

УДК 539.42

**В. Харченко, докт. техн. наук; Є. Кондряков, канд. техн. наук;  
О. Панасенко**

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України*

## **ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ЗАРОДЖЕННЯ ТРІЩИНИ В ЗРАЗКАХ ШАРПІ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

***Резюме.** В даний час випробування на ударний згин залишаються одним з найпростіших і найдешевших методів для визначення властивостей матеріалу, що описують його схильність до крихкого руйнування. Простота і зручність у використанні даного методу, відносна легкість калібрування та налаштування обладнання зробили цей метод випробувань ключовим у багатьох галузях науки і техніки та промислових галузях, зокрема – у програмах з визначення й прогнозування властивостей матеріалів корпусів реакторів АЕС на підставі випробувань зразків-свідків [1–3]. Отримання діаграм навантаження при контактній ударника зі зразком при ударному вигині з використанням тензодатчиків і сучасних систем реєстрації, реалізованих у вертикальному інструментованому копрі, і подальше зіставлення результатів аналізу даних діаграм з результатами фрактографічних досліджень дозволяє отримати додаткову важливу інформацію про механізми розповсюдження тріщини в зразку Шарпі [4, 5].*

***Ключові слова:** зразок Шарпі, ударні випробування, зародження тріщини.*

**V. Kharchenko, E. Kondryakov, O. Panasenko**

## **DETERMINATION OF CRACK INITIATION MOMENT IN CHARPY SPECIMENS UNDER IMPACT LOADING**

***Summary.** At present, the impact bending tests are one of the simplest and cheapest methods to determine the material properties that describe its tendency to brittle fracture. Simplicity and usability of this method, the relative ease of calibration and adjustment of equipment made this test method one of the principle in many areas of science and technology and industrial sectors, in programs to identify and predict properties of reactor vessels materials based on surveillance-specimens tests in particular. Getting a load diagrams at contact between specimen and striker under impact loading with the use of strain gauges and modern registration systems implemented in vertical instrumented drop weight machine, as well as further comparison of the data analysis results with the results of fractographical researches allows to obtain more important information about crack propagation mechanisms in the Charpy specimen. In this paper the experimental technique, based on the international standard for determining the moment of crack initiation in Charpy specimen under impact loading was developed. Tests were carried out with the use of vertical instrumented drop-weight impact testing machine equipped with a system of high-speed deformation registration.*

*Numerical simulation of the Charpy impact test was fulfilled using the finite element method and Gurson-Tvergaard-Nidman damage material model. The differences in time between the moment of crack initiation in the middle of the specimen and its lateral surface were determined from the calculation results for standard Charpy specimens and side-grooved specimens.*

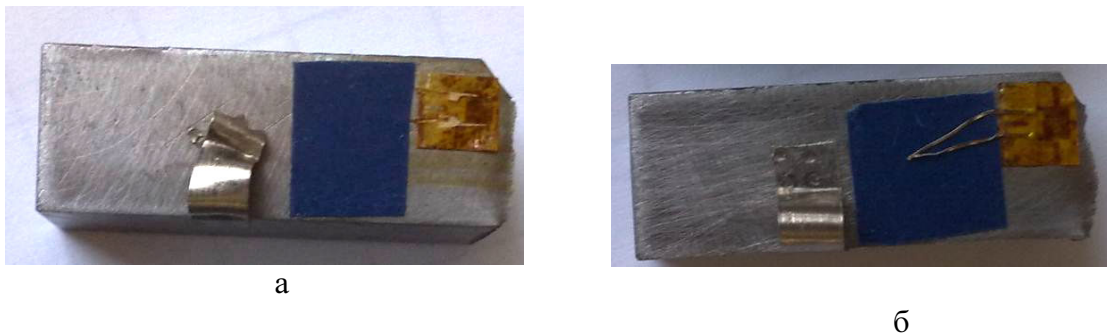
***Key words:** Charpy specimen, impact loading tests, cracks initiation.*

Останнім часом удосконалюються вже відомі методики і розробляються нові методи проведення випробувань малорозмірних зразків, які значно економічніше й ефективніше, ніж випробування натурних зразків. Також можливості сучасної обчислювальної техніки уможливають проводити розрахунки з великим просторовим дозволом, коли можна проводити аналіз напруженого стану у вершині тріщини. При цьому використовують моделі матеріалів як з класичними, так і локальними критеріями руйнування.

За результатами ударних випробувань зразків Шарпі можна визначити характеристики тріщиностійкості матеріалу. Але для цього необхідно знати момент

зародження тріщини. На даний момент найчастіше передбачається, що момент зародження тріщини відповідає максимальному зусиллю на діаграмі  $P(t)$ . Для перевірки цього припущення на підставі стандарту [4] було розроблено експериментальну методику визначення моменту зародження тріщини. Згідно з даною методикою на зразку поблизу вершини надрізу (або тріщини) закріплюють датчик деформації. Початок зародження тріщини визначається як різке падіння (принаймні, на 20%) сигналу датчика.

Датчики розташовували на поверхні зразків поблизу V-подібного концентратора уздовж передбачуваного фронту розповсюдження тріщини (рис. 1). Канали реєстрації сигналу датчика на зразку і на ножі були синхронізовані за часом. Дискретність сигналу за часом становила  $2 \cdot 10^{-7}$  с (частота опитування 5000000 Гц).



**Рисунок 1.** Вид підготовлених зразків з датчиками деформації:  
а – зразок ШК7-1; б – зразок ШК7-2

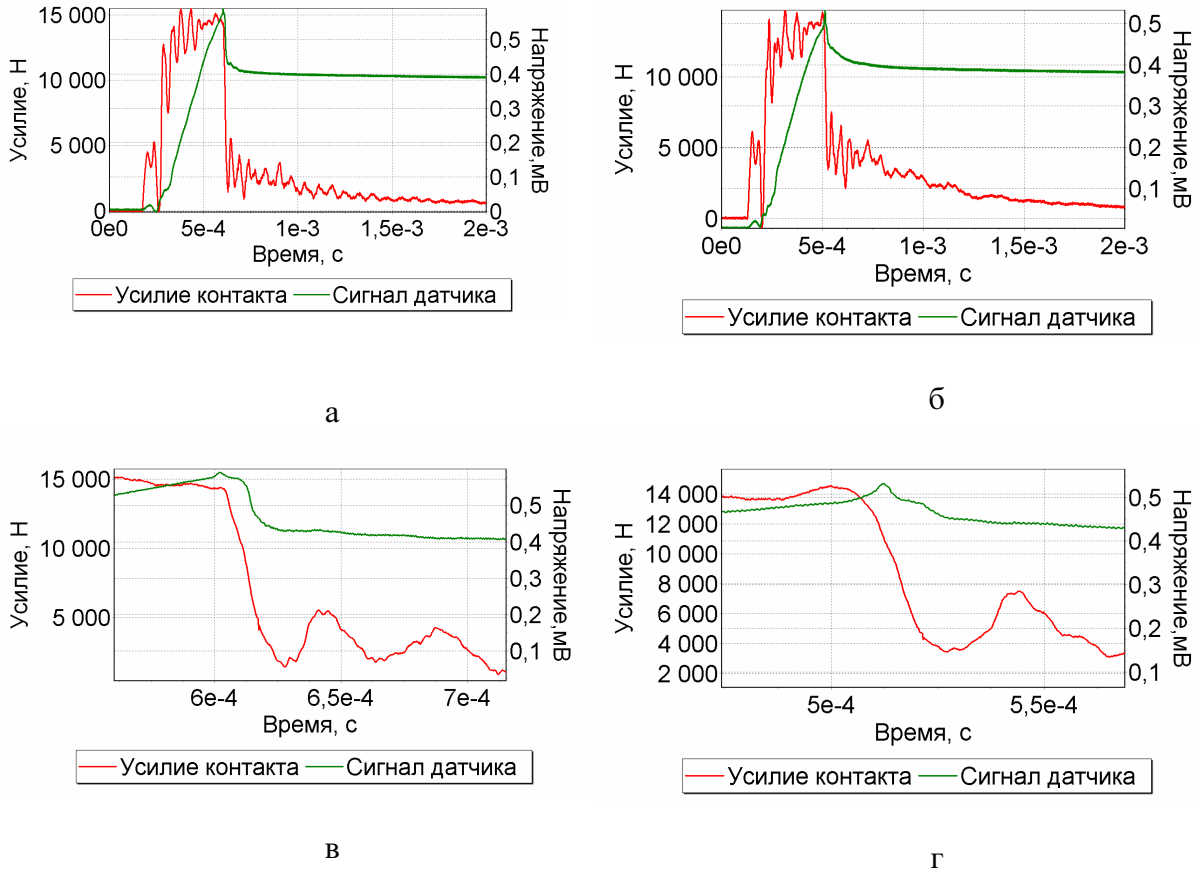
**Figure 1.** Types of specimens with fracture registers:  
a – specimen ШК7-1; b – specimen ШК7-2

Випробування проводили на інструментованому вертикальному копрі, оснащеному багатоканальною системою високошвидкісної реєстрації деформацій і зусиль. Детально конструкція копра і принцип його роботи описані в [6, 7]. Зразки Шарпі були виготовлені з листової прокатної сталі 45 уздовж напрямку прокату. Випробування проводили в діапазоні температур  $-50^{\circ}\text{C} \div +100^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2 наведено діаграми сигналу датчика і діаграма «зусилля-час» для зразків ШК7-1 ( $T = 25,8^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 1\text{м}$ ) і ШК7-2 ( $T = 35^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 1\text{м}$ ). Максимум діаграми датчика розташований за часом поблизу початку різкого спаду зусилля на діаграмі «зусилля-час». Подібний характер мають діаграми для зразка ШК7-2 (рис. 2б). Відмінність між діаграмами зразків полягає в тому, що максимум на діаграмі датчика для ШК7-2 ( $35^{\circ}\text{C}$ ) зміщений вправо в порівнянні з точкою початку ділянки різкого падіння зусилля діаграми  $P(t)$ , в той час як для зразка ШК7-1 ( $25^{\circ}\text{C}$ ) максимум зміщений вліво (рис. 2в, г – збільшення масштабу ділянки різкого спаду зусилля діаграми  $P(t)$ ). Випробування зразків при різних температурах показало наявність тенденції до зміщення максимуму на діаграмі датчика переважно вліво зі зростанням температури, у напрямку до максимуму діаграми  $P(t)$ .

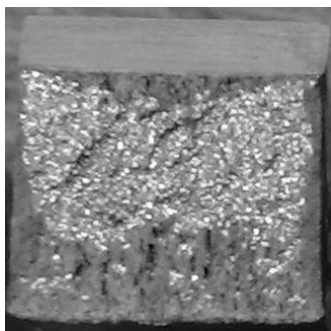
На рис. 3 зображено злами зразків ШК7-1 і ШК7-2. На макрофрактограмах кожного зі зразків можна спостерігати характерні зони зламів – стабільного підросту, нестабільного проскоку, долому, губ зрізу. З точки зору аналізу фізичного змісту діаграми деформаційного датчика, необхідно зазначити наступне. Суттєвою особливістю зламів цих зразків є форма зони стабільного підросту – зона стабільного підросту має вигляд витягнутого трикутника з максимальною довжиною (по напрямку поширення тріщини) в центральній частині зразка та мінімальною (близькою до нуля) протяжністю на краях зламу, тобто поблизу бічних поверхонь зразка (зони губ зрізу). У відповідності з цим фактом стає очевидним, що датчик деформації реагує на

деформацію поверхні зразка в результаті утворення зони «губ зрізу» і на деформацію поверхні зразка при поширенні крихкої тріщини (зона нестабільного проскоку). У той же час, зародження тріщини починається всередині зразка. Малоімовірно є можливість реєстрації датчиком утворення тріщини стабільного підросту при такій її формі й розмірах.

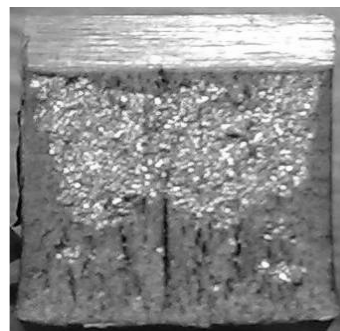


**Рисунок 2.** Зіставлення діаграм зусилля контакту ножа зі зразком і сигналу датчика деформації: а – зразок ШК7-1; б – зразок ШК7-2; в – збільшення масштабу ділянки різкого падіння зусилля діаграми P(t) (обр. ШК7-1); г – збільшення масштабу ділянки різкого падіння зусилля (обр. ШК7-2)

**Figure 2.** Comparison diagrams of the impactor contact force with the specimen and fracture register signal: а – specimen ШК7-1; б – specimen ШК7-2; в – increase of the area scale of the sharp strength fall of diagram P(t) (specimen ШК7-1); д – increase of the area scale of the sharp strength fall (specimen ШК7-2)



а



б

Рисунок 3. Макрофрактограми зламів зразків; а – ШК7-1; б – ШК7-2

Figure 3. Macrofractograms of the specimens wreckings: a – ШК7-1; b – ШК7-2

При цьому відкритим питанням залишається задача розпізнавання та диференціації сигналу спрацьовування датчика від деформування матеріалу на поверхні зразка (утворення «губ зрізу») і спрацьовування датчика від деформування матеріалу в пластичній зоні біля вершини тріщини при поширенні тріщини на поверхні зразка.

Для перевірки результатів експериментальних досліджень були проведені чисельні розрахунки ударних випробувань зразків Шарпі методом скінчених елементів. Для моделювання процесу поширення тріщини використовувалася модель пошкоджуваності матеріалу GTN [8 – 9]. Суть цієї моделі полягає в наступному: вважається, що матеріал вже попередньо пошкоджений, в ньому вже є деякі дефекти – пори, модель описує поведінку в'язкого пористого матеріалу та враховує як утворення і зростання пор, так і механізм в'язкого руйнування, викликаний їх злиттям. Параметри моделі GTN було визначено за результатами спеціальних випробувань та розрахунків гладких зразків при одновісному розтязі. Шляхом підбору параметрів моделі можна моделювати як процес в'язкого, так і квазікрихкого руйнування матеріалу.

Були проведені такі варіанти розрахунків процесу ударного навантаження зразків Шарпі:

- у двовимірній постановці;
- у тривимірній постановці, стандартні зразки Шарпі;
- у тривимірній постановці, зразки з боковим надрізом глибиною 1мм за формою аналогічним до основного надрізу;

Для кожного з перерахованих випадків були розглянуті три варіанти характеристик матеріалу, відповідні в'язкому, крихкому, квазікрихкому типу руйнування.

Для перевірки результатів експериментальних досліджень проведено аналіз моменту зародження тріщини для різних видів руйнування.

Для всіх видів руйнування визначено моменти часу, коли зароджується тріщина і відзначено на діаграмі «зусилля-час».

Для тривимірних задач знайдено окремо моменти зародження тріщини всередині зразка (в площині симетрії) і на бічній поверхні. Відповідно, зусилля на діаграмі  $P(t)$  у момент зародження тріщини всередині зразка менше, ніж  $P_{max}$ . На рис. 4 показано результати визначення моменту зародження тріщини для стандартних зразків Шарпі та зразків з боковими вирізами для випадку квазікрихкого руйнування.

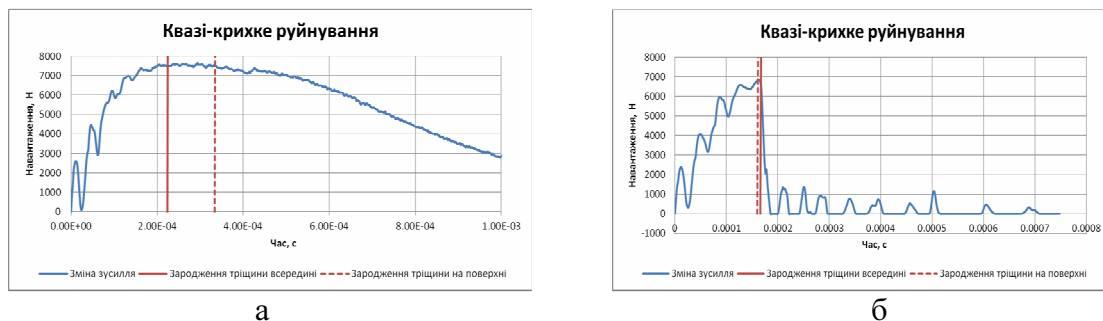
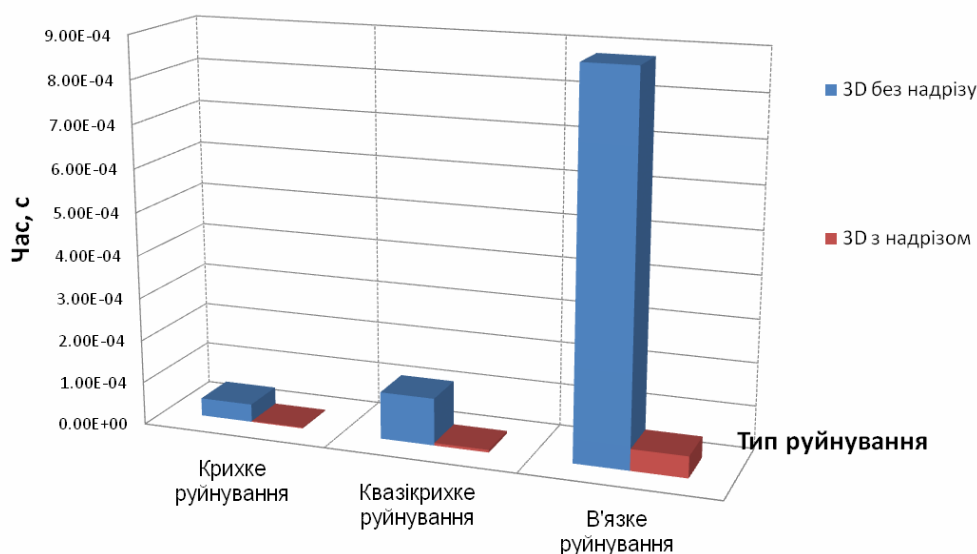


Рисунок 4. Моменти зародження тріщини в стандартних зразках Шарпі (а) та зразках з бічними надрізами на діаграмах «зусилля-час» для тривимірної задачі для випадку квазікрихкого руйнування

Figure 4. Moments of crack initiation in the standard Charpy specimens (a) and side-grooved specimens on the force-time diagrams for three-dimensional task in the case of quasi brittle fracture

Цей ефект пов'язаний з наявністю губ зрізу. Щоб виключити їх вплив, проведено розрахунки зразка Шарпі з бічними надрізами глибиною 1 мм. Отримані результати показали, що для зразка з надрізом і без нього, інтервал часу між зародженням тріщини всередині зразка і на зовнішній грані істотно відрізняються. Для зразків з надрізом цей інтервал значно менший, при цьому в деяких випадках зародження тріщини на «бічний» поверхні відбувається раніше, ніж усередині зразка. Таким чином, виключається вплив губ зрізу бічної кромки. Тріщина росте більш рівномірно по товщині зразка і з'являється можливість точніше визначити швидкість її поширення, що складно у випадку без надрізу, коли тріщина росте нерівномірно.

На рис. 5 наведено результати щодо різниці між моментами зародження тріщини всередині зразка і на бічній поверхні.



**Рисунок 5.** Різниця у часі між моментами зародження тріщини всередині зразка і на бічній поверхні для стандартних зразків Шарпі і зразків з бічними надрізами

**Figure 5.** Difference in time between the moments of crack initiation inside the specimen and on the side surface for the standard Charpy specimens and side-grooved specimens

**Висновки.** Розроблено й апробовано методику реєстрації зародження тріщини при випробуваннях на ударний згин на вертикальному інструментованому копрі. Проведено чисельне моделювання ударних випробувань стандартних зразків Шарпі та зразків з бічними надрізами в двовимірній і тривимірній постановках із використанням моделі пошкоджуваності матеріалу GTN. Результати експериментального та чисельного моделювання показали, що в стандартних зразках Шарпі різниця у часі між моментами зародження тріщини всередині зразка і на бічній поверхні значно більша, ніж у зразках з бічними надрізами, особливо при в'язкому руйнуванні.

Таким чином, результати вказують на перспективність використання зразків з глибокими боковими надрізами для підвищення інформативності результатів випробувань та для визначення характеристик тріщиностійкості металу.

**Conclusions.** Registration technique of crack initiation at impact loading tests on the instrumented drop-weight impact testing machine was developed. A numerical simulation of Charpy specimen's impact test in two-dimensional and three-dimensional formulations using GTN damage material model was fulfilled. Results of experimental and numerical simulations showed that the difference in time between the moments of crack initiation inside the specimen and lateral surface for standard Charpy specimens is much greater than in side-grooved specimens, especially for the case of ductile fracture.

Thus, the results show that the side-grooved specimens are available to make the test results more informative and to determine metal fracture toughness characteristics.

#### Список використаної літератури

1. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs ("VERLIFE"), European Commission. – 2008.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
3. Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000. (РД ЭО 1.1.2.09.0789-2009). – М.: РОСАТОМЭНЕРГО, 2009.
4. Proposed standard methods for instrumented pre-cracked Charpy impact testing of steels and other metallic materials // ESIS Procedure P7-00, Draft 25.4: December 2005.
5. Chaouadi R., Fabry A. On the utilization of the instrumented Charpy impact test for characterization the flow and fracture behavior of reactor vessel steels // Elsevier, P. 103 – 117, 2002.
6. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности [Текст] / В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака, А.А. Бабуцкий // Сб. «Надёжность и долговечность машин и сооружений». – 2006. – №27. – С. 120 – 127.
7. Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях [Текст] / Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака, В.В. Харченко и др. // Пробл. прочности. – 2005. – № 3. – С. 140 – 146.
8. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media // J. Eng. Mater. Tech. – 1977. – Vol. 99, №1. – P. 2 – 15.
9. Tvergaard V. On localization in ductile materials containing spherical voids // Int. J. Fract. – 1982. – Vol. 18, № 4. – P. 237 – 252.

*Отримано 05.08.2013*