

УДК 539.4

А.В. Кравчук канд. техн. наук, Є.О. Кондряков канд. техн. наук, ст. наук. співр,  
В.В. Харченко докт. техн. наук, академік, А.В. Богомолів канд. техн. наук.

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

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЙНУВАННЯ ТА ЇХ  
АНИЗОТРОПІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ  
РІЗНИХ ТИПІВ ЗІ СТАЛІ 15X2НМФА**

**Andriy Kravchuk Ph.D., Ievgen Kondryakov Ph.D., Senior Reseacher, Valeriy  
Kharchenko Dr., Academic, Anatoliy Bogomolov Ph.D.**

**DETERMINATION OF FRACTURE ENERGY CHARACTERISTICS  
AND THEIR ANISOTROPY FOR DIFFERENT SPECIMENS TYPES FROM STEEL  
15Kh2NMFA UNDER IMPACT TESTS**

**Abstract.** The paper presents the impact tests results of different specimen's types from reactor pressure vessel steel 15Kh2NMFA. The standard Charpy specimens, sub-size specimens and side-grooved specimens, which were cut in three different directions were used for determination of fracture energy characteristics and their anisotropy. The full deformation and fracture energies and its components as well as crack propagation velocities were obtained using instrumented vertical drop weight impact testing machine equipped by high-speed recording system.

Використання сучасного апарату експериментальних методів, який включає інструментоване обладнання, оснащене високоточними системами реєстрації, методи кількісного фрактографічного аналізу із застосуванням можливостей сучасних високоточних комп'ютерних і програмних технологій, дозволяє проводити комплексні дослідження з оцінки поточного стану фізико-механічних характеристик матеріалів з високою точністю з урахуванням впливу різних факторів. Застосування наведених технологій дозволяє істотно підвищити точність та інформативність досліджень, отримати нові дані, підвищити ефективність і знизити економічну вартість проведеного аналізу, обґрунтувати додаткові резерви міцності для продовження строків експлуатації відповідального обладнання та критичних елементів конструкцій.

Останнім часом багато уваги приділяється розробці нових та удосконаленню існуючих експериментально-розрахункових методик оцінки залишкового ресурсу й обґрунтуванням продовження строків експлуатації елементів обладнання 1-го контуру АЕС. Урахування різних чинників, таких як деформаційна анізотропія фізико-механічних та енергетичних характеристик матеріалу, напружений стан, масштабний фактор та ін. може суттєво вплинути на оцінку міцності та прогнозування залишкового ресурсу відповідальних елементів конструкцій [1-5]. Тому необхідні комплексні експериментально-розрахункові дослідження з використанням сучасного обладнання та високоточних систем реєстрації. Також важливим чинником є підвищення інформативності випробувань для зменшення кількості експериментальних досліджень та економії дефіцитного матеріалу і людських ресурсів.

Світовий досвід досліджень у цьому напрямку показує великий розкид результатів експериментальних досліджень, пов'язаний з використанням різного типу обладнання та методик обробки результатів випробувань, впливу деформаційної анізотропії, динамічних ефектів та ін. [6-8]. Тому вдосконалення експериментальних методів за рахунок використання нових засобів реєстрації та обробки результатів, підвищення їх точності є актуальною задачею для підвищення достовірності

визначення поточного стану матеріалів, оцінки міцності та ресурсу відповідального обладнання 1-го контуру АЕС.

Одним з видів випробувань, який використовується для оцінки ступеню деградації матеріалу під час експлуатації внаслідок радіаційного та термічного окрихчування є ударні випробування зразків Шарпі. Останнім часом, крім стандартних зразків Шарпі для оцінки енергетичних характеристик використовуються малорозмірні зразки для дослідження впливу масштабного фактору [9,10] та зразки з бічними надрізами для уникнення впливу бічних утягувань [7,11]. Крім того, використання інструментованого експериментального обладнання дозволяє отримати додаткову інформацію та оцінювати характеристики тріщиностійкості за результатами ударних випробувань [12-14].

В даній роботі наведено результати ударних випробувань зразків трьох типів: стандартні зразки Шарпі, малорозмірні зразки та зразки з бічними надрізами. Зразки було вирізано з поковки зі сталі 15Х2НМФА у вихідному стані у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Випробування проводились в широкому діапазоні температур на інструментованому вертикальному копрі, обладнаному високошвидкісною системою реєстрації деформації та зусиль [15].

За результатами випробувань для всіх типів зразків отримано температурні залежності повної енергії деформування та руйнування, а також її складові: енергію зародження тріщини  $E_{init}$ , енергію в'язкого підростання тріщини  $E_{d.c.g.}$ , енергію крихкого проскоку тріщини  $E_b$  та енергію в'язкого долому.

За результатами фрактографічних досліджень поверхонь зламу зразків визначено площі характерних зон та обчислено значення питомої енергії деформування та руйнування, а також її складові. Температурні залежності питомих енергій всіх типів зразків, вирізаних в різних напрямках, показані на рис. 1.

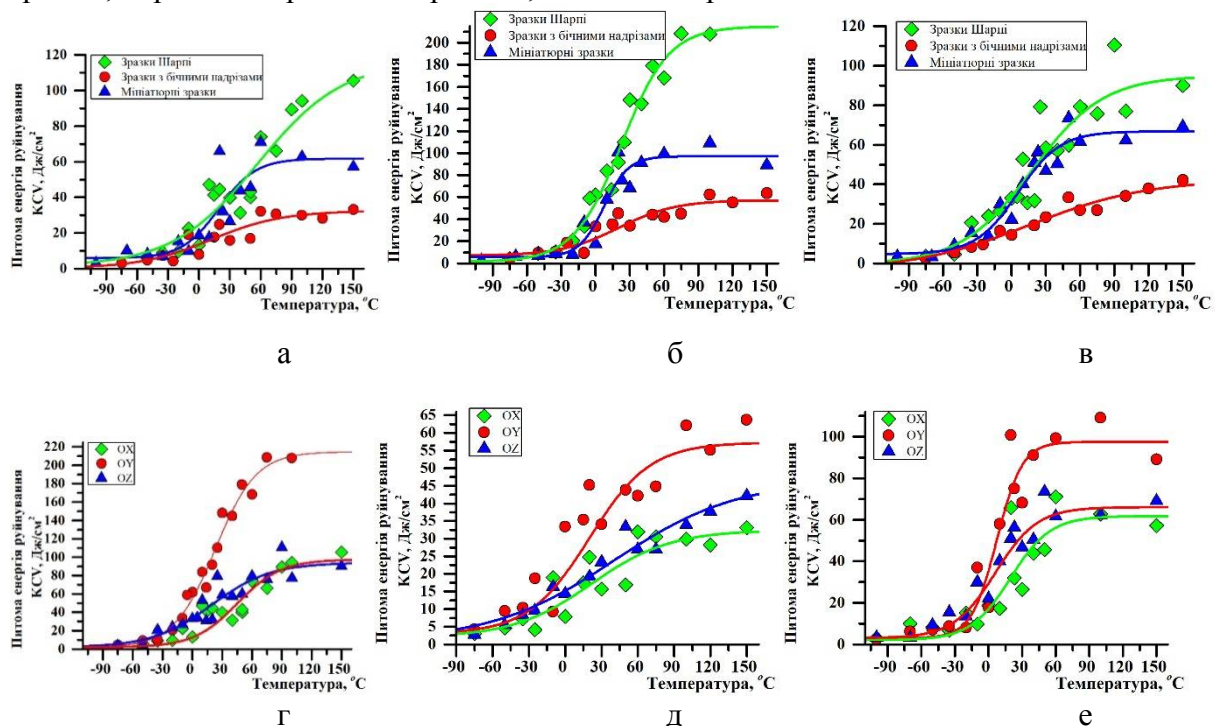


Рис. 1. Температурні залежності питомої енергії руйнування для зразків зі сталі 15Х2НМФА: а- напрямок ОХ, б – напрямок ОУ, в – напрямок ОZ; г– стандартні зразки Шарпі; д–зразки з бічними надрізами; е –малорозмірні зразки.

Як видно, значення питомої енергії на верхньому шельфі для всіх типів зразків, вирізаних у напрямку ОУ значно більші, ніж для двох інших напрямків. Для стандартних зразків Шарпі ця різниця складає 127%, для малорозмірних – 51%, для зразків з бічними надрізами – 67%.

Напрямок вирізки суттєво впливає на критичну температуру крихкості для малорозмірних зразків  $T_{50\%} = 31^{\circ}\text{C}$  (ОХ);  $T_{50\%}=12^{\circ}\text{C}$  (ОУ);  $T_{50\%} = 14^{\circ}\text{C}$  (ОZ) та стандартних зразків Шарпі  $T_{50\%} = 49^{\circ}\text{C}$  (ОХ);  $T_{50\%}=22^{\circ}\text{C}$  (ОУ);  $T_{50\%} = 47^{\circ}\text{C}$  (ОZ) і практично не впливає для зразків Шарпі з бічними надрізами -  $T_{50\%} = 67^{\circ}\text{C}$  (ОХ);  $T_{50\%}=69^{\circ}\text{C}$  (ОУ);  $T_{50\%} = 70^{\circ}\text{C}$  (ОZ).

Використання високошвидкісної системи реєстрації дозволяє визначити середні швидкості розповсюдження тріщини та її складові на окремих ділянках поверхні зламу. Для всіх типів зразків середня швидкість розповсюдження магістральної тріщини знижується з ростом температури випробування та також залежить від типу та напрямку вирізки зразків. На нижньому шельфі середня швидкість розповсюдження магістральної тріщини зразків Шарпі складає 580м/с, 615м/с та 520Дж, для малорозмірних зразків 625м/с, 715м/с та 606м/с, для зразків з бічними надрізами 625м/с, 615м/с та 690м/с по напрямках ОХ, ОУ, ОZ відповідно.

Проведений комплекс експериментальних досліджень показав, що для коректного визначення енергетичних характеристик матеріалу необхідно враховувати напрямок вирізки зразків та напрямок розташування надрізу. На енергетичні характеристики матеріалу також впливає масштабний фактор та ефект утворення бічних утягувань, що також необхідно враховувати при оцінці міцності та ресурсу елементів відповідального обладнання 1-го контуру АЕС.

#### Література

1. М. Горицкий, Г.Р. Шнейдеров, М.А. Лушкин, «Особенности разрушения магистрального трубопровода диаметром 530 мм из низколегированной стали 17ГС», Деформация и разрушение материалов, 2020. № 3, 37-44.
2. А.Я. Красовский, В.Н. Красико, Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов, Наукова думка. Киев 176, 1990.
3. Boris Margolin, Valentin Fomenko, Victoria Shvetsova, Elena Yurchenko On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part I. Materials, study strategy and deformation properties. Engineering Fracture Mechanics. 2022. Vol. 267. 108400.
4. Boris Margolin, Valentin Fomenko, Victoria Shvetsova, Elena Yurchenko On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part II. Fracture properties and modelling. Engineering Fracture Mechanics. 2022. Vol. 270. 108556.
5. Chenxi Ding et al. Influence of the notch curvature on the impact fracture of the three-point bending beam. Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 241. 107419.
6. 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.
7. Eugene Kondryakov, Olexandr Panasenko, Andriy Kravchyk, Valeriy Kharchenko Peculiarities of the crack initiation and propagation in different specimen types. Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 16. P. 43-50.
8. Kim Wallin Objective comparison of the Unified Curve and Master Curve methods. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2014. Vol. 122. P. 31-40.
9. Kim Wallin Sub-sized and miniature CVN specimen conversion methodology. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2020. Vol. 183. 104080.

10. А.В. Кравчук, С.О. Кондряков Побудова кореляційних залежностей між результатами ударних випробувань стандартних та малорозмірних зразків Шарпі. Вісник НТУ «ХПІ» : Серія "Нові рішення у сучасних технологіях". 2018. №45 (1321). С. 3-7.
11. F. Di Gioacchino, E. Lucon, E.B. Mitchell, K.D. Clarke, D.K. Matlock Side grooved Charpy impact testing: Assessment of splitting and fracture properties of high-toughness plate steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 252. 107842.
12. Chenglong Wang et al. A method for directly measuring fracture toughness and determining reference temperature for RPV steels by Charpy impact test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 243. 107526.
13. Jianhua Pan, Yan Wang A novel method for estimating the dynamic fracture toughness of austenitic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 1410-1415.
14. R. Chaouadi, R. Gerard Development of a method for extracting fracture toughness from instrumented Charpy impact tests in the ductile and transition regimes. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 115. 103080.
15. В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака, А.А. Бабуцкий, Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности. *Надёжность и долговечность машин и сооружений*, 2006. №27, 120 – 127.