

УДК 620.192

О. Ясній, канд. техн. наук; В. Бревус

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОЦІНЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ КОРПУСА РЕАКТОРА ПІСЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРОЦЕДУРИ FITNET

Резюме. Оцінено ймовірність руйнування моделі корпусу атомного реактора з півеліптичною тріщиною після попереднього термомеханічного навантаження, враховуючи розкид механічних властивостей та параметрів навантаження за методом Монте-Карло із вибіркою за значущістю (MCIS) та методом надійності першого порядку (FORM) згідно з процедурою FITNET. Отримано діаграми оцінювання руйнування за методом Монте-Карло для різних глибин тріщини, розглядаючи тиск як нормально розподілену випадкову змінну.

Ключові слова: попереднє термомеханічне навантаження, діаграма оцінювання руйнування, ймовірність руйнування.

O. Yasniy, V. Brevus

ASSESSMENT OF REACTOR VESSEL PROBABILITY OF FAILURE AFTER WARM PRE-STRESSING USING FITNET

The summary. The probability of failure of model of nuclear reactor vessel with semi-elliptic crack after warm pre-stressing was assessed taken into account the scatter of mechanical properties and loading parameters by Monte-Carlo with importance sampling (MCIS) and first-order reliability method (FORM) based on limit-state functions from FITNET procedure. The failure assessment diagrams were obtained by means of crude Monte-Carlo simulations for different crack depth and variable internal pressure.

Key words: warm pre-stressing, failure assessment diagram, probability of failure.

Постановка проблеми. Деякі корпуси атомних реакторів типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000, які експлуатуються в Україні, вичерпали свій ресурс за критеріями крихкої міцності, а вони є важливими елементами конструкцій, руйнування яких може призвести до катастрофічних наслідків. Тому актуальною є проблема обґрунтування ресурсу цих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із методів підвищення опору матеріалів крихкому руйнуванню є попереднє термомеханічне навантаження (ПТН), після якого змінюється напружено-деформований стан біля вершини тріщини: виникають залишкові стискуючі напруження, вершина тріщини притуплюється та матеріал деформаційно зміцнюється [1]. ПТН може виникнути також при ситуаціях, коли відбувається примусове охолодження корпусу реактора, яке супроводжується значними термічними напруженнями в корпусі [2].

ПТН елементів конструкцій із тріщинами полягає в навантаженні елемента конструкції при температурі, що перевищує температуру зміни механізму руйнування від крихкого до в'язкого $T_{хв}$ (в умовах, коли матеріал елемента конструкції знаходиться у пластичному стані).

Згідно зі схемою навантаження до рівня КІН K_1 відбувається при підвищеній температурі T_1 , потім при тій же температурі конструкція розвантажується, після чого відбувається охолодження і кінцеве навантаження при температурі T_2 (рисунк 1).

Основні підходи до оцінювання крихкої міцності елементів конструкцій після ПТН засновані на концепції «майстер-кривої» [3], яка описує розкид в'язкості руйнування через кумулятивну ймовірність руйнування [4]

$$P_f = 1 - \exp\{-(K_{Jc} - K_{min})/(K_0 - K_{min})\}^4\}, \quad (1)$$

де K_{Jc} – пружнопластична в'язкість руйнування, визначена через J_c -інтеграл; K_{min} – найменше значення в'язкості руйнування; K_0 – нормалізована в'язкість руйнування, що відповідає ймовірності 63,2%.

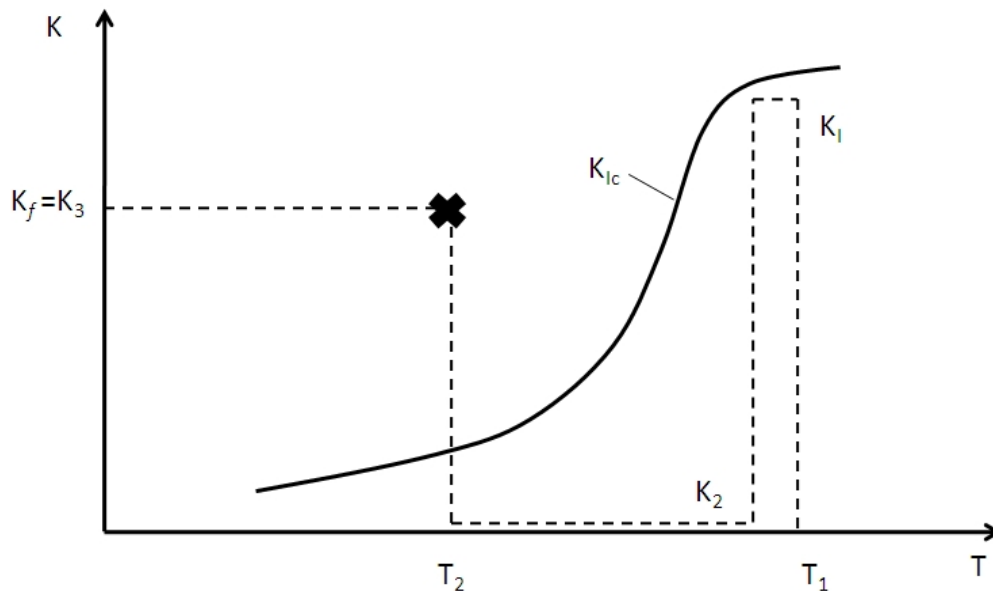


Рисунок 1 – Температурна залежність в'язкості руйнування на ділянці в'язко-крихкого переходу і відповідна зміна КІН (схематично)

Відомий підхід до оцінювання цілісності конструкцій, так звана процедура FITNET, яка побудована на основі SINTAP процедури і містить новітні європейські досягнення в області оцінювання структурної цілісності конструкційних елементів [5, 6]. У рамках цієї процедури розроблено двопараметричний критерій руйнування тіл із тріщинами — діаграма оцінювання руйнування (ДОР), яка дає змогу врахувати пластичність у вершині тріщини.

Вхідними параметрами, потрібними для прогнозування руйнування конструкції, є: геометричні параметри конструкцій та тріщини; параметри експлуатаційного навантаження; механічні властивості матеріалу.

Підхід FITNET є детермінованим, а тому не дає змоги врахувати невизначеність та існуючий розкид параметрів навантаження, геометрії конструкції та тріщини, механічних властивостей досліджуваного матеріалу, а також отримати ймовірність руйнування конструкції, яка є показником допустимості її подальшої експлуатації.

Тому важливою залишається задача оцінювання граничного стану елементів конструкцій із урахуванням розкиду параметрів, що входять у ДОР.

Координати розрахункової точки на ДОР, яка характеризує напружений стан елемента конструкції з тріщиною зображено на рисунку 2, визначають як [5]

$$K_r = \frac{K_{Ip}}{K_{mat}} + \frac{K_{Is}}{K_{mat}} + \rho, \quad L_r = \frac{P}{P_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{0,2}}, \quad (2)$$

де K_{Ip} і K_{Is} – КІН для прикладених і залишкових напружень відповідно; K_{mat} (K_{1c}) – в'язкість руйнування матеріалу; ρ – поправка на пластичність; P (або σ_{ref}) – прикладене навантаження (напруження); P_L (або границя текучості $\sigma_{0,2}$) – навантаження (напруження) на початку текучості матеріалу в ослабленому перерізі зразка. Криву оцінювання руйнування, $K_r = f(L_r)$, що відділяє безпечну ділянку від ділянки руйнування елемента конструкції, визначають за результатами випробувань зразків із тріщинами на в'язкість руйнування [5].

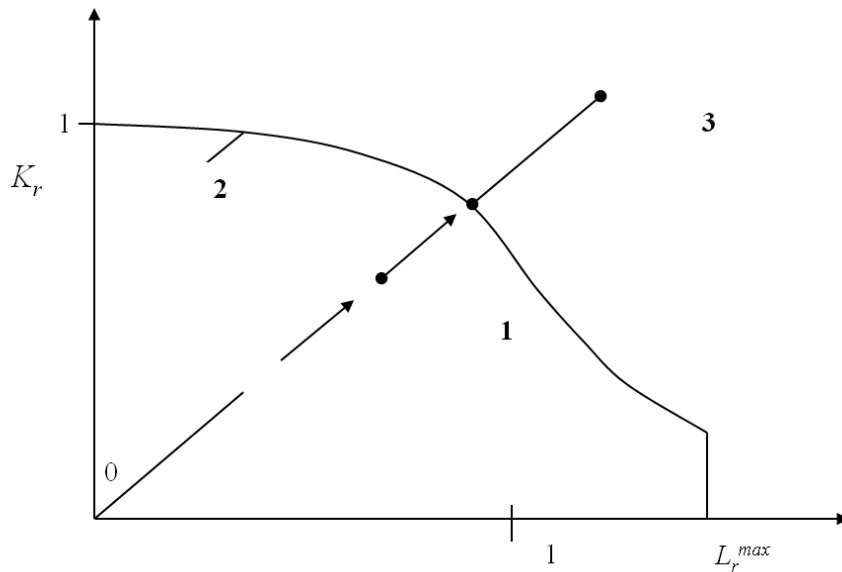


Рисунок 2 – Типова ДОР для елемента конструкції з тріщиною:

1 – безпечна ділянка; 2 – гранична крива; 3 – ділянка руйнування

Мета роботи. Оцінити ймовірність руйнування корпусів атомних реакторів після попереднього термомеханічного навантаження на основі ДОР із урахуванням статистичних розподілів: глибини тріщини a , внутрішнього тиску p , умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$, межі міцності σ_B та в'язкості руйнування матеріалу K_{Ic} .

Постановка задачі. Розглянемо об'єкт із тріщиною з випадковою варіацією механічних характеристик і геометричних розмірів під дією випадкового навантаження. Введемо функцію граничного стану $g(x)$, визначену на p -вимірному просторі випадкових змінних, де $g(x) \leq 0$ — область руйнування і $g(x) > 0$ — безпечна область. Тут x — p -вимірний випадковий вектор із компонентами $x_1, x_2, \dots, x_p$, який характеризує всі невизначеності системи і параметрів навантажування. Випадковому вектору x відповідає функція густини розподілу $f_X(x)$. Тоді ймовірність руйнування є багатовимірним означеним інтегралом

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) dx. \quad (3)$$

Для оцінювання ймовірності руйнування використовують дві різні функції граничного стану $g(x)$

$$\begin{aligned} g_{FAD}(x) &= g_{FAD}(K_{Ic}, \sigma_{0,2}, a) = f_{FAD} - K_r, \\ g_{L_r}^{\max}(x) &= g_{L_r}^{\max}(\sigma_{0,2}, \sigma_U, a) = L_r^{\max} - L_r, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\sigma_U = \sigma_B$ — межа міцності; a — розмір тріщини; L_r — відношення прикладеного напруження до напруження текучості матеріалу конструкції з тріщиною. Функції граничного стану ґрунтуються на аналізі першого рівня у стандартизованій процедурі SINTAP.

Розглядали корпус атомного реактора типу ВВЕР-440 зі сталі 15Х2МФА (III) після термообробки, що моделює властивості матеріалу в кінці терміну експлуатації та попереднього термомеханічного навантаження з повним (рисунок 3) та частковим розвантаженням при 423 K і КІН $K_I = 146 \dots 162 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [7]. Хімічний склад сталі (%) – 0,18С; 0,62Мо; 0,27Si; 0,29V; 0,48Mn; 2,58Cr; 0,019S; 0,16Ni; 0,013P; 0,011Ti [7].

Характеристики механічних властивостей сталі 15Х2МФА (III) за кімнатної температури наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Механічні властивості сталі 15Х2МФА (Ш)

$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
МПа		%	
1100	1160	16,6	67,2

Модель корпусу ВВЕР-440 зображено на рисунку 3. Товщина стінки $h=140$ мм, $2R_0=4130$ мм. Розглядали дефект у вигляді поверхневої півеліптичної тріщини на внутрішній стінці посудини тиску. Відношення півосей еліптичної тріщини $a/(b/2)$ дорівнює $2/3$. КІН при навантаженні посудини тиском p обчислювали за формулою [8]

$$K = \sigma_{\Theta} \sqrt{\pi a} Y, \text{ де} \quad (5)$$

$$Y = 1,14 - 0,48 \frac{a}{b} + \frac{1}{0,2 + 4,9 \left(\frac{a}{b} \right)^{1,2}} \left(\frac{a}{h} \right)^2, \quad \sigma_{\Theta} = \frac{p R_0}{h}.$$

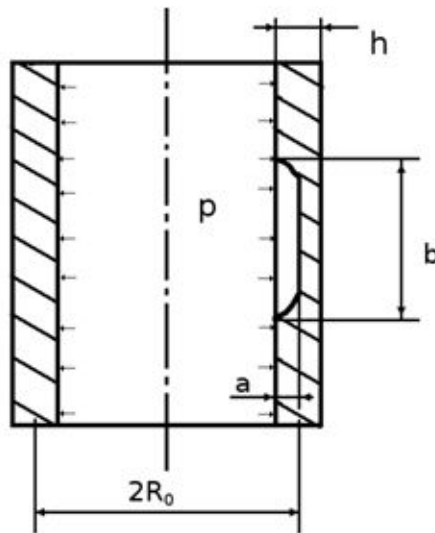


Рисунок 3 – Посудина тиску з тріщиною на внутрішній стінці

Внутрішній тиск p , механічні властивості ($\sigma_{0,2}$, σ_B) та критичний КІН після ПТН $K_{mat} = K_f$ розглядали як випадкові змінні, типи й параметри розподілів яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Типи й параметри розподілу вхідних даних

Вхідні дані	Тип розподілу	Параметри розподілу
p , МПа	нормальний	$\mu_p = 32,5$; $\sigma_p = 3,25; 4,875; 6,5$
$\sigma_{0,2}$, МПа	логарифмічно-нормальний	$x_0 = 1080$, $m = 20$, $\sigma = 0,4$
σ_B , МПа	логарифмічно-нормальний	$x_0 = 1140$, $m = 8$, $\sigma = 0,6$
K_{mat} , МПа $\sqrt{м}$	Вейбулла	$x_0 = 141$, $\beta = 14,39$, $\eta = 2,04$

Тиск гідровипробування становив 16,25 МПа. Середнє значення μ_p внутрішнього тиску вибрали вдвічі більшим за тиск при гідростатичному випробуванні.

Коефіцієнт варіації внутрішнього тиску p , який для нормального закону розподілу визначають як $cov_p = \frac{\sigma_p}{\mu_p}$, дорівнював 0,1; 0,15; 0,2; тут σ_p – стандартне відхилення параметра p . Глибину тріщини a вибирали дискретно від 16 мм до 30 мм із кроком 2 мм.

Ймовірність руйнування визначали методом Монте-Карло з вибіркою за значущістю (MCIS) та методом надійності першого порядку (FORM).

Метод Монте-Карло з вибіркою за значущістю дозволяє здійснювати проби в найважливішій частині області інтегрування. Вибірку беруть в околі найімовірнішої точки руйнування, яку визначають попередньо методом надійності першого порядку. Метод MCIS вимагає меншої кількості проб, ніж метод Монте-Карло.

Метод надійності першого порядку у частині відшукування найімовірнішої точки можна реалізовувати методом ітерацій, а тому здійснення проб не потрібне. Тому цей метод зручний для обчислення ймовірності руйнування у випадку її малих значень.

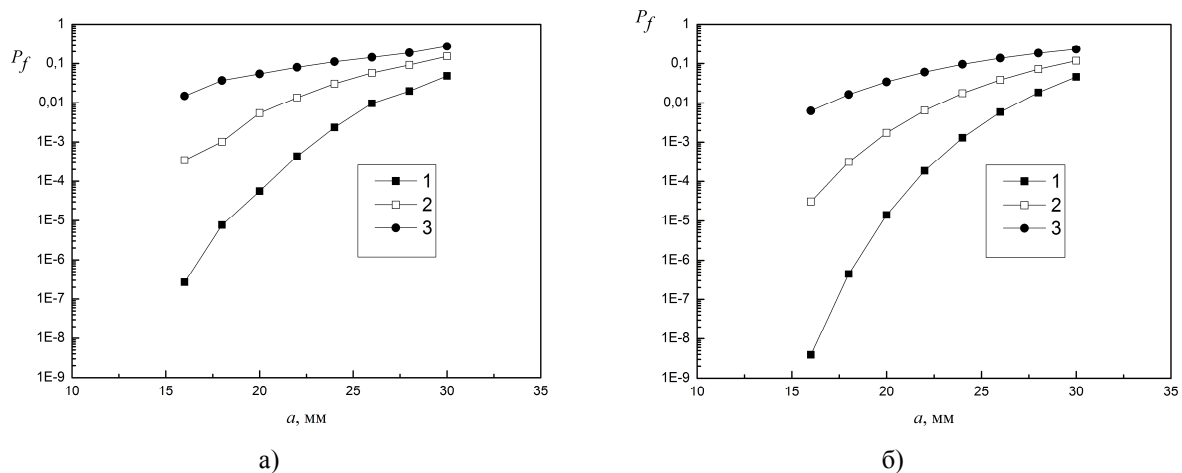


Рисунок 4 – Залежність ймовірності руйнування P_f від глибини тріщини a за змінного тиску для $cov_p=0,1$ (1); 0,15 (2); 0,2(3), обчислена методом MCIS – а) і FORM – б)

Результати дослідження. Одержано залежності ймовірності руйнування P_f моделі корпусу реактора від глибини тріщини a за випадково розподіленого тиску для різного коефіцієнта варіації cov_p внутрішнього тиску (0,1; 0,15; 0,2). Ймовірність обчислена за методом MCIS (рисунок 4а) та методом FORM (рисунок 4б). Зі збільшенням коефіцієнта варіації для заданої довжини тріщини ймовірність руйнування зростає. Ймовірність руйнування моделі корпусу атомного реактора, обчислена за методом FORM, у більшості випадків виявилася меншою порівняно з оцінкою цього параметра за методом MCIS, причому найбільша різниця спостерігається для менших довжин тріщини.

Для глибини тріщини $a=16,0$ мм і коефіцієнта варіації внутрішнього тиску $cov_p=0,1$ ймовірність руйнування, одержана за методом FORM приблизно на два порядки менша від обчисленої за методом MCIS. Зі зростанням cov_p до 0,15 ймовірність, обчислена за методом FORM, відрізняється від оцінки ймовірності за MCIS на один порядок.

Окрім того, побудовано ДОР та проведено проби за методом Монте-Карло для різних глибин тріщини (рисунок 5 – 1, 2, 3) для нормально розподіленого тиску із $\mu_p=32,5$ МПа за $cov_p=0,05$. Кількість проб дорівнювала 10^4 .

Отримані оцінки ймовірності руйнування наведено у таблиці 3.

Зі зростанням глибини тріщини ймовірність руйнування зростає. При зростанні глибини від 28 мм до 32 мм ймовірність збільшується в 16 разів.

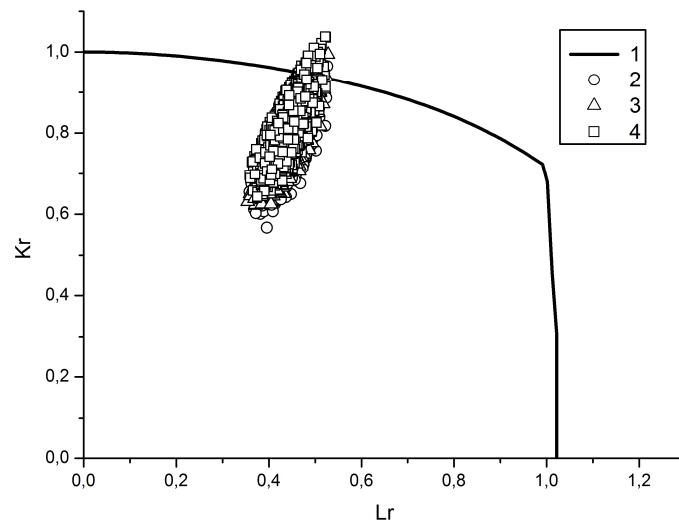


Рисунок 5 – ДОР моделі корпусу атомного реактора за змінного тиску для $cov_p=0,05$ для різної глибини тріщини a : 1 — FAD крива; 2 — $a=28$ мм; 3 — 30 мм ; 4 — 32 мм

Таблиця 3 – Ймовірність руйнування для різних глибин тріщин за методом Монте-Карло

Глибина тріщини, мм	Ймовірність руйнування
28	$2 \cdot 10^{-4}$
30	$3,2 \cdot 10^{-3}$
32	$1,35 \cdot 10^{-2}$

Висновки

Отримано залежності ймовірності руйнування моделі корпусу атомного реактора після попереднього термомеханічного навантаження від глибини тріщини a , що враховують розкид механічних властивостей та параметрів навантаження (нормально розподіленого внутрішнього тиску за різного коефіцієнта варіації cov_p) методами Монте-Карло із вибіркою за значущістю (MCIS) та методом надійності першого порядку (FORM). Для глибини тріщини $a=16,0$ мм і коефіцієнта внутрішнього тиску $cov_p=0,1$ ймовірність руйнування одержано за методом FORM на два порядки менша від обчисленої за методом MCIS. Побудовано діаграми оцінювання руйнування за методом Монте-Карло для різних глибин тріщини, розглядаючи тиск як нормально розподілену випадкову змінну. При зростанні глибини від 28 мм до 32 мм ймовірність збільшується в 16 разів.

Література

- Chell, G.G. The J-Integral as a Fracture Criterion: Perhaps It Doesn't Mean What You Thought It Meant / Chell, G.G., V. Vitek. // International Journal of Fracture. Vol. 13, p. 882–886, 1977.
- Rintamaa R. Consistence of fracture assessment criteria for the NESC-1 thermal shock test / Rintamaa R., Wallin K., Keinänen H., Planman T., Talja H. // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2001;78:125–35.
- Wallin K. Master Curve implementation of the warm pre-stress effect / Wallin K. // Engineering Fracture Mechanics. 70 (2003) 2587–2602.
- Wallin K. The scatter in KIC-results / Wallin K. // Engineering Fracture Mechanics. 1984; 19:1085–93.
- SINTAP: Structural Integrity assessment procedure for European Industry. Final procedure. Brite-Euram Project №BE95–1426. – British Steel, 1999. –189 p.
- FITNET FFS Procedure. Final Draft MK7, Prepared by European Fitness-for-Service Network-FITNET; 2006.
- Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиностійкість / Ясній П.В. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
- Helliot J. Fissures semi elliptiques axiales de grande longueur, debouchant a l'interieur d'un cylindre. – Creusot Loire, 1979. –237 p.

Одержано 26.03.2010 р.