворювача не перевищували 100 – 200 мкВ (рис. 8, б). Так для першої групи зразків їх поява відповідала коефіцієнту інтенсивності напружень $K_I \approx 2-3 \text{ МПа} \sqrt{м}$, для другої – $K_I \approx 3-4 \text{ МПа} \sqrt{м}$ а для третьої – $K_I \approx 4-5 \text{ МПа} \sqrt{м}$. Слід зазначити, що амплітуди перших сигналів АЕ зі зразків групи III були найвищими – приблизно 500 мкВ. Зі зростанням навантаження поодинокі сигнали АЕ у всіх типів зразків частішали, а їхні амплітуди поступово збільшувались.

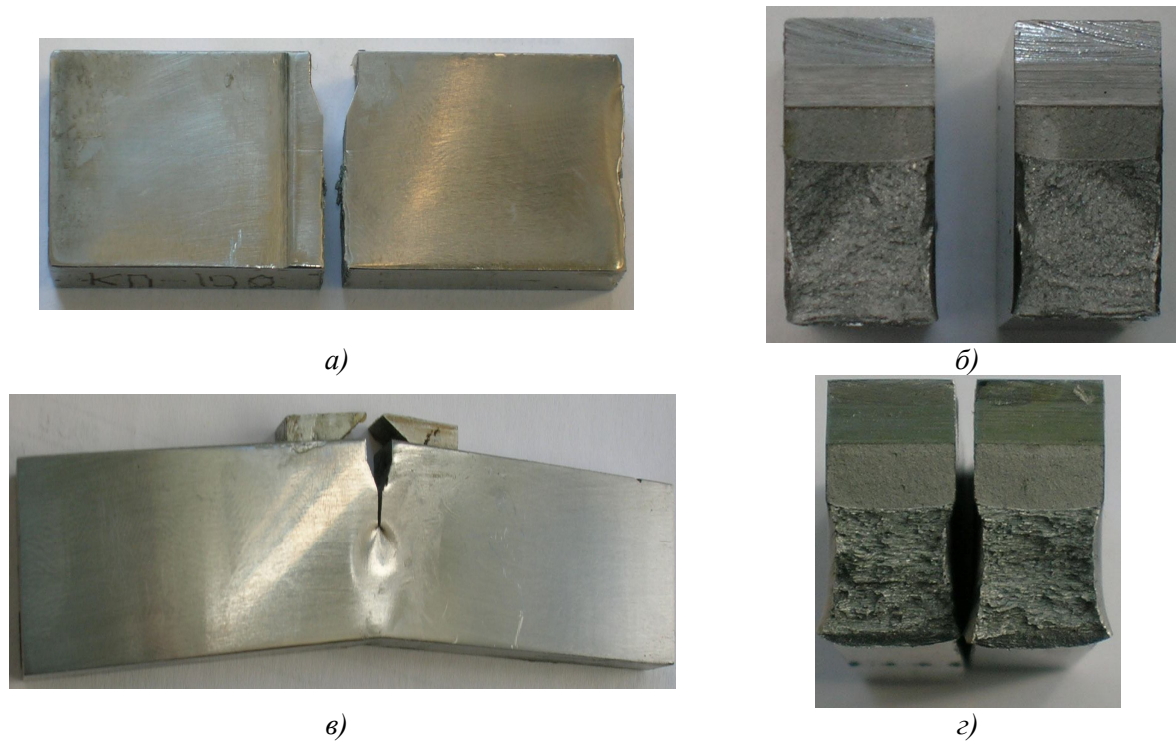


Рис. 7. – Розлом зразка групи I (а) та вигляд доломів: зразків групи I (б) та III (г); деформування зразків групи III і вигляд пластичних утяжок у вершині макротріщини (д)

За наближення до точки P_0 вони нерідко сягали амплітуд у 200–300 мкВ (для зразків групи III – 500–700 мкВ), а за цією точкою вже перевищували ці показники і наростали до амплітуд у декілька мВ (рис. 8, в).

Далі генерування АЕ ставало найінтенсивнішим і сигнали з амплітудами у кілька мВ чергувалися з сигналами, що мали амплітуди порядку сотень мкВ, що свідчить про почергову зміну механізмів руйнування. Гіпотетично можна стверджувати, що стрибкоподібне макропідростання змінювалося мікро підростанням та утворенням пластичної зони перед новоутвореною макротріщиною. Так продовжувалося до повного руйнування зразків. На ділянці від точки P_0 до точки P_{max} середні амплітуди сигналів АЕ невинно наростали.

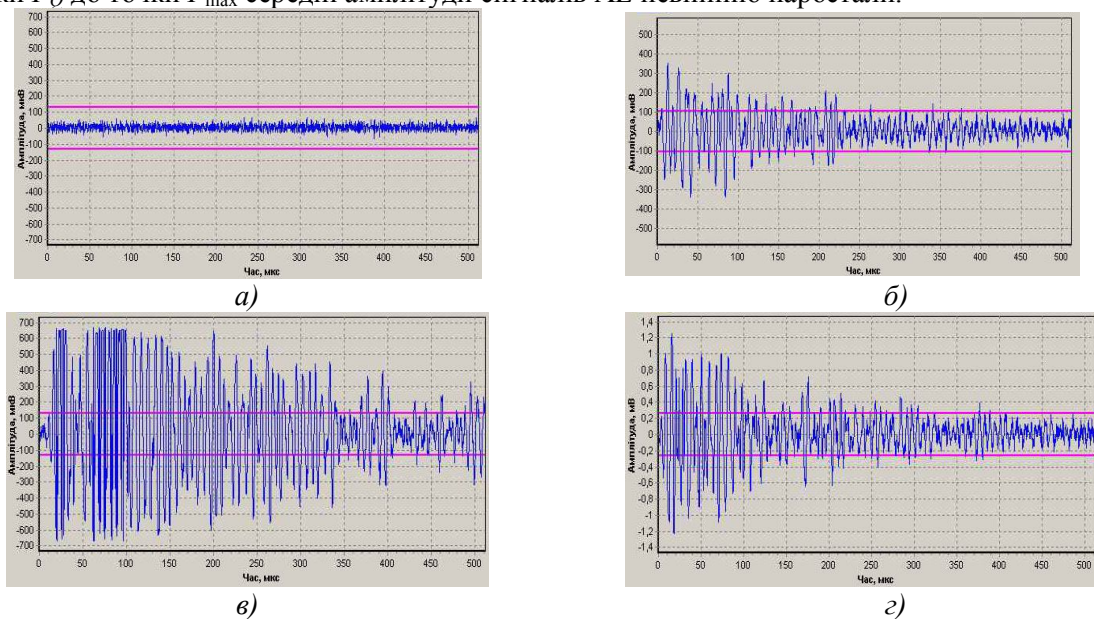


Рис. 8. Хвильові відображення сигналів АЕ на виході первинного перетворювача АЕ: а) фоновий рівень шумів апаратури; б) характерний сигнал першої появи АЕ для зразків груп I та II; в) типовий сигнал АЕ в околі точки P_{AE} ; г) сигнали АЕ за наближення до точки P_0

Висновки. За результатами проведених випробувань отримано амплітудні показники сигналів АЕ, за мінімальними значеннями яких можна забезпечити необхідну чутливість

вимірювального тракту АЕ. Це дає підстави для створення необхідних прикладних методик АЕ-діагностування стану корпусів реакторів АЕС.

1. Національний стандарт України ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – Чинний від 2003 – 12 – 01.
2. Карзов Г. П. Сто лет для корпуса ВВЭР. – AtomInfo.Ru, опубл. 10.02.2011. – Електронний ресурс.
3. Грешников В. А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
4. Золоторевский В. С. Механические испытания и свойства металлов / под ред. И. И. Новикова. – М.: Металлургия, 1974. – 302 с.
5. Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов: сб. науч. трудов / под ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1981. – 314 с.
6. Установка для дослідження втомного руйнування методом акустичної емісії / В. Р. Скальський, Я. Д. Толопко, П. П. Великий та ін. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів: зб. наук. праць. – Вип. 14: Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 43-49.
7. Серенсен С. В. Машины для испытаний на усталость / С. В. Серенсен, М. Е. Гарф, Л. А. Козлов. – М.: Машгиз, 1957. – 404 с.
8. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. в действие 27.03.1985 г. – М.: Изд-во стандартов. – 1985. – 60 с.
9. Скальський В. Р. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії / В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.
10. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. У 3 т. / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К.: Наук. думка, 2009. – 877 с.
11. Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture / M. Mirabile // Non-Destructive Testing – 1975. – 8, № 2. – P. 77-85.
12. Dunegan H. L. Fracture analysis by use of acoustic emission / H. L. Dunegan, D. Harris, C. A. Tatro // Eng. Fract. Mech. – 1968. – 1, № 1. – P. 105-122.
13. Sedgwick R. T. Acoustic emission from single crystals of LiF and KCl / R. T. Sedgwick // Journal of Appl. Physics. – 1968. – 39, № 3. – P. 1728-1740.
14. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission / P.P. Gillis // In: Acoustic Emission. ASTM STP 505. American Society for Testing and Materials. - Philadelphia, Pennsylvania, 1972. – P. 20-29.
15. Malen K. Theoretical estimate of acoustic-emission stress amplitudes / K. Malen, L. A. Bolin // Physica Status Solidi (B) Basic Research. – 1974. – 61, № 2. - P. 637-645.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.