https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.05.022
УДК 539.4

В.В. Харченко, https://orcid.org/0000-0002-5795-8792
Є.О. Кондряков, https://orcid.org/0000-0003-2805-5786
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
E-mail: kondryakov@ipp.kiev.ua

Визначення параметрів руйнування для оцінювання крихкої міцності елементів обладнання 1-го контуру АЕС

Представлена членом-кореспондентом НАН України О.Ю. Чирковим

Узагальнено результати комплексу експериментальних і розрахункових досліджень, спрямованих на оцінювання опору крихкому руйнуванню корпусів реакторів типу ВВЕР. Розглянуто інженерні методики визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень, їхні переваги, обмеження та особливості практичного застосування, а також можливості впровадження сучасних чисельних методів для підвищення достовірності розрахунків міцності відповідальних елементів першого контуру АЕС. Проаналізовано результати застосування розширеного методу скінченних елементів (XFEM) для експрес-оцінювання опору крихкому руйнуванню, зокрема для моделювання тріщин різної форми, розмірів і розташування без повторного формування скінченноелементної сітки. Наведено результати чисельного моделювання циліндричної та патрубкової зон корпусу реактора для характерного режиму термошоку, а також досліджено вплив геометричних параметрів тріщин на величину коефіцієнтів інтенсивності напружень та визначено найбільш небезпечні зони їх локалізації. Узагальнено результати чисельного моделювання процесу руйнування компактних зразків типів CT-0.5T, CT-0.16T та CT-0.5T з бічними канавками, виконаного методом XFEM. Для реакторної сталі 15Х2НМФА проаналізовано параметри критерію руйнування, особливості напружено-деформованого стану у вершині тріщини, кінетику її поширення та вплив геометрії зразків. Розглянуто можливості комплексного використання експериментальних досліджень та чисельного моделювання за допомогою XFEM для вдосконалення розрахункових процедур оцінювання міцності відповідальних елементів першого контуру АЕС.

Ключові слова: *корпус реактора, розширений метод скінченних елементів, опір крихкому руйнуванню, коефіцієнт інтенсивності напружень.*

Ц и т у в а н н я: Харченко В.В., Кондряков Є.О. Визначення параметрів руйнування для оцінювання крихкої міцності елементів обладнання 1-го контуру АЕС. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2026. № 5. С. 22—39. https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.05.022

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Вступ. Світова практика обґрунтування конструкційної цілісності критичних компонентів АЕС показує, що чинна в Україні нормативна база потребує вдосконалення для коректного оцінювання міцності та ресурсу елементів 1-го контуру АЕС.

Найбільш критичним елементом обладнання 1-го контуру АЕС вважається корпус реактора (КР), тому особлива увага приділяється розвитку методик оцінювання його міцності та прогнозування ресурсу. Як свідчить світовий досвід, строк експлуатації КР визначається розрахунками їхнього опору крихкому руйнуванню. Оцінювання крихкої міцності КР, з одного боку, потребує чисельних розрахунків коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) елементів КР із постульованою тріщиною в режимі термошоку, з іншого — необхідно знати поточний стан металу КР для побудови температурної кривої тріщиностійкості. Саме застосування сучасних вдосконалених розрахункових підходів та методик прогнозування ступеня деградації металу КР під час його експлуатації дає змогу достовірно оцінити довговічність та ресурс КР.

Контроль за станом металу КР протягом усього терміну експлуатації є однією з основних умов забезпечення надійної та безпечної експлуатації реактора і реакторної установки в цілому. Адже саме корпус є основним бар'єром безпеки реакторної установки, він не підлягає заміні з огляду на технічну та економічну доцільність, і практично його стан визначає ресурс усього енергетичного блока.

Необхідною умовою безпечної експлуатації реакторної установки ВВЕР-1000 є збереження температурного запасу в'язкості руйнування матеріалів корпусу реактора. З часом, внаслідок радіаційного окрихчування (РО), цей запас, тобто різниця між гранично допустимою критичною температурою крихкості ($T_к^a$) і фактичною ($T_к$), зменшується, збільшуючи ймовірність крихкого руйнування КР. Відповідно до норм ПНАЕ Г-7-002-86 [1], критична температура крихкості $T_к$ розглядається як один із ключових параметрів, що характеризують в'язкість руйнування корпусних матеріалів. Критична температура крихкості використовується для визначення меж безпеки для термогідравлічних параметрів під час регламентних гідравлічних випробувань КР. Розрахунки на крихку міцність КР для умов нормальної експлуатації, порушення умов нормальної експлуатації та в разі аварійних ситуацій також виконують з урахуванням результатів механічних випробувань зразків-свідків. Крім того, порівняння величини $T_к$ з гранично допустимою температурою крихкості $T_к^a$ дає змогу підтвердити проєктний ресурс КР і оцінити можливість продовження терміну його експлуатації. Отже, безпечна експлуатація КР ВВЕР-1000 забезпечується тільки в тому випадку, коли за будь-яких режимів роботи значення $T_к$ залишається нижчим за $T_к^a$.

З розвитком обчислювальної техніки і методів розрахунку задачу оцінювання опору крихкому руйнуванню відповідальних елементів обладнання першого контуру АЕС можна вирішити з досить високою точністю, проте на точність отримуваного рішення впливає багато факторів, які потребують окремого аналізу. В сучасних нормативних документах допускається застосування різних підходів, які передбачають використання для визначення КІН як інженерних методів [2, 3], так і скінченноелементних (СЕ) моделей (дво- та тривимірних) з вбудованою тріщиною [4, 5—10].

Оскільки розв'язання нестаціонарних і нелінійних крайових задач термомеханіки та задач механіки руйнування є складною чисельною процедурою, їхня практична реалізація може супроводжуватися значними обчислювальними витратами. Урахування

всього комплексу чинників, що впливають на опір металу руйнуванню, для повного спектра розрахункових варіантів навантаження конструкцій атомних електростанцій є складним і трудомістким завданням. Крім того, застосування відомих програмних комплексів, заснованих на методі скінченних елементів (МСЕ), у низці випадків може бути недостатньо ефективним для розв'язання практичних задач пружно-пластичного руйнування. Це пов'язано зі значною розмірністю дискретизованої задачі та істотною нелінійністю властивостей матеріалу в околі фронту тріщини, що за певних умов може призводити до погіршення збіжності або втрати чисельної стійкості обчислювального процесу [6].

Традиційні підходи до підвищення точності чисельного розв'язання, що ґрунтуються на згущенні СЕ-сітки або застосуванні скінченних елементів вищого порядку, не завжди забезпечують необхідну ефективність навіть для лінійних задач. Для нестаціонарних і нелінійних просторових задач термомеханіки їхнє застосування супроводжується істотним зростанням обчислювальних витрат, зумовленим збільшенням розмірності системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, кількості часових кроків та необхідних ітераційних процедур.

У зв'язку з цим актуальним є розвиток і застосування нових чисельних підходів та алгоритмів для розв'язання задач механіки руйнування. Поряд із класичним МСЕ розвиваються альтернативні та модифіковані чисельні підходи, зокрема змішані схеми МСЕ [6], градієнтні теорії пружно-пластичності [7] тощо.

Одним із перспективних підходів до чисельного моделювання процесів руйнування є розширений метод скінченних елементів (XFEM), який дає змогу моделювати наявність тріщини без необхідності її явного узгодження зі СЕ-сіткою [11—13]. Застосовуючи XFEM, можна виконувати розрахунки конструкцій із тріщинами різної форми, розмірів і розташування, зокрема у складних конструктивних вузлах, таких як патрубкові зони корпусів реакторів, для яких побудова якісної СЕ-моделі з явним моделюванням тріщини є складним завданням [14, 15].

Важливою перевагою XFEM у задачах механіки руйнування є можливість опису тріщини незалежно від топології СЕ-сітки. Завдяки цьому можна досліджувати як напружено-деформований стан конструкцій зі стаціонарними тріщинами [13, 16, 17], так і процес їхнього розвитку без необхідності перебудови СЕ-сітки [18, 19]. Крім того, відповідно до прийнятого критерію розвитку тріщини, метод забезпечує можливість визначення траєкторії її поширення в процесі чисельного моделювання.

Застосування методу XFEM для оцінювання крихкої міцності потенційно дає змогу виконувати параметричні дослідження для різних варіантів геометрії та розташування дефектів без необхідності багаторазової перебудови СЕ-моделей. Це створює можливість більш ефективного аналізу впливу параметрів тріщин і режимів термомеханічного навантаження на напружено-деформований стан конструкції та її схильність до крихкого руйнування, зокрема для визначення найнебезпечніших варіантів термошоку.

Крім того, для отримання точніших результатів доцільно використовувати методику "сабмоделінгу" [18, 19], яка добре себе зарекомендувала під час оцінювання міцності складних вузлів елементів обладнання.

У статті об'єднано результати комплексу досліджень, виконаних авторами в різні періоди [22, 27—29]. **Метою роботи** є їх систематизація та узагальнення з позицій

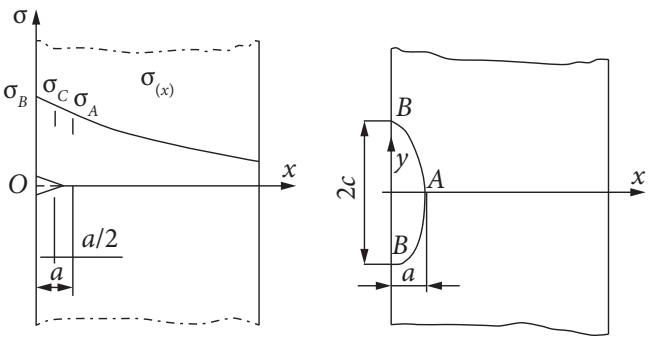


Рис. 1. Схематизація поверхневої тріщини [4]

застосування сучасних методів механіки руйнування для оцінювання опору крихкому руйнуванню відповідальних елементів обладнання першого контуру АЕС. Розглянуто інженерні методи визначення КІН, результати порівняння класичного МСЕ та XFEM для циліндричної частини КР, застосування "сабмоделінгу" та XFEM для патрубкової зони, а також моделювання руйнування компактних зразків різної геометрії. Окрему увагу приділено взаємозв'язку параметрів критеріїв руйнування з геометрією зразків та рівнем скутості деформацій.

Інженерні методи оцінювання КІН. Коефіцієнти інтенсивності напружень для поверхневих тріщин за будь-яких умов навантаження можуть бути визначені за допомогою інженерних методів, що ґрунтуються на розрахунку напруженого стану з використанням СЕ-моделей без вбудованої тріщини [4]. Розглянемо два такі методи.

Згідно з першим методом [2], КІН розраховується за формулою

$$K_I = \sigma_k Y a^{1/2},$$

де Y — коефіцієнт форми; a — довжина тріщини; σ_k — еквівалентні напруження.

Для оцінювання поверхневої тріщини (рис. 1) використовуються такі рівняння:

— у точці A (глибока точка)

$$Y = Y_A,\ \sigma_k = \sigma_{kA},$$

де

$$Y_A = \frac{2 - 0{,}82a/c}{\{1 - [0{,}89 - 0{,}57(a/c)^{1/2}]^3 (a/s)^{1{,}5}\}^{3{,}25}};$$

— у точці B (точка на поверхні)

$$Y = Y_B,\ \sigma_k = \sigma_{kB},$$

де

$$Y_B = [1{,}1 + 0{,}35\ (a/s)^2] \cdot (a/c)^{1/2} \cdot Y_A.$$

Еквівалентні напруження σ_k, необхідні для розрахунку КІН, визначаються за значеннями напружень σ_A, σ_B, σ_C у точках A, B та C, нормальних до площини тріщини.

Якщо напруження не змінюються по товщині стінки КР, то

$\sigma_{kA} = \sigma_{kB} = \sigma_A = \sigma_B$.

Якщо напруження по товщині стінки змінюються лінійно, то

$$\sigma_{kA} = 0,61\sigma_A + 0,39\sigma_B + \{0,11(a/c) - 0,28(a/s)[1-(a/c)^{1/2}]\}(\sigma_A - \sigma_B),$$

$$\sigma_{kB} = 0,18\sigma_A + 0,82\sigma_B.$$

Якщо напруження по товщині стінки змінюються за параболічним законом, то

$$\sigma_{kA} = 0,111(3\sigma_A + \sigma_B + 5\sigma_C) + 0,4(a/c)(0,38\sigma_A - 0,17\sigma_B - 0,21\sigma_C) -$$
$$-0,28(a/s)[1-(a/c)^{1/2}](\sigma_A - \sigma_B),$$

$$\sigma_{kB} = 0,64\sigma_B + 0,36\sigma_C.$$

Друга методика [3, 4] дає змогу оцінити значення КІН з урахуванням наявності наплавлення (рис. 2). Відповідно до цієї методики, розподіл напружень по товщині стінки КР описується поліномом третього або четвертого степеня (рис. 3):

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{x}{s+r} + \sigma_2 \left(\frac{x}{s+r}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{s+r}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{s+r}\right)^4.$$

Потім додаються напруження в наплавленому шарі, які апроксимуються за лінійним законом:

$$\sigma = \sigma_{0r} + \sigma_{r1} \frac{x}{s+r}.$$

Далі розраховуються коефіцієнти напружень $\sigma_0 \ldots \sigma_4$, σ_{0r} та σ_{1r}. Після визначення цих коефіцієнтів КІН можна обчислити за допомогою функцій впливу. Значення таких функцій наведено в табличному вигляді [4] для різних розмірів тріщини, товщини наплавлення і співвідношення модулів Юнга наплавлення та основного металу. Опираючись на табличні дані, можна розрахувати значення КІН для глибокої точки тріщини:

$$K_I = \left(\sigma_0 i_0 + \sigma_1 i_1 \frac{a+r}{s+r} + \sigma_2 i_2 \left(\frac{a+r}{s+r}\right)^2 + \sigma_3 i_3 \left(\frac{a+r}{s+r}\right)^3 + \sigma_4 i_4 \left(\frac{a+r}{s+r}\right)^4 + \right.$$
$$\left. + \sigma_{0r} i_{0r} + \sigma_{1r} i_{1r} \frac{a+r}{s+r} \right) \sqrt{\pi(a+r)},$$

а також точки на межі основний метал—наплавлення:

$$K_I = \left(\sigma_0 i_0 + \sigma_1 i_1 \frac{a+r}{s+r} + \sigma_2 i_2 \left(\frac{a+r}{s+r}\right)^2 + \sigma_3 i_3 \left(\frac{a+r}{s+r}\right)^3 + \sigma_4 i_4 \left(\frac{a+r}{s+r}\right)^4 \right) \sqrt{\pi a},$$

де a — глибина тріщини в основному металі; r — товщина наплавлення.

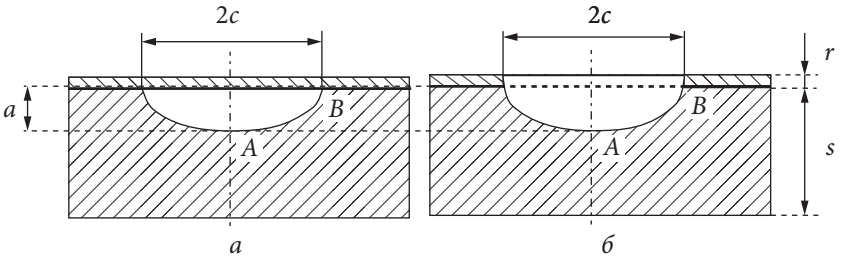


Рис. 2. Схематизація поверхневої (*б*) і піднаплавної (*а*) тріщини [4]

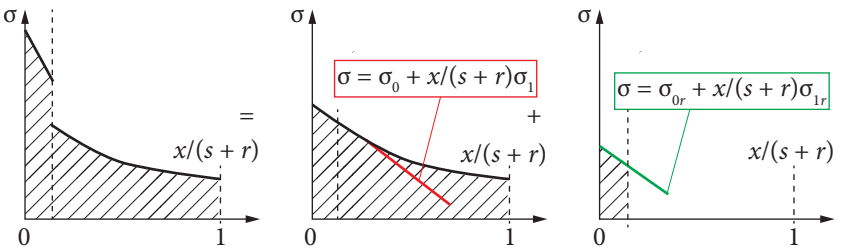


Рис. 3. Опис розподілу напружень по товщині стінки КР [4]

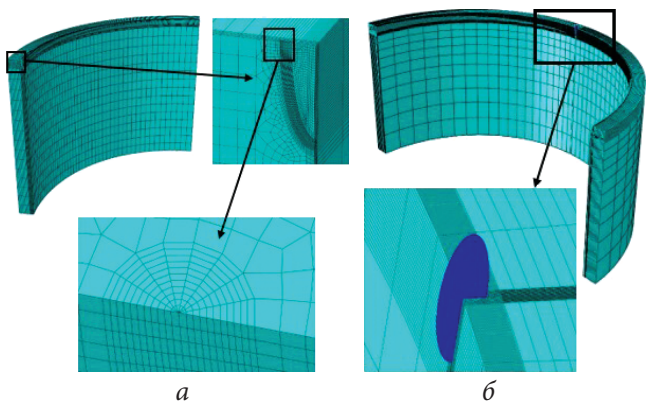


Рис. 4. Скінченноелементна модель циліндричної частини КР з вбудованою тріщиною (*а*) та в разі застосування методу XFEM (*б*)

Розрахунок КІН з вбудованою тріщиною. У більшості сучасних нормативних документів [4, 20] рекомендовано для розрахунку КІН застосовувати МСЕ з вбудованим у модель постульованим дефектом заданого розміру. Цей метод потребує використання достатньо щільної сітки в околі вершини тріщини, що призводить до збільшення розрахункового часу, проте він дає можливість отримати точніші результати та врахувати пружнопластичні ефекти.

Також у нормативних документах рекомендовано виконувати розрахунки для постульованих напівеліптичних тріщин зі співвідношеннями півосей $a/c = 0{,}3$ та 0,7 із розташуванням в осьовому та коловому напрямках. Приклад СЕ-сітки циліндричної частини КР з вбудованою постульованою напівеліптичною осьовою тріщиною зі співвідношенням півосей $a/c = 0{,}3$ та глибиною a =17 мм наведено на рис. 4, *а* [28].

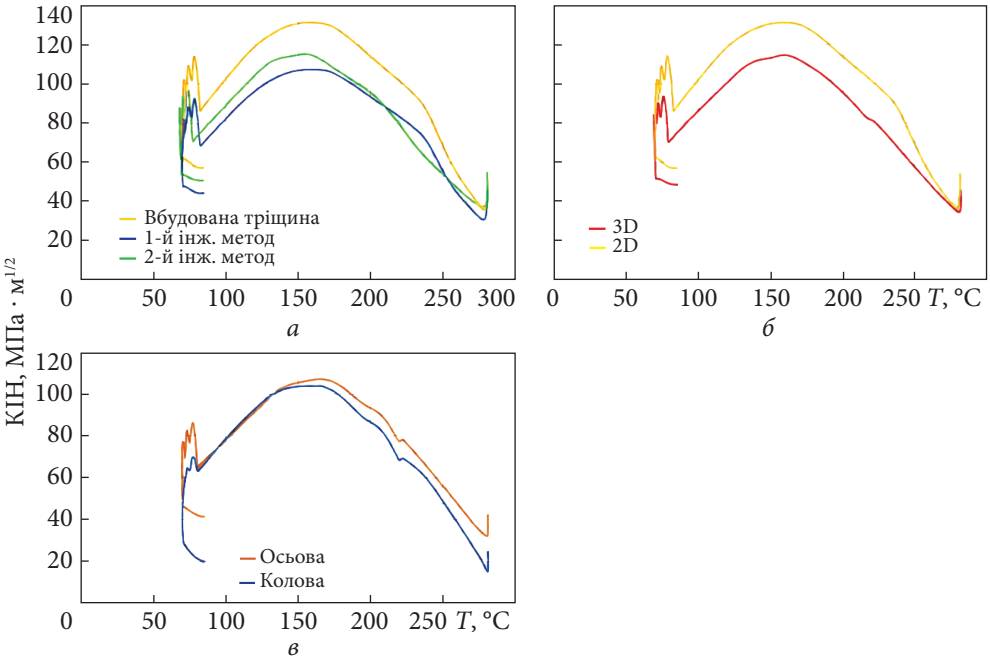


Рис. 5. Температурні залежності КІН: *а* — для осьової тріщини у двовимірній постановці, розраховані за першим та другим інженерними методами і методом вбудованої тріщини; *б* — для вбудованої осьової тріщини, розраховані з використанням 2D- та 3D-моделей; *в* — для колової та осьової тріщини (a/c = 0,3), розраховані за першим інженерним методом в 3D-постановці [28]

Із застосуванням описаних вище методик розрахунку КІН проведено чисельне моделювання циліндричної частини КР із постульованою тріщиною різних розмірів та орієнтацій [28]. Розрахунки виконано як для спрощених 2D-моделей, так і для тривимірних моделей із вбудованою тріщиною в пружній постановці з механічними характеристиками матеріалів згідно з [1] для одного з характерних аварійних режимів термошоку. На рис. 5, *а* наведено температурні залежності КІН для осьової напівеліптичної тріщини зі співвідношенням півосей a/c = 0,3, побудовані з використанням двох інженерних методів та чисельного методу для моделі з вбудованою тріщиною у двовимірній постановці. Видно, що результати, отримані за допомогою інженерних методів, досить близькі між собою, тоді як застосування чисельного розрахунку для моделі з вбудованою тріщиною у 2D-постановці дає завищені значення. Тому останнім часом для розрахунків опору крихкому руйнуванню зазвичай використовують тривимірні СЕ-моделі. З аналізу рис. 5, *б* випливає, що використання 3D-моделей дає можливість знизити консервативність результатів. Орієнтація тріщини також впливає на отримані результати. На рис. 5, *в* видно, що осьова тріщина для цього випадку є більш небезпечною, ніж колова з однаковими розмірами a/c = 0,3.

Застосування розширеного методу скінченних елементів. Метод XFEM, розроблений T. Belychko і T. Black [11] на основі МСЕ, є чисельним методом розв'язування диференціальних рівнянь із розривними функціями. Цей метод створено для подолання труднощів під час розв'язування задач із локалізованими сингулярностями, які неефективно

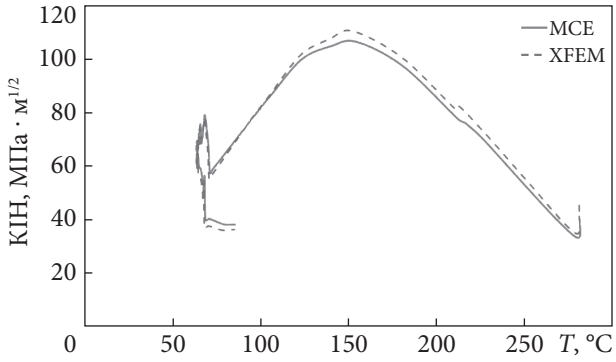


Рис. 6. Зміни КІН з температурою для осьової тріщини розміром a/c = 0,3 у циліндричній частині КР

розв'язуються класичним методом СЕ. Основна ідея методу XFEM полягає у використанні спеціальної апроксимації поля переміщень, яке може моделювати будь-які неоднорідні поверхні тріщини, і поля асимптотичних напружень біля вершини тріщини. При цьому немає потреби змінювати СЕ-сітку та вбудовувати тріщину в розрахункову модель, а достатньо лише мати досить густу СЕ-сітку в околі вершини тріщини для отримання точніших результатів.

Необхідність проведення розрахунків опору крихкому руйнуванню тріщин різного розміру, орієнтації та розташування (піднаплавна, з проникненням у наплавлення) змушує будувати окремі СЕ-сітки за допомогою класичного МСЕ [10] або застосовувати наближені інженерні та аналітичні методи [27]. Тому останнім часом метод XFEM часто застосовують для розрахунків опору крихкому руйнуванню елементів обладнання 1-го контуру АЕС.

Верифікацію застосування методу XFEM для циліндричної частини КР з осьовою тріщиною зі співвідношенням півосей a/c = 0,3 наведено в попередніх роботах авторів [27, 28]. СЕ-модель, що використовується для розрахунку методом XFEM, зображено на рис. 4, *б*. Отримані зміни КІН залежно від температури для характерного режиму термошоку мають гарну збіжність для обох методів (рис. 6).

Для розроблення методик розрахунку опору крихкому руйнуванню циліндричної частини елементів обладнання 1-го контуру АЕС проведено багато досліджень. Ці методики впроваджено в низці міжнародних нормативних документів. Водночас розрахунок опору крихкому руйнуванню складних вузлів елементів обладнання 1-го контуру АЕС є досить складним завданням. Насамперед це стосується патрубкової зони КР, для розрахунку опору крихкому руйнуванню якої на сьогодні немає єдиного підходу. Розроблення СЕ-моделей патрубкової зони з вбудованою тріщиною, особливо з урахуванням наявності наплавлення, є досить складним, тому метод XFEM набуває особливої актуальності для вирішення таких завдань.

Для отримання точніших результатів за економії розрахункового часу також можна застосовувати методику "сабмоделінгу". Ця методика полягає у "вирізанні" необхідної частини (конструктивного вузла) з глобальної моделі з прикладанням до площини розрізу граничних умов (переміщень), отриманих під час розрахунку глобальної моделі. У цьому випадку глобальна модель може мати достатньо розріджену сітку, що істотно скорочує час розрахунку. При цьому вирізана частина (сабмодель) може мати густішу сітку

і бути доповнена іншими геометричними елементами та умовами. Методика "сабмоделінгу" використовує принцип Сен-Венана, згідно з яким, якщо дійсні граничні умови на межі розрізу замінити еквівалентними граничними умовами для статичної задачі, то для складних геометричних вузлів з концентраторами напружень можна отримати досить точні результати. Останнім часом методика "сабмоделінгу" широко застосовується для оцінювання міцності та довговічності елементів обладнання 1-го контуру АЕС [18, 19], що дає можливість значно скоротити розрахунковий час та підвищити точність отриманих результатів.

Результати розрахунків патрубкової зони КР із використанням методу "сабмоделінгу" та XFEM наведено в попередніх публікаціях авторів [27, 29]. У межах комплексу досліджень розглядалися чотири тріщини завглибшки 29,4 мм (0,1 товщини стінки КР) зі співвідношенням півосей $a/c = 0{,}3$ та 0,7 в осьовому та коловому напрямках. При цьому осьові тріщини були розташовані у вхідних патрубках так, щоб площина тріщини утворювалася віссю патрубка і віссю КР, а головна вісь напівеліпса утворювала кут 45° із горизонтальною віссю (віссю патрубка). Колові тріщини повернуті на 90° відносно осьових (рис. 7).

На рис. 8 наведено динаміку зміни КІН залежно від температури для розглянутих тріщин. Як показано раніше [29], за однакових розмірів осьові тріщини характеризуються більшими значеннями КІН, ніж колові. При цьому тріщини зі співвідношенням півосей $a/c = 0{,}3$ (див. рис. 8, *а*) чутливіші до напрямку розташування, ніж тріщини зі співвідношенням півосей $a/c = 0{,}7$ (див. рис. 8, *б*).

Отже, наведені результати демонструють можливість застосування XFEM для експрес-аналізу впливу розмірів, форми та напрямку розташування тріщин у патрубковій зоні КР, а також для визначення найнебезпечніших тріщин з точки зору розрахунків опору крихкому руйнуванню [27, 29].

Моделювання поширення тріщини із застосуванням методу XFEM. Для підвищення точності розрахункової оцінки крихкої міцності обладнання АЕС важливо враховувати не лише умови ініціювання руйнування, а й подальшу поведінку тріщини. Нормативні процедури оцінювання цілісності корпусів реакторів, зокрема рекомендації VERLIFE, передбачають визначення умов виникнення крихкого руйнування та аналіз допустимості дефектів [4]. Моделювання процесів поширення та можливої зупинки тріщини дає змогу додатково врахувати зміну напружено-деформованого стану під час розвитку дефекту та більш обґрунтовано оцінювати граничний стан конструкції. Такий підхід є перспективним для уточнення розрахункової оцінки крихкої міцності корпусів реакторів за складних режимів термомеханічного навантаження.

Однією з ключових переваг методу XFEM є можливість моделювання не лише напружено-деформованого стану конструкції з тріщиною, а й процесів її зародження та подальшого поширення без необхідності перебудови СЕ-сітки. Це значно спрощує дослідження еволюції тріщин у конструкціях складної геометрії та робить метод XFEM ефективним інструментом для прогнозування процесів руйнування матеріалів [11, 13, 17—19, 24—26].

Для оцінювання можливостей застосування XFEM у моделюванні руйнування реакторних сталей у попередніх дослідженнях [22, 23] проведено чисельне моделювання випробувань компактних зразків зі сталі 15Х2НМФА на позацентровий розтяг. Механічні

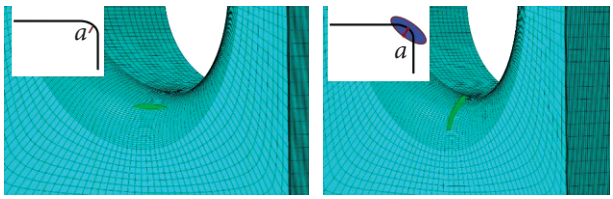


Рис. 7. Місце розташування колової (*а*) та осьової (*б*) тріщин у патрубковій зоні КР [27]

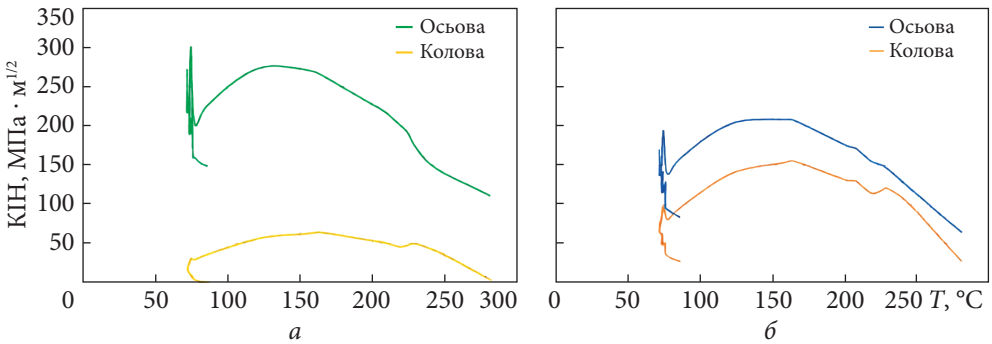


Рис. 8. Зміна КІН залежно від температури в патрубковій зоні КР для характерного режиму термошоку для осьової та колової тріщини зі співвідношенням a/c = 0,3 (*а*) і a/c = 0,7 (*б*)

характеристики матеріалу та енергетичні параметри руйнування визначалися за результатами експериментальних досліджень, наведених у цих роботах. Такий підхід забезпечує узгодження чисельної моделі з реальними властивостями матеріалу та підвищує достовірність прогнозування процесу розвитку тріщини. У цій статті відповідні результати узагальнено для зіставлення впливу геометрії зразків на процес розвитку тріщини.

У реалізації XFEM процес руйнування описується двома взаємопов'язаними критеріями: критерієм ініціювання тріщини та критерієм її розвитку. Критерій ініціювання визначає момент зародження тріщини, тоді як критерій розвитку описує подальшу деградацію матеріалу та кінетику поширення фронту тріщини. У дослідженнях, узагальнених у цій статті, за критерій початку руйнування приймалося досягнення розрахунковим максимальним головним напруженням у вершині тріщини критичного значення σ_c = 820 МПа, що відповідає межі міцності сталі 15Х2НМФА [22]. Для опису розвитку тріщини використано енергетичний критерій, параметром якого є енергія руйнування G_c.

Значення G_c не є універсальною характеристикою, а залежить від прийнятого способу її визначення та умов експерименту [24—26]. У попередньому дослідженні [22] параметр G_c визначався шляхом калібрування за результатами порівняння чисельного моделювання з експериментальними діаграмами навантаження "зусилля — переміщення" для компактного зразка СТ-0.16Т. Для аналізу було використано три значення енергії руйнування, визначені різними методами. Порівняння експериментальних і розрахункових залежностей (рис. 9), наведене в [22], показало, що найкраща збіжність досягається за значення G_c = 235 000 Н/м, визначеного за результатами випробувань компактних СТ-зразків через критичне значення J-інтеграла.

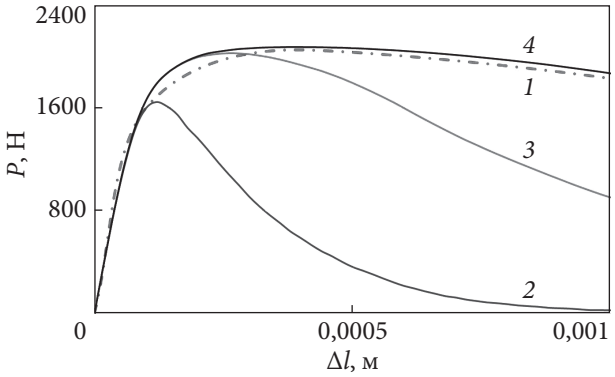


Рис. 9. Порівняння експериментальних (*1*) та розрахункових діаграм залежності зусилля P від переміщення Δl за значень G_c 680 Н/м (*2*), 69 000 Н/м (*3*) та 235 000 Н/м (*4*)

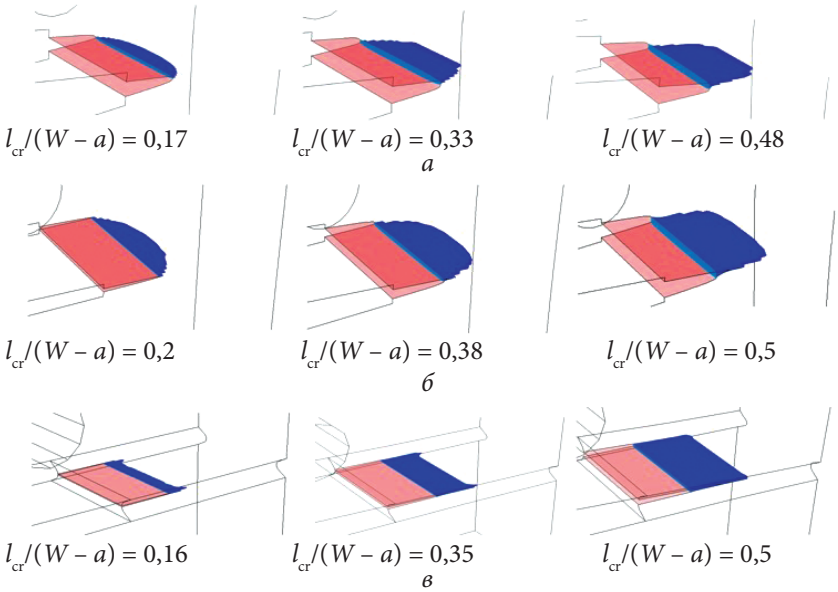


Рис. 10. Кінетика поширення тріщини у зразках CT-0.5T (*а*), CT-0.16T (*б*) та CT-0.5T з бічними канавками (*в*): l_{cr} — довжина тріщини; W — ширина зразка; a — початкова довжина тріщини

Додатково проаналізовано можливість визначення питомої енергії руйнування за результатами інструментальних ударних випробувань зразків Шарпі [23]. Попри простоту такого підходу, його застосування супроводжується певними обмеженнями, пов'язаними з впливом швидкості навантаження, формуванням бічних утягувань та додатковими витратами енергії на пластичне деформування. Дослідження показали, що використання зразків Шарпі з бічними канавками дає змогу істотно зменшити зазначені ефекти і досягти показників G_c, які добре узгоджуються з результатами випробувань компактних зразків.

Після визначення параметрів критерію руйнування в дослідженні [22] було змодельовано процес розвитку тріщини в компактних зразках трьох типів: CT-0.5T, CT-0.16T та CT-0.5T з бічними канавками (рис. 10). У цій статті результати цього дослідження

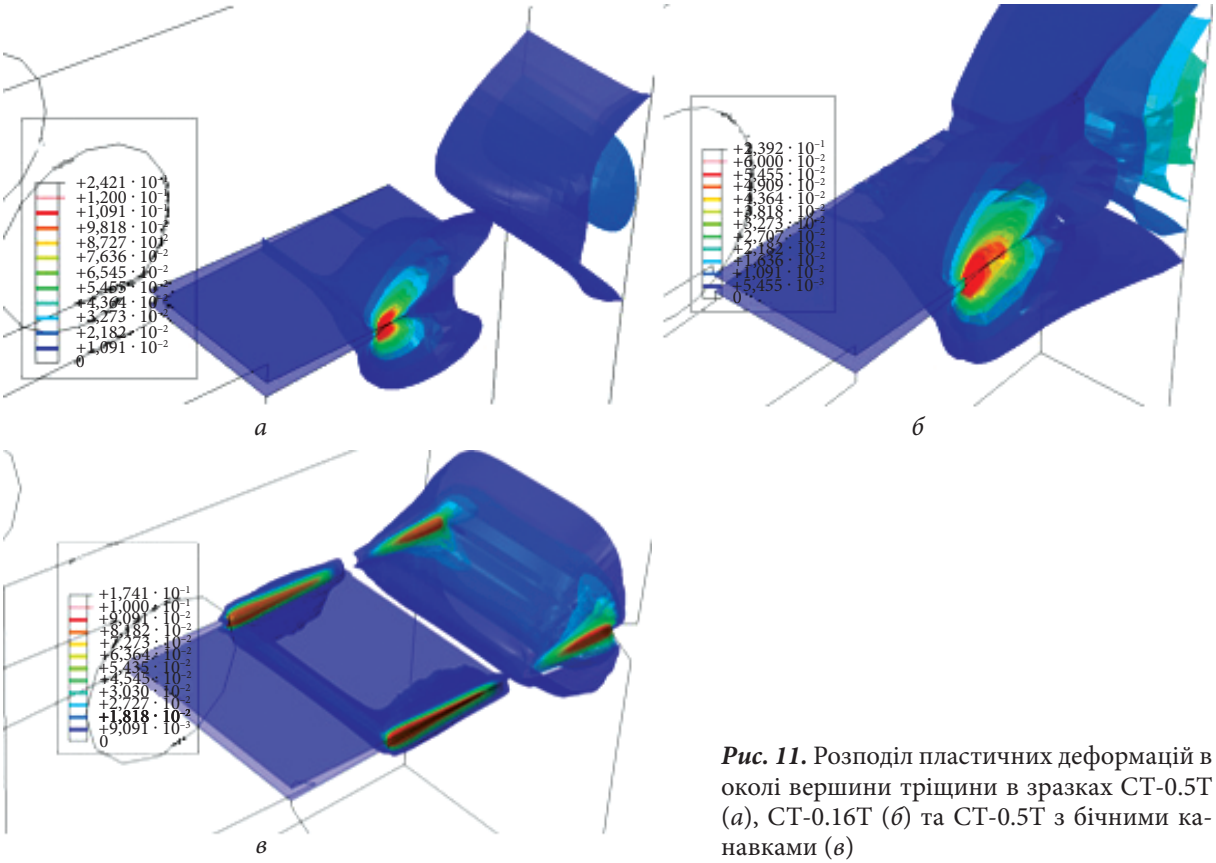


Рис. 11. Розподіл пластичних деформацій в околі вершини тріщини в зразках CT-0.5T (*а*), CT-0.16T (*б*) та CT-0.5T з бічними канавками (*в*)

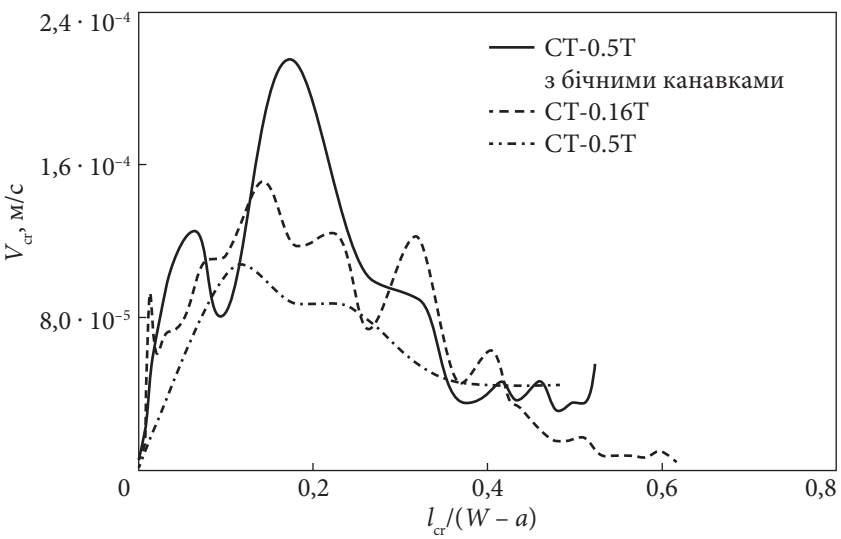


Рис. 12. Зміна швидкості поширення тріщини у всіх типах зразків залежно від її нормалізованої довжини

узагальнено разом з іншими даними для аналізу впливу геометрії зразка на характер поширення тріщини.

У зразках CT-0.5T та CT-0.16T фронт тріщини впродовж практично всього процесу руйнування має виражену криволінійну форму. При цьому швидкість росту тріщини в центральній частині зразка більша, ніж поблизу його вільних поверхонь, що свідчить про істотний вплив просторового напружено-деформованого стану та неповне виконання умов плоскої деформації. Саме ця обставина може бути однією з причин додаткової похибки під час визначення характеристик тріщиностійкості за результатами випробувань компактних зразків невеликої товщини.

Інша картина спостерігається у зразках із бічними канавками. Наявність канавок забезпечує підвищення скутості деформацій поблизу вершини тріщини та сприяє вирівнюванню її фронту. У процесі розвитку руйнування довжина тріщини по всій товщині зразка стає практично однаковою, що свідчить про наближення умов випробувань до плоскої деформації та забезпечує більш коректне визначення характеристик тріщиностійкості.

На рис. 11 показано розподіл пластичних деформацій у різних типах зразків. Видно, що у мініатюрних зразках (рис. 11, *б*) зона пластичних деформацій в околі вершини тріщини більш виражена порівняно зі зразками 0.5T (рис. 11, *а*). У зразках з бічними канавками ця зона значно менша і однорідна по товщині зразка (рис. 11, *в*).

Аналіз швидкості поширення тріщини V_{cr} (рис. 12) також підтвердив істотний вплив геометрії зразка. Попри підвищений рівень скутості деформацій, максимальна швидкість росту тріщини в зразках з бічними канавками приблизно на 40 % перевищує відповідне значення для стандартних компактних зразків. Крім того, встановлено, що мініатюрні зразки CT-0.16T характеризуються більшою швидкістю розвитку тріщини порівняно зі зразками CT-0.5T, що обумовлено підвищеним рівнем локальних напружень у вершині тріщини.

Узагальнені результати досліджень [22, 23] показують ефективність застосування XFEM для моделювання зародження та поширення тріщини в реакторній сталі 15Х2НМФА та для аналізу впливу геометрії зразків на кінетику розвитку тріщини. Встановлено, що характеристики процесу руйнування істотно залежать від рівня скутості деформацій у вершині тріщини, тому використання компактних CT-зразків і зразків Шарпі з бічними канавками дає змогу відтворити умови, наближені до плоскої деформації, які характерні для товстостінних елементів обладнання АЕС. Отримані результати підтверджують важливість урахування рівня скутості деформацій і геометрії зразків під час визначення параметрів критеріїв руйнування та їх подальшого використання в розрахункових моделях XFEM. Можливість застосування визначених параметрів для моделювання розвитку тріщин у товстостінних елементах обладнання АЕС потребує окремого обґрунтування з урахуванням особливостей їх напружено-деформованого стану та умов експлуатаційного навантаження.

Висновки.

1. Проаналізовано та узагальнено сучасні інженерні й чисельні підходи до оцінювання опору крихкому руйнуванню корпусів реакторів атомних електростанцій за умов термошоку. Інженерні методики забезпечують прийнятну точність для типових конфігурацій дефектів, однак вони мають обмеження в разі оцінювання конструкцій складної геометрії та дефектів довільної форми.

2. Узагальнено результати застосування XFEM для експрес-оцінювання опору крихкому руйнуванню циліндричної та патрубкової зон корпусу реактора. Обґрунтовано доцільність його використання для параметричного аналізу впливу характеристик дефектів і режимів термомеханічного навантаження на значення коефіцієнтів інтенсивності напружень, що створює передумови для визначення найнебезпечніших поєднань параметрів тріщин і режимів термошоку.

3. Зведено дані чисельного моделювання процесу руйнування компактних зразків CT-0.5T, CT-0.16T та CT-0.5T з бічними канавками з використанням методу XFEM. Показано, що параметри критерію руйнування для сталі 15Х2НМФА, що забезпечують відтворення процесу розвитку тріщини, можна визначати шляхом зіставлення розрахункових та експериментальних даних.

4. Встановлено, що геометрія компактних зразків істотно впливає на характер поширення тріщини, рівень скутості деформацій та швидкість її розвитку. Наявність бічних канавок сприяє вирівнюванню фронту тріщини і забезпечує умови, близькі до плоскої деформації, що підвищує достовірність визначення характеристик тріщиностійкості.

5. Результати комплексу досліджень підтверджують доцільність поєднання експериментальних досліджень і чисельного моделювання із застосуванням методу XFEM для вдосконалення розрахункових методик оцінювання міцності корпусів реакторів та інших відповідальних елементів обладнання 1-го контуру АЕС.

Наведені результати досліджень використовувалися в межах міжнародного проєкту TAREG 2.01/00 під час виконання державної експертизи робіт з обґрунтування міцності та опору руйнуванню корпусів реакторів ВВЕР-1000 на енергоблоках Запорізької, Рівненської та Південноукраїнської АЕС, а також у роботах із продовження ресурсу та безпечної експлуатації енергоблоків № 1, 2, 3 ВП "Рівненська АЕС".

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
2. МР 108.7-86. Методические рекомендации. Оборудование энергетическое. Расчеты и испытания на прочность. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений. Москва: ЦНИИТМАШ, 1986.
3. Marie S., Chapuliot S. Improvement of the calculation of the stress intensity factors for underclad and through-clad defects in a reactor pressure vessel subjected to a pressurised thermal shock. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 2008. **85**. P. 517—531. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.02.006
4. VERLIFE: Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation. European Commission, 2008.
5. Харченко В.В., Кондряков Е.А. Численное моделирование распространения и остановки трещины в корпусе реактора. *Надёжность и долговечность машин и сооружений*. 2007. № 29. С. 163—168.
6. Харченко В.В., Чирков А.Ю., Кобельский С.В., Кравченко В.И. Методы расчетного анализа в задачах прочности элементов оборудования реакторных установок ВВЭР. Киев: Институт проблем прочности имени Г.С. Писаренко НАН Украины, 2018. 293 с. https://doi.org/10.5281/zenodo.17181805
7. Chirkov A.Y., Nazarenko L., Altenbach H. Plane crack problems within strain gradient elasticity and mixed finite element implementation. *Comput. Mech*. 2024. **74**. P. 703—721. https://doi.org/10.1007/s00466-024-02451-x.
8. Qian G., Niffenegger M. Integrity analysis of a reactor pressure vessel subjected to pressurized thermal shocks by considering constraint effect. *Eng. Fract. Mech*. 2013. **112—113**. P. 14—25. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.09.009

9. González-Albuixech V.F., Qian G., Sharabi M., Niffenegger M., Niceno B., Lafferty N. Integrity analysis of a reactor pressure vessel subjected to a realistic pressurized thermal shock considering the cooling plume and constraint effects. *Eng. Fract. Mech.* 2016. **162**. P. 201—217. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.05.010
10. Choi S., Surh H.-B., Kim J.-W. Effect of postulated crack location on the pressure-temperature limit curve of reactor pressure vessel. *Nucl. Eng. Technol*. 2019. **51**. P. 1681—1688. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.004
11. Belytschko T., Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Engng*. 1999. **45**. P. 601—620. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5%3C601::AID-NME598%3E3.0.CO;2-S
12. González-Albuixech V.F., Qian G., Niffenegger M. Integrity analysis of reactor pressure vessels subjected to pressurized thermal shocks by XFEM. *Nucl. Eng. Des*. 2014. **275**. P. 336—343. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.038
13. Mora D.F., Niffenegger M., Qian G., Jaros M., Niceno B. Modelling of reactor pressure vessel subjected to pressurized thermal shock using 3D-XFEM. *Nucl. Eng. Des*. 2019. **353**. 110237. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110237
14. Chapuliot S. Stress intensity factor calculation in sharp and beveled edge nozzle corners. *Int. J. Press. Vessels Pip*. 2016. **141**. P. 11—18. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.03.015
15. Liu R., Huang M., Peng Y., Wen H.-Y., Huang J.-J., Ruan C.-H., Ma H.-S., Li Q. Analysis for crack growth regularities in the nozzle-cylinder intersection area of reactor pressure vessel. *Ann. Nucl. Energy*. 2018. **112**. P. 779—793. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.021
16. Sun X., Chai G., Li X. Effect of plasticity of the cladding with different thicknesses on the bearing capacity of the brittle base wall of RPV under PTS loads. *Heliyon*. 2023. **9**, № 3. e14902. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14902
17. Bashir R., Xue H., Zhang J., Guo R., Hayat N., Li G., Bi Y. Effect of XFEM mesh density (mesh size) on stress intensity factors (K), strain gradient ($d\varepsilon/dr$) and stress corrosion cracking (SCC) growth rate. *Structures*. 2020. **25**. P. 593—602. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.037
18. Marenić E., Skozrit I., Tonković Z. On the calculation of stress intensity factor and J-integrals using the submodeling technique. *J. Pressure Vessel Technol.* 2010. **132**, № 4. 041203. https://doi.org/10.1115/1.4001267
19. Kim T.-W., Lee G.-M., Choi W.-S., Jeong K.-H., Kim K.-K., Kim J.-I. Application of submodel method for the structural analysis of integral reactor internals. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting* (Busan, Korea, 27—28 October 2005). Busan, 2005. 3 p.
20. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР при эксплуатации (МРКР-СХР-2004) : РД ЭО 0606-2005. Санкт-Петербург; Москва, 2004. 65 с.
21. Li Y., Jin T., Wang Z., Wang D. Engineering critical assessment of RPV with nozzle corner cracks under pressurized thermal shocks. *Nucl. Eng. Technol*. 2020. **52**. P. 2638—2651. https://doi.org/10.1016/j.net.2020.04.019
22. Kondryakov E., Kravchuk A., Kharchenko V., Bulakh P. Experimental and calculation methods for fracture toughness estimation using different types of CT specimens. *Procedia Struct. Integr.* 2024. **59**. P. 50—57. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.009
23. Kravchuk A.V., Kondryakov E.O., Kharchenko V.V., Chyzhyk H.V. Scale factor and stress state type effects on energy characteristics of 15Kh2NMFA-A steel in impact bending tests considering anisotropy. *Strength Mater.* 2025. **57**, № 5. P. 921—938. https://doi.org/10.1007/s11223-025-00823-z
24. Qian Y., Zhao J. Fracture toughness calculation method amendment of the dissimilar steel welded joint based on 3D XFEM. *Metals*. 2019. **9**, № 5. 509. https://doi.org/10.3390/met9050509
25. Yu Z., Zhang J., Shen J., Chen H. Simulation of crack propagation behavior of nuclear graphite by using XFEM, VCCT and CZM methods. *Nucl. Mater. Energy*. 2021. **29**. 101063. https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.101063
26. Abdellah M.Y., Alharthi H. Fracture toughness and fatigue crack growth analyses on a biomedical Ti-27Nb alloy under constant amplitude loading using extended finite element modelling. *Materials*. 2023. **16**, № 12. 4467. https://doi.org/10.3390/ma16124467
27. Kondryakov, Ie. State-of-the-art methods of material's current state assessment and life-time prediction for NPP primary circuit equipment. *Advances in mechanics*. Advanced Structured Materials, Vol. 191. Cham: Springer, 2023. P. 251—265. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8_15

28. Kondryakov E.O. Application of modern approaches to the numerical modeling of the stress-strain state for the strength assessment of complex units of the NPP primary circuit equipment. Part 2. Extended finite element method. *Strength Mater*. 2023. **55**, № 5. P. 888—897. https://doi.org/10.1007/s11223-023-00579-4
29. Kondryakov E.O., Kharchenko V.V. Application of modern approaches to the numerical modeling of the stress-strain state for the strength assessment of complex units of the NPP primary circuit equipment. Part 3. Application of submodeling technique and extended finite element method for calculation of the reactor pressure vessel nozzle zone. *Strength Mater*. 2024. **56**, № 3. P. 467—476. https://doi.org/10.1007/s11223-024-00662-4

Надійшла до редакції 09.09.2026

REFERENCES

1. PNAE G-7-002-86. Rules for strength calculations of equipment and pipelines of nuclear power installations. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
2. MR 108.7-86. Methodical recommendations: Power components. Calculations and strength experiments. Calculation of stress intensity factors. Moscow: CNIITMASH, 1986 (in Russian).
3. Marie, S., & Chapuliot, S. (2008). Improvement of the calculation of the stress intensity factors for underclad and through-clad defects in a reactor pressure vessel subjected to a pressurised thermal shock. Int. J. Press. Vessels Pip., 85, pp. 517-531. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.02.006
4. VERLIFE: Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation. European Commission, 2008.
5. Kharchenko, V. V. & Kondryakov, E. A. (2007). Numerical modeling of crack propagation and arrest in a reactor vessel. Reliability and Durability of Machines and Structures, 29, pp. 163-168 (in Russian).
6. Kharchenko, V. V., Chirkov, A. Yu., Kobelsky, S. V. & Kravchenko, V. I. (2018). Methods of computational analysis in strength problems of equipment components of VVER reactor installations. Kyiv: G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine (in Russian). https://doi.org/10.5281/zenodo.17181805
7. Chirkov, A. Y., Nazarenko, L. & Altenbach, H. (2024). Plane crack problems within strain gradient elasticity and mixed finite element implementation. Comput. Mech., 74, pp. 703-721. https://doi.org/10.1007/s00466-024-02451-x
8. Qian, G. & Niffenegger, M. (2013). Integrity analysis of a reactor pressure vessel subjected to pressurized thermal shocks by considering constraint effect. Eng. Fract. Mech., 112-113, pp. 14-25. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.09.009
9. González-Albuixech, V. F., Qian, G., Sharabi, M., Niffenegger, M., Niceno, B. & Lafferty, N. (2016). Integrity analysis of a reactor pressure vessel subjected to a realistic pressurized thermal shock considering the cooling plume and constraint effects. Eng. Fract. Mech., 162, pp. 201-217. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.05.010
10. Choi, S., Surh, H.-B. & Kim, J.-W. (2019). Effect of postulated crack location on the pressure-temperature limit curve of reactor pressure vessel. Nucl. Eng. Technol., 51, pp. 1681-1688. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.004
11. Belytschko, T. & Black, T. (1999). Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. Int. J. Numer. Meth. Engng., 45, pp. 601-620. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5%3C601::AID-NME598%3E3.0.CO;2-S
12. González-Albuixech, V. F., Qian, G. & Niffenegger, M. (2014). Integrity analysis of reactor pressure vessels subjected to pressurized thermal shocks by XFEM. Nucl. Eng. Des., 275, pp. 336-343. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.038
13. Mora, D. F., Niffenegger, M., Qian, G., Jaros, M. & Niceno, B. (2019). Modelling of reactor pressure vessel subjected to pressurized thermal shock using 3D-XFEM. Nucl. Eng. Des., 353, 110237. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110237
14. Chapuliot, S. (2016). Stress intensity factor calculation in sharp and beveled edge nozzle corners. Int. J. Press. Vessels Pip., 141, pp. 11-18. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.03.015
15. Liu, R., Huang, M., Peng, Y., Wen, H.-Y., Huang, J.-J., Ruan, C.-H., Ma, H.-S. & Li, Q. (2018). Analysis for crack growth regularities in the nozzle-cylinder intersection area of reactor pressure vessel. Ann. Nucl. Energy, 112, pp. 779-793. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.021

16. Sun, X., Chai, G. & Li, X. (2023). Effect of plasticity of the cladding with different thicknesses on the bearing capacity of the brittle base wall of RPV under PTS loads. Heliyon, 9, No. 3, e14902. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14902
17. Bashir, R., Xue, H., Zhang, J., Guo, R., Hayat, N., Li, G. & Bi, Y. (2020). Effect of XFEM mesh density (mesh size) on stress intensity factors (*K*), strain gradient ($d\varepsilon/dr$) and stress corrosion cracking (SCC) growth rate. Structures, 25, pp. 593-602. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.037
18. Marenić, E., Skozrit, I. & Tonković, Z. (2010). On the calculation of stress intensity factor and *J*-integrals using the submodeling technique. J. Press. Vessel Technol., 132, No. 4, 041203. https://doi.org/10.1115/1.4001267
19. Kim, T.-W., Lee, G.-M., Choi, W.-S., Jeong, K.-H., Kim, K.-K. & Kim, J.-I. (2005, October). Application of submodel method for the structural analysis of integral reactor internals. In: Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting (3 pp.). Busan.
20. Methodology for calculating resistance to brittle fracture of WWER reactor pressure vessels during operation (MRKR-SHR-2004): RD EO 0606-2005. St. Petersburg; Moscow, 2004 (in Russian).
21. Li, Y., Jin, T., Wang, Z. & Wang, D. (2020). Engineering critical assessment of RPV with nozzle corner cracks under pressurized thermal shocks. Nucl. Eng. Technol., 52, pp. 2638-2651. https://doi.org/10.1016/j.net.2020.04.019
22. Kondryakov, E., Kravchuk, A., Kharchenko, V. & Bulakh, P. (2024). Experimental and calculation methods for fracture toughness estimation using different types of CT specimens. Procedia Struct. Integr., 59, pp. 50-57. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.009
23. Kravchuk, A. V., Kondryakov, E. O., Kharchenko, V. V. & Chyzhyk, H. V. (2025). Scale factor and stress state type effects on energy characteristics of 15Kh2NMFA-A steel in impact bending tests considering anisotropy. Strength Mater., 57, No. 5, pp. 921-938. https://doi.org/10.1007/s11223-025-00823-z
24. Qian, Y. & Zhao, J. (2019). Fracture toughness calculation method amendment of the dissimilar steel welded joint based on 3D XFEM. Metals, 9, No. 5, 509. https://doi.org/10.3390/met9050509
25. Yu, Z., Zhang, J., Shen, J. & Chen, H. (2021). Simulation of crack propagation behavior of nuclear graphite by using XFEM, VCCT and CZM methods. Nucl. Mater. Energy, 29, 101063. https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.101063
26. Abdellah, M. Y. & Alharthi, H. (2023). Fracture toughness and fatigue crack growth analyses on a biomedical Ti-27Nb alloy under constant amplitude loading using extended finite element modelling. Materials, 16, No. 12, 4467. https://doi.org/10.3390/ma16124467
27. Kondryakov, Ie. (2023). State-of-the-art methods of material's current state assessment and life-time prediction for NPP primary circuit equipment. In Advances in mechanics. Advanced Structured Materials, Vol. 191 (pp. 251-265). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8_15
28. Kondryakov, E. O. (2023). Application of modern approaches to the numerical modeling of the stress-strain state for the strength assessment of complex units of the NPP primary circuit equipment. Part 2. Extended finite element method. Strength Mater., 55, No. 5, pp. 888-897. https://doi.org/10.1007/s11223-023-00579-4
29. Kondryakov, E. O. & Kharchenko, V. V. (2024). Application of modern approaches to the numerical modeling of the stress-strain state for the strength assessment of complex units of the NPP primary circuit equipment. Part 3. Application of submodeling technique and extended finite element method for calculation of the reactor pressure vessel nozzle zone. Strength Mater., 56, No. 3, pp. 467-476. https://doi.org/10.1007/s11223-024-00662-4

Received 09.09.2026

V.V. Kharchenko, https://orcid.org/0000-0002-5795-8792
E.O. Kondryakov, https://orcid.org/0000-0003-2805-5786

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
E-mail: kondryakov@ipp.kiev.ua

DETERMINING FRACTURE PARAMETERS
TO ASSESS RESISTANCE TO BRITTLE FAILURE OF COMPONENTS
OF NPP PRIMARY CIRCUIT EQUIPMENT

The paper summarizes the results of a comprehensive series of experimental and numerical studies aimed at assessing the resistance of VVER-type reactor vessels to brittle fracture. Engineering methods for determining stress intensity factors are analyzed, including their advantages, limitations, and practical application characteristics, as well as the potential of modern numerical methods to improve the reliability of strength assessments for critical components of the primary circuit in nuclear power plants. The results of applying the extended finite element method (XFEM) for the rapid assessment of brittle fracture resistance are summarized, including the modeling of cracks of various shapes, sizes, and locations without remeshing. The results of numerical simulations of the cylindrical section and the nozzle region of the reactor vessel under typical thermal shock conditions are presented. The effect of crack geometric parameters on the stress intensity factors is also investigated, and the most critical crack locations are identified. The results of numerical modeling of the fracture process in compact specimens of the CT-0.5T, CT-0.16T, and side-grooved CT-0.5T types using the XFEM are summarized. For 15Kh2NMFA reactor steel, the parameters of the fracture criterion, the features of the stress-strain state at the crack tip, the crack propagation kinetics, and the effect of specimen geometry are analyzed. The potential of combining experimental studies and numerical simulation based on the XFEM method to improve computational methods for assessing the strength of critical components of the primary circuit in nuclear power plants has been demonstrated.

Keywords: *reactor pressure vessel, extended finite element method, brittle fracture resistance, stress intensity factor.*