

УДК 539.3

Сергій Кобельський, к.т.н., с.н.с.

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ВПЛИВ УРАХУВАННЯ ПЛАСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ МЕТАЛУ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

Анотація. У рамках змішаної проєкційно-сіткової схеми методу скінченних елементів досліджено декілька варіантів урахування пластичної анізотропії металу для оцінення її можливого впливу на опір руйнуванню корпусу реактора ВВЕР-1000.

Ключові слова: метод скінченних елементів, змішана схема, анізотропія, опір руйнуванню.

Serhiy Kobelsky, Ph.D.

INFLUENCE OF TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPIC PROPERTIES OF THE MATERIAL ON THE FRACTURE RESISTANCE OF THE VVER-1000 REACTOR VESSEL

Abstract. Within the framework of the mixed projection-grid scheme of the finite element method, several options for taking into account the anisotropic properties of the material are considered to assess its possible effect on the fracture resistance in comparison with consideration only in the isotropic formulation.

Keywords: finite element method, mixed scheme, anisotropy, fracture resistance.

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України (ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України) розроблено комплекс розрахункових методів та алгоритмів для розв'язання актуальних прикладних задач механіки деформованих конструкцій, що зазнають впливу інтенсивного механічного навантаження, підвищених температур та нейтронного опромінення за умов експлуатаційних і аварійних режимів навантажування. В основу розрахункового аналізу покладено концепцію змішаного методу скінченних елементів для розв'язання узагальнених крайових задач механіки у тривимірному поставленні, що описуються рівняннями стану еволюційного типу за теоріями термо-в'язко-пластичності та радіаційної повзучості з урахуванням деформаційної історії термосилового навантажування, радіаційних ефектів зміцнення, розпухання і повзучості, пластичної анізотропії та докритичного пошкодження матеріалу [1].

Для урахування анізотропних властивостей металу прийнято модель, згідно з якою головні осі девіатора напружень збігаються з осями анізотропії в кожній точці тіла, що перебуває у пластичному стані. Рівняння між компонентами напружень та пластичних деформацій для ортотропного середовища прийняті у такому вигляді [2]:

$$\begin{aligned} \lambda_{11kl}\sigma_{kl} &= \frac{2\bar{\sigma}_i}{3\varepsilon_i^p}\varepsilon_{11}^p, & \lambda_{1212}\tau_{12} &= \frac{1\bar{\sigma}_i}{3\varepsilon_i^p}\gamma_{12}^p, \\ \lambda_{22kl}\sigma_{kl} &= \frac{2\bar{\sigma}_i}{3\varepsilon_i^p}\varepsilon_{22}^p, & \lambda_{2323}\tau_{23} &= \frac{1\bar{\sigma}_i}{3\varepsilon_i^p}\gamma_{23}^p, \\ \lambda_{33kl}\sigma_{kl} &= \frac{2\bar{\sigma}_i}{3\varepsilon_i^p}\varepsilon_{33}^p, & \lambda_{1313}\tau_{13} &= \frac{1\bar{\sigma}_i}{3\varepsilon_i^p}\gamma_{13}^p, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\bar{\sigma}_i$ - інтенсивність девіатора напружень для модельного ізотропного тіла, ε_i^p - інтенсивність пластичних деформацій, ε_{ii}^p , γ_{ij}^p , σ_{kl} , τ_{ij} - компоненти тензорів

пластичних деформацій та напружень анізотропного тіла, λ_{ijkl} – компоненти тензора анізотропії ($i, j, k, l = 1, 2, 3$).

Рівняння (1) містять дев'ять незалежних параметрів анізотропії ($\lambda_{33kl} = -\lambda_{11kl} - \lambda_{22kl}$), з яких вісім є невідомими і можуть бути визначені із шести простих базових випробувань на розтяг та зсув. Значення коефіцієнта анізотропії $\lambda_{1111} = 2/3$ визначено з умови збігання кривих у координатах інтенсивність напружень – інтенсивність деформацій для анізотропного тіла і відповідного йому модельного ізотропного тіла.

Виходячи з вкрай обмежених результатів експериментальних досліджень закономірностей пружно-пластичного деформування анізотропних металевих матеріалів за умови складного напруженого стану, доцільно розглянути декілька варіантів урахування пластичної анізотропії металу, щоб оцінити їх можливий вплив на опір руйнуванню порівняно з аналізом лише в ізотропному поставленні.

Запропоновано таку процедуру розв'язання крайової задачі теорії пластичності для врахування анізотропних властивостей матеріалу. Отже, представимо тензор головних осей напружень у вигляді

$$[T] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2l_1n_1 & 2m_1n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2l_2n_2 & 2m_2n_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2l_3n_3 & 2m_3n_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & l_1m_2 + m_1l_2 & l_1n_2 + n_1l_2 & m_1n_2 + n_1m_2 \\ l_1l_3 & m_1m_3 & n_1n_3 & l_1m_3 + m_1l_3 & l_1n_3 + n_1l_3 & m_1n_3 + n_1m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + m_2l_3 & l_2n_3 + n_2l_3 & m_2n_3 + n_2m_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де l_i, m_i, n_i – компоненти векторів головних площинок ($i = 1, 2, 3$),

Окрім того, прийемо, що матриця параметрів анізотропії має вигляд

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} t_1 + t_2 & -t_1 & -t_2 \\ -t_3 & t_3 + t_4 & -t_4 \\ -t_5 & -t_6 & t_5 + t_6 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

за умови $t_1 + t_2 \geq t_3 + t_4 \geq t_5 + t_6$.

Тоді у разі покрокового розв'язання задачі теорії пластичності після визначення поточного стану вектора переміщень можна обчислити компоненти симетричного тензора деформацій, який представимо у векторній формі:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz}\}. \quad (4)$$

Компоненти симетричного тензора активних деформацій визначаються так

$$\{\varepsilon_a\} = \{\varepsilon_x - \varepsilon_{xp} \ \varepsilon_y - \varepsilon_{yp} \ \varepsilon_z - \varepsilon_{zp} \ \gamma_{xy} - \gamma_{xyp} \ \gamma_{xz} - \gamma_{xzp} \ \gamma_{yz} - \gamma_{yzp}\}, \quad (5)$$

тому компоненти девіатора тензора активних деформацій мають такий вигляд:

$$\{\varepsilon_d\} = \{\varepsilon_{xa} - \varepsilon_0 \ \varepsilon_{ya} - \varepsilon_0 \ \varepsilon_{za} - \varepsilon_0 \ \gamma_{xya} \ \gamma_{xza} \ \gamma_{yza}\}, \quad (6)$$

де $\varepsilon_0 = (\varepsilon_{xa} + \varepsilon_{ya} + \varepsilon_{za})/3$.

Позначимо $\{\varepsilon'_d\}$ девіатор активних деформацій, отриманий шляхом повертання вектора $\{\varepsilon_d\}$ на кути головних площин:

$$\{\varepsilon'_d\} = [T] \cdot \{\varepsilon_d\}. \quad (7)$$

Тоді після дії на нього матриці параметрів анізотропії $[\lambda]$ та зворотного повертання девіатор активних деформацій набуде вигляду:

$$\{\varepsilon''_d\} = [T'] \cdot [\lambda] \cdot [T] \cdot \{\varepsilon_d\}. \quad (8)$$

Після додавання середньої деформації ε_0 можна прийти до тензора активних деформацій та продовжити розв'язання пружно-пластичної задачі, визначивши нове значення січного модуля зсуву G .

Далі потрібно обчислити компоненти вектора девіатора напружень $\{\widehat{\sigma}_d\}$ через компоненти вектора девіатора деформацій $\{\varepsilon_d\}$

$$\{\widehat{\sigma}_d\} = \{\varepsilon_{dx}'' \cdot 2G \quad \varepsilon_{dy}'' \cdot 2G \quad \varepsilon_{dz}'' \cdot 2G \quad \gamma_{xy}'' \cdot G \quad \gamma_{xz}'' \cdot G \quad \gamma_{yz}'' \cdot G\} \quad (9)$$

та отримати новий вектор напружень $\{\sigma\}$, який буде використано для обчислення похибки на поточному кроці розв'язання задачі теорії пластичності.

Зауважмо, що вектор (8) залишається девіатором тільки у випадку, якщо матриця параметрів анізотропії має вигляд (3), тобто сума коефіцієнтів у рядку цієї матриці дорівнює нулю, хоча сама вона може бути і несиметричною.

Будемо розглядати такі варіанти матриці параметрів анізотропії $[\lambda]$:

$$1: [\lambda_1] = \begin{pmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{pmatrix}, \quad 2: [\lambda_2] = \begin{pmatrix} 4/5 & -2/5 & -2/5 \\ -2/5 & 4/5 & -2/5 \\ -2/5 & -2/5 & 4/5 \end{pmatrix},$$

які надалі будемо називати Анізотропія_1 та Анізотропія_2.

Значення $-1/3$ коефіцієнта в матриці $[\lambda_1]$ наведено в [3] для сплаву АМг6. Коефіцієнти матриці $[\lambda_2]$ обирали довільно.

Для аналізу опору руйнуванню корпусу реактора ВВЕР-1000 досліджували обраний режим аварійного охолодження із вкрапленням постульованої піднаплавної колової тріщини, розташованої на рівні четвертого зварного шва, глибиною 25 мм зі співвідношенням напівосей 0,3. Результати зіставляли з отриманими для ізотропної моделі. Розрахункові значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) визначали методами G -інтеграла [4] та віртуального закриття тріщини (VCCT) [5].

Для визначення максимально допустимої критичної температури крихкості металу використано такі підходи: дотичної точки [6], теплового опресування [6–7], спадної гілки [4].

У таблиці 1 наведено величини критичної температури крихкості, визначені для моделей, які було розглянуто. У табл. 2 наведено найбільш консервативні відносні оцінки у разі визначення максимально допустимої критичної температури крихкості.

Таблиця 1. Визначення величина $T_{ка}$ для колової тріщини

Модель	Метод визначення КІН			
	G	%	VCCT	%
підхід дотичної точки				
Ізотропна	95	100,00	99	100,00
Анізотропія_1	91	95,79	107	108,08
Анізотропія_2	95	100,00	111	112,12
підхід теплового опресування				
Ізотропна	54	100,00	56	100,00
Анізотропія_1	56	103,70	64	114,29
Анізотропія_2	47	87,04	54	90,43
підхід спадної гілки				
Ізотропна	78	100,00	79	100,00

Анізотропія_1	72	92,31	78	98,73
Анізотропія_2	62	79,49	68	86,08

Таблиця 2. Найбільш консервативні відносні оцінки у разі визначення максимально допустимої критичної температури крихкості

$\Delta T_{кр}, \%$	Підхід	Модель	Метод
86,79	дотичної точки	Анізотропія_2	G-інтеграл
87,04	теплового опресування	Анізотропія_2	G-інтеграл
79,49	спадної гілки	Анізотропія_2	G-інтеграл

Висновки. Розвинуто загальну теорію змішаної схеми методу скінченних елементів для розв’язання актуальних прикладних задач механіки пружно-пластичного деформування з урахуванням деформаційної історії термосилового навантажування та пластичної анізотропії металу. Запропоновано та реалізовано модифікацію процедури розв’язання крайової задачі теорії пластичності для врахування пластичної анізотропії металу.

Через відсутність експериментальних даних щодо анізотропних властивостей реакторної сталі марки 15X2НМФ, яка є основним металом корпусу ядерного реактора ВВЕР-1000, проаналізовано два варіанти матриці параметрів пластичної анізотропії.

Зроблено висновки про властивості коефіцієнтів цієї матриці:

- сума коефіцієнтів у рядку матриці повинна дорівнювати нулю;
- матриця не обов’язково повинна бути симетричною.

Як свідчить аналіз результатів, отриманих внаслідок проведення чисельного експерименту з використанням запропонованих моделей урахування пластичної анізотропії металу, оцінки визначення максимально допустимої критичної температури крихкості виявились консервативнішими порівняно з отриманими тими же методами для ізотропної моделі, що свідчить про необхідність проведення натурних випробувань для отримання достовірніших даних.

Перелік посилань

1. Чирков А.Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.
2. Ковальчук Б.И., Лебедев А.А., Уманский С.Э. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1987. – 280 с.
3. Ковальчук Б.И. К теории пластического деформирования анизотропных материалов. – Пробл. прочности. 1975, №9, – С. 8-12.
4. Харченко В.В., Чирков А.Ю. и др. Методы расчетного анализа в задачах прочности элементов оборудования реакторных установок ВВЭР. – К.: ИПМіс ім. Г.С.Писаренка НАН України, 2018. – 294 с.
5. Rybicki E.F., Kanninen M.F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. – Engng. Fract. Mech. 1977: 9(4): 931-938.
6. Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment // IAEA-TECDOC-1627. – Vienna, 2010. – 229 p.
7. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in VVER NPPs «VERLIFE». – Version 2008. – 275 p