

# ОСОБЛИВОСТІ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИН В ЗРАЗКАХ РІЗНИХ ТИПІВ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

А.В. Кравчук\*, Є.О. Кондряков, О.В. Панасенко, В.В. Харченко

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

**Abstract.** The paper presents the results of impact tests of standard Charpy specimens, sub-sized specimens, and side-grooved specimens made of steel 45. The instrumented vertical impact testing machine is used together with the system of high-speed recording of strain and forces. Based on the impact test results and the methods of quantitative fractography, the temperature dependences of the total specific energy of strain and fracture and its components are plotted.

**Вступ.** Основним видом випробувань в програмах зразків-свідків, які проводяться для контролю стану матеріалу конструктивних елементів реакторних установок є випробування зразків Шарпі на ударний згин. Внаслідок дефіциту опроміненого матеріалу та обмеженої кількості зразків-свідків існує ймовірність отримання некоректних результатів, тому виникає необхідність підвищення інформативності випробувань. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки нових та покращення існуючих методів випробувань для вивчення процесів зародження та розповсюдження тріщини.

Стандартні випробування на ударну в'язкість дозволяють отримати доволі обмежену кількість даних для дослідження впливу різних факторів на поведінку матеріалу. В результаті випробувань визначають енергію, витрачену на руйнування зразка [1], а за виглядом зламу визначають частку в'язкої складової у зламі або значення поперечного розширення зразка в зоні зламу [2].

Підвищити інформативність випробувань можна за рахунок оснащення обладнання високошвидкісними системами реєстрації даних, які дозволяють з достатньою дискретністю записати повну діаграму деформування та руйнування зразка [3,4]. Окрім стандартних зразків використовуються малорозмірні зразки та зразки з боковими надрізами [5].

**Методика проведення випробувань та обробки результатів.** Ударні випробування проводились на інструментованому вертикальному копрі [3], обладнаному багатоканальною системою реєстрації (частота дискретизації 5 МГц), та системою нагрівання і охолодження зразків у широкому діапазоні температур [7]. Для досліджень було виготовлено стандартні зразки Шарпі, малорозмірні зразки і зразки з глибокими бічними надрізами (рис. 1).

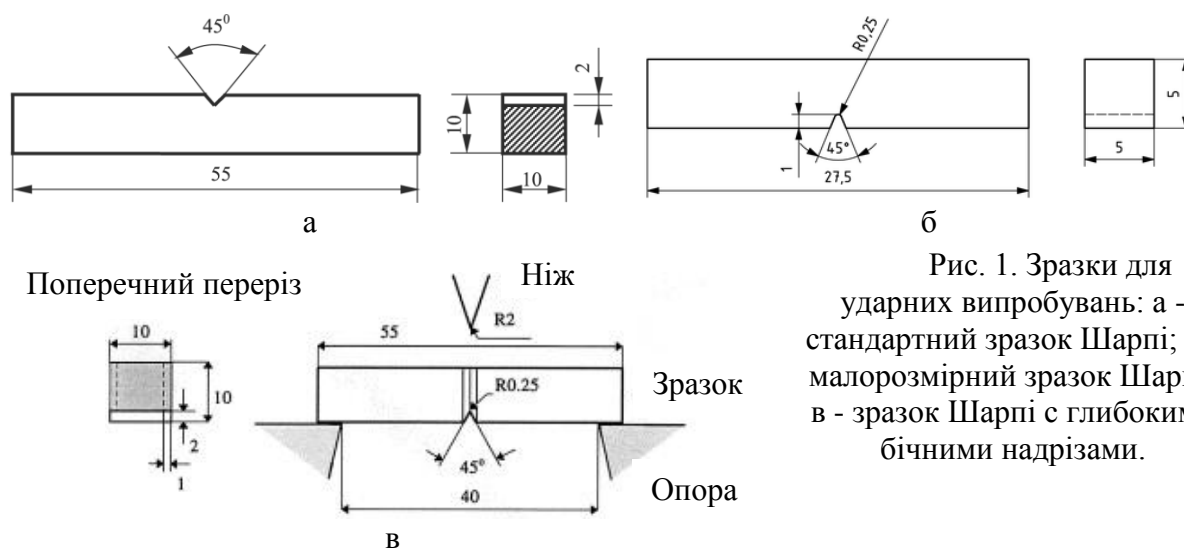


Рис. 1. Зразки для ударних випробувань: а - стандартний зразок Шарпі; б - малорозмірний зразок Шарпі; в - зразок Шарпі з глибокими бічними надрізами.

Всі зразки вирізали зі сталі 45 листового прокату вздовж напрямку прокату. Основний надріз виконували поперек напрямку прокату, щоб уникнути утворення вторинних тріщин. Ударні випробування проводили у діапазоні температур  $T = -50 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Аналіз результатів випробувань.** Висока точність і чутливість системи реєстрації дозволяє розділити діаграму навантаження на характерні ділянки, що дає можливість оцінити величину складових повної енергії деформування і руйнування (рис. 2).

Повна енергія деформування та руйнування  $E_t$  розділялась на енергію зародження тріщини  $E_{init}$ , енергію стабільного (в'язкого) підростання тріщини  $E_{в.п.}$ , енергію нестабільного (крихкого) проскоку тріщини  $E_b$  та енергію в'язкого долому  $E_{в.д.}$ . При цьому приймалось припущення, що зародження тріщини відбувається при  $P=P_{max}$ . Значення повної енергії деформування і руйнування та її складових визначались згідно зі стандартом ISO 14556 [8], що передбачає перетворення діаграми  $P(t)$  в  $P(s)$ .

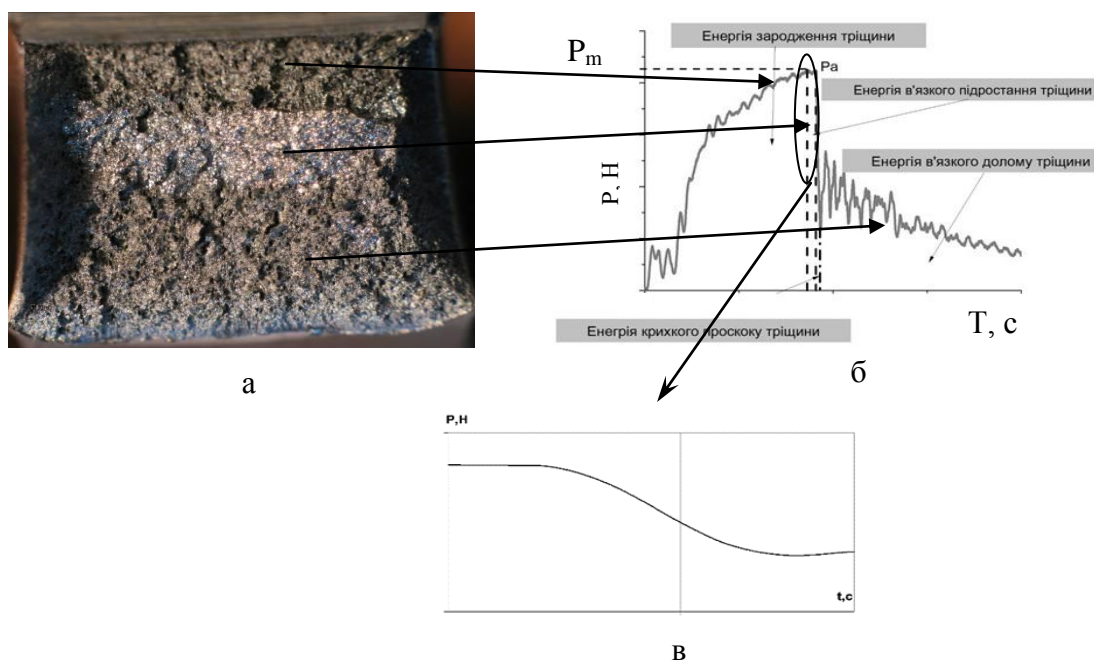


Рис. 2. а - макротрефрактограма зламів зразків Шарпі з характерними зонами розповсюдження тріщини в області в'язко-крихкого переходу; б – характерна діаграма  $P(t)$  для сталі 45; в - зміна сигналу під час крихкого проскоку тріщини при збільшенні масштабу в часі.

Визначивши площу характерної зони зламу, що відповідає ділянці руйнування на діаграмі контакту ножа зі зразком  $P(s)$ , можна розрахувати питому енергію руйнування на даній ділянці. Значення питомої енергії розповсюдження тріщин залежить від механізму руйнування і змінюється в широкому діапазоні при зміні механізмів руйнування від крихкого відколу (декогезії атомних площин) до вузького ямкового руйнування. Застосування фрактографічних методів дослідження спільно з аналізом діаграм контакту ножа зі зразком дозволяє зіставити питому енергію на характерному етапі розповсюдження тріщини з механізмом руйнування, що спостерігається у відповідній зоні зламу.

На рис.3, а показані діаграми температурних залежностей повної питомої енергії руйнування для всіх трьох типів випробуваних зразків. Видно, що для малорозмірних зразків крива зміщена вліво, що пов'язано з масштабним ефектом [5,6].

Питома енергія на ділянці стабільного підростання тріщини сягає максимуму за температури  $T=36 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис.3, б). Питома енергія розповсюдження тріщини в малорозмірних зразках значно нижча, ніж у стандартних зразках Шарпі і зразках із

бічними надрізами. Це пов'язано з максимальним опором матеріалу на початковій стадії руйнування у момент зародження тріщини при контакті ударника зі зразком.

Значення питомої енергії розповсюдження нестабільної тріщини на ділянці крихкого руйнування збільшуються з підвищенням температури і практично збігаються для всіх типів зразків (рис.3, в).

Питома енергія розповсюдження в'язкої тріщини на ділянці долому підвищується з ростом температури для стандартних зразків Шарпі і зразків із бічними надрізами і знижується зі збільшенням температури для малорозмірних зразків (рис.3, г).

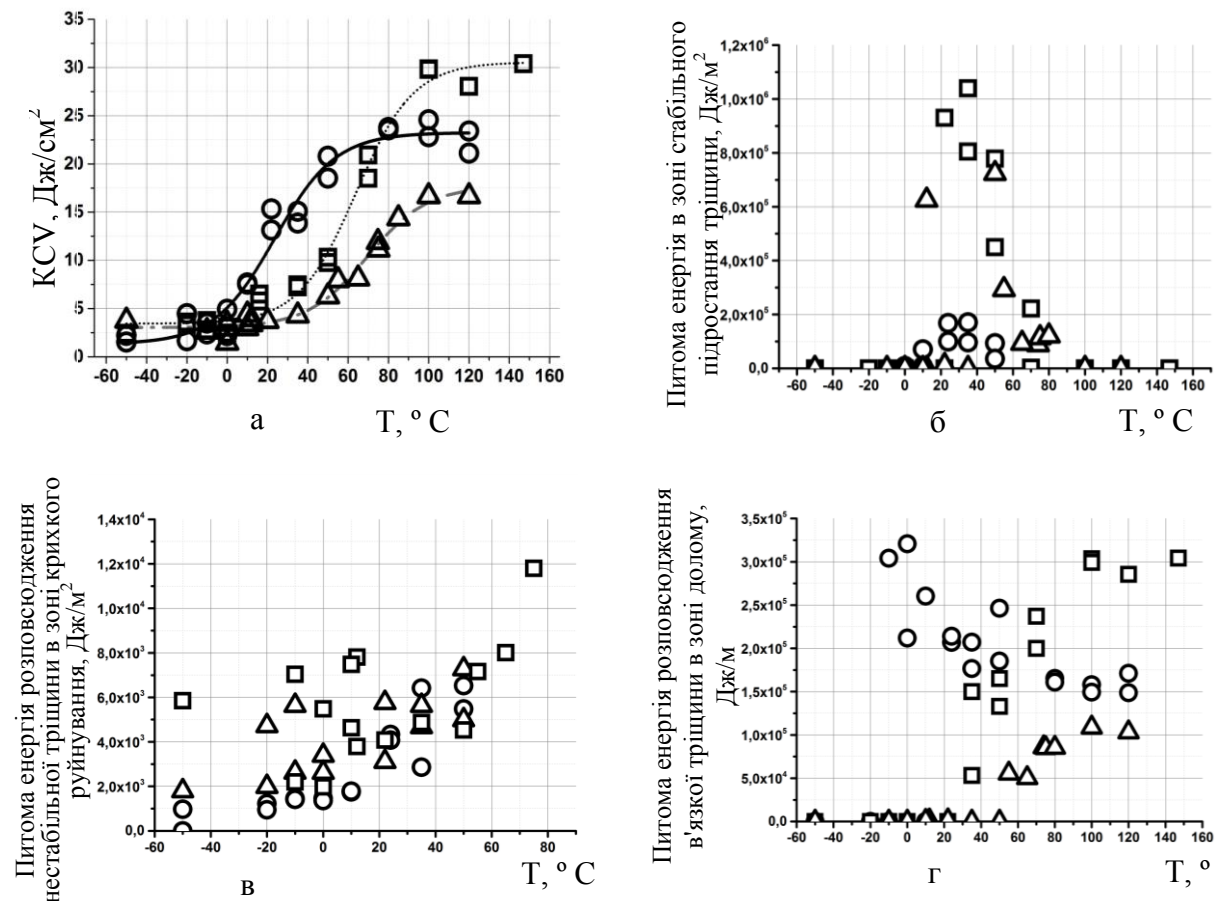


Рис.3. Температурні залежності питомих енергій розповсюдження тріщин малорозмірних зразків (○), зразків з бічними надрізами (△) та стандартних зразків Шарпі (□): а - питома енергія в зоні в'язкого підростання тріщини, б - питома енергія нестабільної тріщини в зоні крихкого руйнування, в - питома енергія в'язкої тріщини в зоні долому, г - питома енергія руйнування.

**Висновки.** В даній роботі було проведено ударні випробування зразків Шарпі малорозмірних зразків та зразків з боковими надрізами зі сталі 45. Випробування проводились на інструментованому маятниковому копрі, обладнаному високошвидкісною системою реєстрації даних. Висока чутливість системи реєстрації дозволяє розділити діаграму навантаження на характерні ділянки. За результатами випробувань було побудовано температурні залежності повної енергії деформування і руйнування та її складових.

За результатами фрактографічних досліджень були визначені площі та відносні долі проєкцій характерних макрозон злавів. Співставлення діаграм навантаження із результатами фрактографічних досліджень дало можливість отримати температурні залежності повних і питомих енергій розповсюдження тріщини в характерних зонах зламу.

Залежності питомої енергії для трьох типів зразків істотно відрізняються. Питомі енергії розповсюдження тріщини в зоні стабільного підростання для зразків з боковими

надрізами значно нижчі, аніж для стандартних зразків Шарпі. Питомі енергії розповсюдження нестабільної тріщини майже не відрізняються для трьох типів зразків, тоді як питомі енергії долому істотно відрізняються, що і впливає на загальну енергію розповсюдження магістральної тріщини.

### Література

1. Schindler H.-J. Relation of fracture energy of sub-sized Charpy specimens to standard Charpy energy and fracture toughness / Schindler H.-J., Bertschinger P. // Transferability of Fracture Mechanical Characteristics. – 2002. – Vol. 78. – P. 213 – 224.
2. Tanguy B. Experimental analysis of Charpy V-notch specimens / Tanguy B., Piques R., Pineau A. // Charpy Centenary Conference, 2-5 October 2001. - Poitiers, France, 2001. - P. 425-432.
3. 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.
4. Y. J. Zhao, Ductile-to-brittle transition and impact fracture behavior of 3mn–si–ni low carbon martensitic steel / Y. J. Zhao, Y. M. Su, M. Liu, Z. L. Hu and P. Tang // Strength of Materials. – Vol.51, No.2. – 2019. – P. 291-299.
5. Chernobaeva A.A. Scale factor of standard and mini Charpy specimens from VVER-1000 RPV materials / Chernobaeva A.A., Medvedev K.I., Zhurko D.A., et. al. // Int. J. Pres. Ves. Piping. - 2016. - 145 -. P. 23-28.
6. Кравчук А. В. Визначення температурних залежностей складових енергії руйнування зразків різних типів при ударних випробуваннях на згин / А. В. Кравчук, Є.О. Кондряков, О.В. Панасенко, В.В. Харченко // Пробл. прочности. – № 6. – 2017. – С. 90–98.
7. Харченко В.В. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности / Сб. «Надёжность и долговечность машин и сооружений» / Харченко В.В. Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Бабуцкий А.А.//. – 2006. – №27. – С. 120 – 127.
8. ISO 14556-2000. Steel – Charpy V-notch pendulum impact test – Instrumented test method. – Introduced 05.01.2000. - Int. Org. of Standardization, 2000. – 18p.