

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ ШАРПІ

А.В. Кравчук, Є.О. Кондряков, В.В. Харченко

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

Abstract. Fracture toughness is the foremost mechanical property to assess the structural integrity of RPV. However, fracture toughness tests are costly and require very skilled manpower and special instrumentation. Methods are being developed for determining the fracture toughness of a material according to the results of a Charpy V-notch impact test with through its low cost and simplicity. This paper presents an overview of such methods on the results of tests of steel 45.

Одними з основних механічних характеристик при проведенні оцінки міцності корпусів реакторів (КР) атомних електричних станцій є характеристики тріщиностійкості, зокрема в'язкість руйнування. Зазвичай її визначають з випробувань компактних зразків з вирощеною втомною тріщиною на позацентровий розтяг. Проте випробування на тріщиностійкість є досить складними, дорогими і трудомісткими та включають в себе попереднє вирощування втомних тріщин. Отримання достовірних значень характеристик тріщиностійкості часто є неможливим для високопластичних матеріалів та часто потребують використання великих зразків [1,2]. Така методика визначення в'язкості руйнування є дуже затратною, особливо при випробуваннях опромінених зразків.

В останній час увага дослідників приділяється розробці більш простих методів отримання K_{Ic} [3,4] серед яких перспективними є підходи засновані на ударних випробуваннях зразків Шарпі [5]. Слід зазначити, що такі випробування не тільки є більш простими та дешевими [6-7], а також входять в програму зразків-свідків і використовуються для визначення ступеня радіаційного окрихчування металу КР АЕС.

За результатами ударних випробувань характеристики тріщиностійкості визначають за кореляційними залежностями встановленими між енергією, витраченою на руйнування зразка Шарпі та в'язкістю руйнування зразка на тріщиностійкість [8-11]. Застосування такого підходу зумовлене обмеженою кількістю даних отриманих із стандартних ударних випробувань. Слід зазначити, що такі кореляційні залежності справедливі для певного класу матеріалів, та встановлюються для кожної ділянки кривої в'язко-крихкого переходу окремо.

З розвитком інформаційних технологій з'явилась можливість підвищити інформативність випробувань за рахунок оснащення ударних машин високошвидкісними системами реєстрації даних, які дозволяють з достатньою дискретністю записати повну діаграму деформування та руйнування зразка [13,14]. В результаті досліджень на такому обладнанні були розроблені аналітичні методи розрахунку характеристик тріщиностійкості. В основі таких методів лежить методика, описана в стандарті ASTM E1820 [1], яка передбачає побудову J-R кривої, з якої отримують енергетичну характеристику тріщиностійкості та розраховують K_{Ic} . Найбільш поширеними аналітичними методами є аналітичний 3-х параметричний метод Шиндлера (рис. 1 а). [16] та метод нормалізації Шаоді [8] (рис. 1 б).

В даній роботі було проведено серію ударних випробувань зразків Шарпі зі сталі 45 на інструментованому вертикальному копрі [13,15], обладнаному багатоканальною системою реєстрації зусиль (частота дискретизації 20 МГц), яка дозволяє записувати діаграму випробувань та розділяти її на характерні ділянки (рис.2 а). Це дозволяє розробити кореляційні залежності для отримання характеристик тріщиностійкості за результатами ударних випробувань зразків Шарпі.

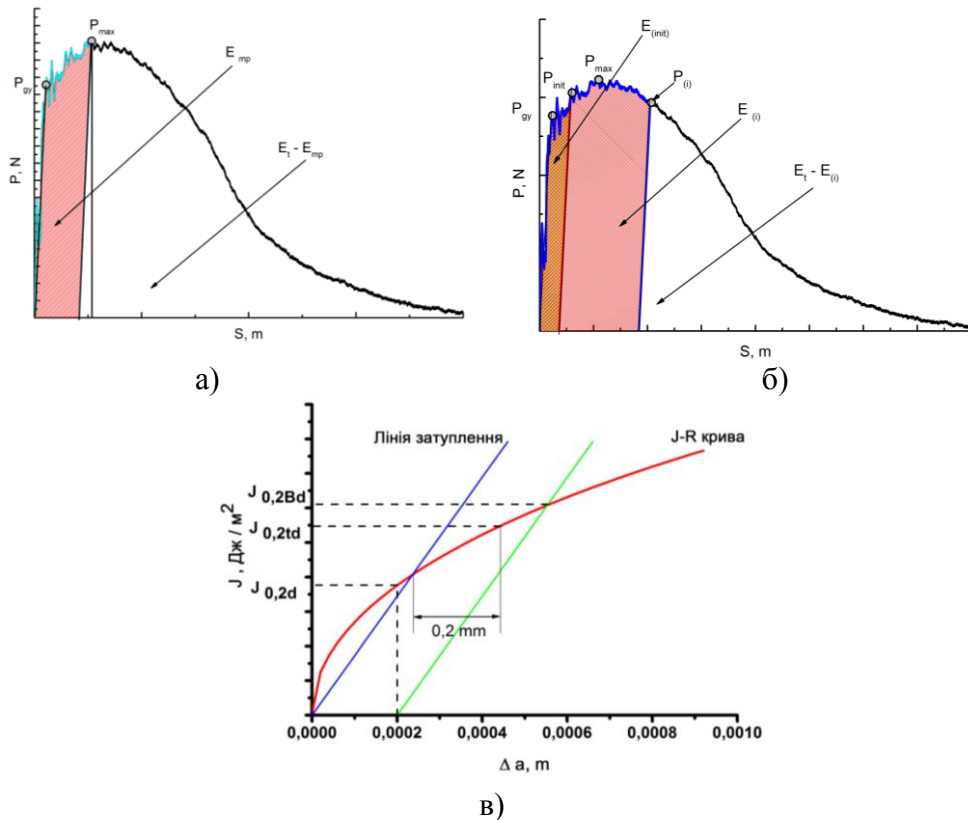


Рис.1. а - схема визначення параметрів діаграми деформування (метод Шиндлера); б - схема визначення параметрів діаграми деформування (метод Шаоді); в- схема визначення характеристик тріщиностійкості із побудованої J-R кривої

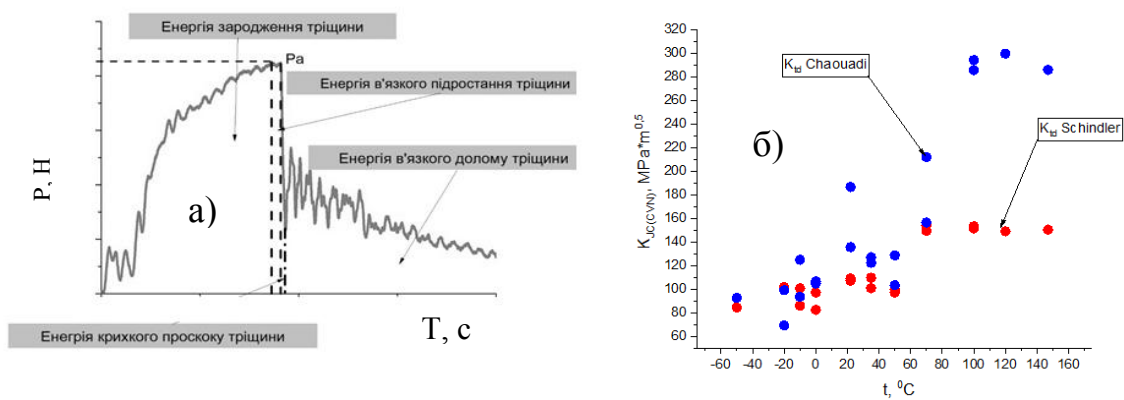


Рис.2 а - розділення діаграми деформування на ділянки; б – характеристики тріщиностійкості, отримані за результатами ударних випробувань за аналітичними методами для сталі 45.

За результатами ударних випробувань зразків Шарпі зі сталі 45 було проведено аналіз існуючих методів визначення характеристик тріщиностійкості. Було визначено, що кореляційні методика не є універсальними, і мають великий розкид результатів. Серед аналітичних методів метод Шаоді [8] є більш універсальним та дозволяє отримувати характеристики тріщиностійкості у кожній точці діаграми. Розраховані за цими методами значення в'язкості руйнування в зоні крихкого руйнування та перехідній зоні майже співпадають для обох методів, як показано на рис. 2 б, на відміну зони в'язкого руйнування, в яких метод Шаоді дає значно вищі результати. Отримані результати показали необхідність проведення подальших досліджень та розробки універсальних кореляційних залежностей для визначення характеристик тріщиностійкості за результатами ударних випробувань зразків Шарпі.

Висновки. На основі результатів ударних випробувань зразків Шарпі зі сталі 45 було проаналізовано методики отримання характеристик тріщиностійкості. Встановлено, що кореляційні методики не є універсальними, і мають великий розкид результатів. В той час як аналітичні методи Шиндлера та Шаоді дають збіжні результати в зоні крихкого руйнування та перехідній зоні кривої в'язко-крихкого переходу. Проте в області в'язкого руйнування метод Шиндлера дає занижені значення в порівнянні з методом Шаоді. Отримані результати показали необхідність проведення подальших досліджень та розробки універсальних кореляційних залежностей для визначення характеристик тріщиностійкості за результатами ударних випробувань зразків Шарпі

Література

1. ASTM E 1820 – 01. Standard test method for measurement of fracture toughness – Instead of ASTM E 1820 – 99a; Introduced 10.06.2001. - ASTM International. – 2001. – 46 p
2. Zhu X.K., Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization/ Zhu X.K., Joyce J.A.//, Eng. Fract. Mech. 85 (2012) 1-46p
3. Kim M.C. Comparison of fracture properties in SA508Gr.3 and Gr.4N high strength low alloy steels for advanced pressure vessel materials/ Kim M.C., Park S.G., Lee K.H., et al.// , Int. J. Pres. Ves. Pip. 131 (2015) 60-66p.
4. Mahler M. Aktaa J., Prediction of fracture toughness based on experiments with sub-size specimens in the brittle and ductile regimes/ Mahler M., Aktaa J.//, J. Nucl. Mater. 472 (2016) 178-185p.
5. Yu M.F. An Assessment of Mechanical Properties of A508-3 Steel Used in Chinese Nuclear Reactor Pressure Vessels/ Yu M.F., Chao Y.J., Luo Z.//, vol. 137, J. Press, 2015, p. 031402. Vess-T. ASME.
6. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, 2015. New York.
7. API, RP 579/ASME FFS, Fitness for Service, 2007.
8. Rolfe, S. T. and Novak, S. R. (1970) Slow-bend KIC testing of medium-strength high-toughness steels. In: Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 124–159
9. Witt, F. J. (1983) Relationships between Charpy impact shelf energies and upper shelf KIC values for reactor pressure vessel steels. Int. J. Pres. Vessel Piping 11, 47-63.
10. Wallin, K. Low-cost J-R curve estimation based on CVN upper shelf energy VTT Manufacturing Technology [Text]/ K. Wallin / Fat Frac Eng Mat Struc.//. – 2001. – P.537–549.
11. Zhao Y. J. Ductile-to-brittle transition and impact fracture behavior of 3mn-si-ni low carbon martensitic steel/ Zhao Y. J., Su Y. M., Liu M., Hu Z. L and Tang P. // Strength of Materials. – Vol.51, No.2. – 2019. – P. 291-299.
12. Chaouadi R.J., L. Puzzolante, Procedure to Estimate the Crack Resistance Curve from the Instrumented Charpy V-notched Impact Test, 2009. ICF-12, Toronto, Canada.
13. Харченко В.В. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности / Харченко В.В., Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Бабуцкий А.А. // Сб. «Надёжность и долговечность машин и сооружений». – 2006. – №27. – С. 120 – 127.
14. Kobayashi T. Development in the instrumented impact test-computer aided instrumented impact testing system / Kobayashi T. // Charpy Centenary Conference, 2-5 October 2001. - Poitiers, France, 2001. – P. 127-134.
15. Кондряков Е.А. Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях / Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Харченко В.В. [и др.] // Проблемы прочности. – 2005. - №3. – С. 140-145.
16. Schindler H.J., Tipping Ph (2001) Instrumented impact testing of pre-cracked Charpy-type specimens to obtain fracture toughness data for in master curve methodology - IAEA Specialists Meeting on Master Curve Testing and Results Application, 17-19 September 2001. - Prague, Czech Republic, 2001. – 8 p.