

УДК 539.3

## Сучасні експериментально-розрахункові методи оцінки поточного стану матеріалів та прогнозування ресурсу відповідального обладнання з урахуванням нестаціонарних процесів деформування

В.В. Харченко<sup>1</sup>; Є.О. Кондряков<sup>1</sup>; А.В. Кравчук<sup>1</sup>

1 – Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Анотація.* Забезпечення надійної та безпечної експлуатації відповідального обладнання залежить від своєчасної оцінки поточного стану матеріалів і прогнозування їх залишкового ресурсу, особливо за умов нестаціонарних процесів деформування. Такі процеси, як вплив змінних навантажень, температурних коливань значно ускладнюють аналіз і вимагають комбінованого підходу, що поєднує експериментальні та розрахункові методи. У роботі розглянуто сучасні методи визначення енергетичних характеристик матеріалів за результатами випробувань зразків-свідків зі сталі 15Х2НМФА. Вивчено вплив розмірів зразків та напрямку їх вирізки на отримані результати.

Для моделювання НДС та розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень застосовано розширений метод скінченних елементів, що значно спрощує моделювання тріщин у складних конструкціях. Виконано чисельне моделювання патрубкової зони корпусу реактора з тріщинами різних розмірів та напрямків розташування для оцінки їх впливу на опір крихкому руйнуванню.

Отримані результати сприяють удосконаленню методів оцінки ресурсу критичних елементів обладнання, що є важливим для підвищення їх надійності та безпечної експлуатації.

**Ключові слова:** нестаціонарні процеси; експеримент; ресурс; розширений метод скінченних елементів; зразки-свідки.

Одним із ключових факторів забезпечення надійної та безпечної експлуатації відповідального обладнання є своєчасна оцінка його поточного стану та прогнозування залишкового ресурсу. Це особливо важливо для відповідального обладнання, несправність якого може призвести до значних економічних втрат та виникнення аварійних ситуацій. При цьому важливу роль відіграє врахування нестаціонарних процесів деформування. Ці процеси є особливо складними через їхню мінливість у часі та можливість виникнення різних типів деформацій під впливом різних експлуатаційних факторів, таких як температурні коливання, змінні навантаження, вплив агресивних середовищ тощо. Ігнорування цих процесів може призвести до помилок та неточностей при оцінці міцності та ресурсу відповідального обладнання і, як наслідок, до прийняття неправильних рішень щодо експлуатації або ремонту обладнання.

У світовій практиці застосовується широкий спектр експериментальних та розрахункових методів для оцінки міцності та довговічності матеріалів та елементів конструкцій. Експериментальні методи дозволяють отримати точні дані про поведінку матеріалів та конструкцій у реальних умовах експлуатації, що є їх головною перевагою. Однак вони часто потребують значних витрат ресурсів і часу. Розрахункові методи дозволяють моделювати поведінку матеріалів та конструкцій на основі фізичних принципів і математичних моделей, забезпечуючи швидкий та менш затратний спосіб оцінки. Водночас їх точність залежить від коректності вибору моделей деформування матеріалів та вхідних даних.

Саме тому у сучасній інженерній практиці набувають поширення комбіновані експериментально-розрахункові методи, що поєднують переваги обох підходів. Вони дозволяють досягти більшої точності та надійності результатів, використовуючи експериментальні дані для уточнення розрахункових моделей і, навпаки, розрахункові результати для планування і коригування експериментів. Такий підхід є особливо важливим при моделюванні нестаціонарних процесів деформування, коли використання лише одного методу може бути недостатнім для коректного опису цих процесів та точності отриманих результатів.

Одним з прикладів використання комплексного підходу є оцінка міцності та ресурсу КР та елементів обладнання 1-го контуру АЕС. Для оцінки ресурсу КР з одного боку необхідно знати поточний стан матеріалу, який визначається за результатами випробувань зразків-свідків, а з іншого боку – розрахункові значення КІН, які визначаються за результатами чисельного моделювання елемента конструкції з тріщиною при експлуатаційних та аварійних режимах навантаження.

Зразки Шарпі входять до комплексу зразків-свідків, що завантажуються в активну зону корпусів реакторів. За результатами їх випробувань на ударний триточковий згин визначається критична температура крихкості, яка використовується для побудови температурних кривих тріщиностійкості, необхідних для оцінки ресурсу КР. У зв'язку з обмеженою кількістю ЗС і дефіцитом опроміненого металу особлива увага приділяється підвищенню інформативності випробувань зразків за рахунок використання сучасного обладнання та систем реєстрації, а також малорозмірних зразків, які можуть бути виготовлені з половинок зруйнованих стандартних зразків.

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України розроблений інструментований вертикальний копер, оснащений високошвидкісною системою реєстрації. Це дає можливість записувати діаграму навантаження та розділяти повну енергію деформування та руйнування на складові, зокрема визначати енергію крихкого проскоку тріщини, для якої тривалість сигналу на діаграмі складає біля 30 мкс [1]. Розроблено методики проведення та обробки результатів випробувань стандартних зразків Шарпі, малорозмірних зразків та зразків з бічними надрізами, що використовуються для виключення впливу бічних утягувань. Досліджено вплив напрямку вирізки зразків на отримані результати. Для ряду конструкційних матеріалів, в тому числі для корпусної сталі 15Х2НМФА за результатами проведених досліджень отримано енергетичні характеристики та визначено критичні температури крихкості.

Компактні СТ-зразки також використовуються в якості зразків-свідків для визначення характеристик тріщиностійкості матеріалу, що також є необхідним для оцінки ресурсу КР. При цьому також останнім часом розвиваються методи випробувань мініатюрних зразків, які зручно виготовляти з половинок зруйнованих зразків Шарпі. Проте розміри зразка можуть суттєво впливати на результати випробувань, змінюючи скутість деформацій у вершині тріщини та умови напруженого стану, що призводить до зміни характеру руйнування. Зменшення розмірів зразків призводить до завищення значень характеристик тріщиностійкості матеріалу. Тому залишається багато питань стосовно коректної обробки та інтерпретації результатів, налаштування експериментального обладнання та методик проведення випробувань.

В Інституті розроблено методику та проведено комплексні експериментальні дослідження компактних зразків різних типів, виготовлених із поковки зі сталі 15Х2НМФА у трьох напрямках [2]. Вдосконалення конструкції вузла навантаження та коректний вибір режимів навантаження дозволили отримати гостру втомну тріщину, що є однією з вимог стандарту ASTM 1921. Для випробувань при низьких температурах була розроблена криогенна камера, яка дозволяє охолоджувати зразки до  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  зі швидкістю  $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

У зв'язку з тим, що стандарт ASTM 1921 розрахований на мінімальну товщину зразків 0.4Т, було розроблено власну методику проведення випробувань мініатюрних СТ зразків та обробки результатів та розраховано значення  $K_{Ic}$  для всіх типів зразків у перерахунок на товщину 1Т, а також референсні температури [3].

Розширений метод скінченних елементів (XFEM) був створений для подолання труднощів при розв'язанні задач із локалізованими сингулярностями, які неефективно розв'язуються класичним МСЕ. Використання методу XFEM дає змогу значно спростити процедуру розрахунків елементів конструкції з тріщиною, моделювати як стаціонарну тріщину, так і процес її розповсюдження без додаткової перебудови скінченноелементної сітки. На прикладі розрахунку трьох задач та зіставлення отриманих результатів показано, що метод XFEM дає достатньо точні результати порівняно з аналітичними розв'язками та класичним МСЕ [4].

Водночас використання методу XFEM дозволяє значно зменшити загальну кількість СЕ (майже у п'ять разів) при збереженні точності отриманих результатів, що економить розрахунковий час.

Метод XFEM також використовувався для моделювання НДС одного зі складних вузлів КР – патрубкової зони. Для 12 типів напівеліптичних тріщин різних розмірів та напрямків розташування – осьового та колового, проведено розрахунки на опір крихкому руйнуванню для одного з характерних режимів термошоку [5]. Для всіх розглянутих тріщин розраховано значення КІН у глибокій точці. Результати розрахунків показали, що при однакових розмірах осьові тріщини є більш небезпечними ніж колові. При цьому тріщини зі співвідношенням осей  $a/c = 0.3$  є більш чутливими до напрямку розташування, ніж тріщини зі співвідношенням осей  $a/c = 0.7$ .

Проведено моделювання розповсюдження тріщини в СТ-зразках 3-х типів [3]. Отримані результати показали, що для зразків СТ-0.5Т та СТ-0.16Т фронт тріщини нерівномірний і довжина тріщини в середині зразка значно більша, ніж на його поверхні. В цьому випадку не виконуються умови плоского деформованого стану, що може призводити до похибок визначення  $K_{Ic}$ . В той час як у зразку з бічними канавками фронт тріщини більш рівномірний. У мініатюрних зразках зона пластичних деформацій в околі вершини тріщини більш виражена у порівнянні зі зразками 0.5Т. У зразках з бічними надрізами ця зона значно менша і однорідна по товщині зразка. Утворення бічних утягувань на поверхні зразків також знижує швидкість розповсюдження тріщини. А швидкість тріщини у мініатюрних зразках вища, ніж у зразках СТ-0.5Т внаслідок вищого рівня напружень у вершині тріщини.

## Список літератури

1. Kravchuk, A.V., Kondryakov, E.A., Zhmaka, V.N. et al. Modernization of the VK-350 Instrumented Drop Weight Impact Testing Machine for Impact Testing of Various Types / Strength Mater. 2024. - 56. pp. 305–315.
2. A. V. Kravchuk, E. O. Kondryakov & V. V. Kharchenko Determination of Fracture Energy Characteristics and Their Anisotropy for 15Kh2NMFA Steel in Impact Bending Tests. Strength of Materials. 2021. Vol.53. P. 867–876.
3. Eugene Kondryakov, Andriy Kravchuk, Valeriy Kharchenko, Pavlo Bulakh Experimental and calculation methods for fracture toughness estimation using different types of CT specimens / Procedia Structural Integrity. - 2024. - Vol. 59. - P. 50-57.
4. 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, -2323. - 55 (5). P. 888-897.
5. 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. – Vol. 56. – P. 467-476.

## Modern experimental and computational methods for assessing the current state of materials and predicting the life-time of critical equipment, considering non-stationary deformation processes

V. Kharchenko<sup>1</sup>, E. Kondryakov<sup>1</sup>, A. Kravchuk<sup>1</sup>

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** Ensuring the reliable and safe operation of critical equipment depends on the timely assessment of the current state of materials and the prediction of their lifetime, especially under non-stationary deformation processes. Such processes, including variable loads and temperature fluctuations, significantly complicate analysis and require a combined approach integrating experimental and computational methods. This study examines modern methods for determining the energy characteristics of materials based on testing surveillance specimens from steel 15Kh2NMFA. The influence of specimen dimensions and cutting orientation on the results was analyzed. To model stress-strain state and calculate stress intensity factors, the extended finite element method was applied. This approach significantly simplifies crack modeling in complex structures. Numerical modeling of the nozzle zone of a reactor pressure vessel with cracks of various sizes and orientations was conducted to evaluate their impact on resistance to brittle fracture. Obtained results contribute to the advancement of methods for assessing the life-time of critical equipment elements, which is essential for improving their reliability and ensuring safe operation.

**Keywords:** non-stationary processes; experiment; life-time; extended finite element method; surveillance specimens.