

## 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

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

*Проведено ударні випробування стандартних зразків Шарпі, малорозмірних зразків та зразків із бічними надрізами за різних температур. Побудовано температурні залежності повної енергії деформування і руйнування та її складових для всіх типів зразків. За допомогою фрактографічних досліджень визначено в'язку складову зламів зразків та першу критичну температуру крихкості  $T_{50\%}$ .*

**Ключові слова:** зразок Шарпі, зразок із бічними надрізами, малорозмірний зразок, енергія деформування та руйнування, критична температура крихкості, фрактографічний аналіз.

**Вступ.** Проблема оцінки ресурсу корпусів реакторів (КР) АЕС на сьогодні є однією з найважливіших в атомній енергетиці як в Україні, так і в усьому світі. Світовий досвід щодо досліджень за даною проблематикою показує, що існуюча в Україні нормативна база потребує вдосконалення для коректного обґрунтування міцності і довговічності елементів 1-го контуру АЕС.

У зв'язку з пошуком додаткових резервів міцності при вирішенні питань продовження строків експлуатації КР АЕС розвиваються та вдосконалюються існуючі чисельні і експериментальні методики.

При оцінці ресурсу КР АЕС визначальну роль відіграють випробування зразків-свідків, методики обробки їх результатів та експериментальне обладнання. Оскільки часто доводиться аналізувати стан АЕС у понад проектний період, існує дефіцит зразків-свідків і опроміненого металу. Тому одним із пріоритетних завдань є вдосконалення існуючих експериментальних методик і розвиток нових методів випробувань. Особлива увага приділяється підвищенню інформативності випробувань зразків. За результатами ударних випробувань зразків Шарпі окрім енергії деформування та руйнування, критичної температури крихкості можна визначити характеристики тріщиностійкості матеріалу [1–3].

Окрема увага зосереджується на використанні різних типів зразків для проведення ударних випробувань. Зокрема, метод випробування зразків із бічними надрізами дозволяє уникнути утворення бічних утяжок, які впливають на визначення моменту зародження тріщини [4–6]. Використання малорозмірних зразків дає можливість зекономити кількість дефіцитного металу, але вимагає перерахунку даних через певні коефіцієнти [7, 8].

У даній роботі було проведено серію ударних випробувань зразків різних типів: стандартних зразків Шарпі, зразків із бічними надрізами та малорозмірних зразків, визначено енергетичні характеристики та проаналізовано вплив типу зразка на отримані результати.

**Методика проведення випробувань та обробки результатів.** Ударні випробування проводились на інструментованому вертикальному копрі [9], обладнаному багатоканальною системою реєстрації зусиль (частота дискретизації 20 МГц) та системою нагрівання і охолодження зразків у широкому діапазоні температур [10]. Для досліджень було виготовлено стандартні зразки Шарпі, малорозмірні і з глибокими бічними надрізами (рис. 1). Зразки з глибокими бічними надрізами розробляли

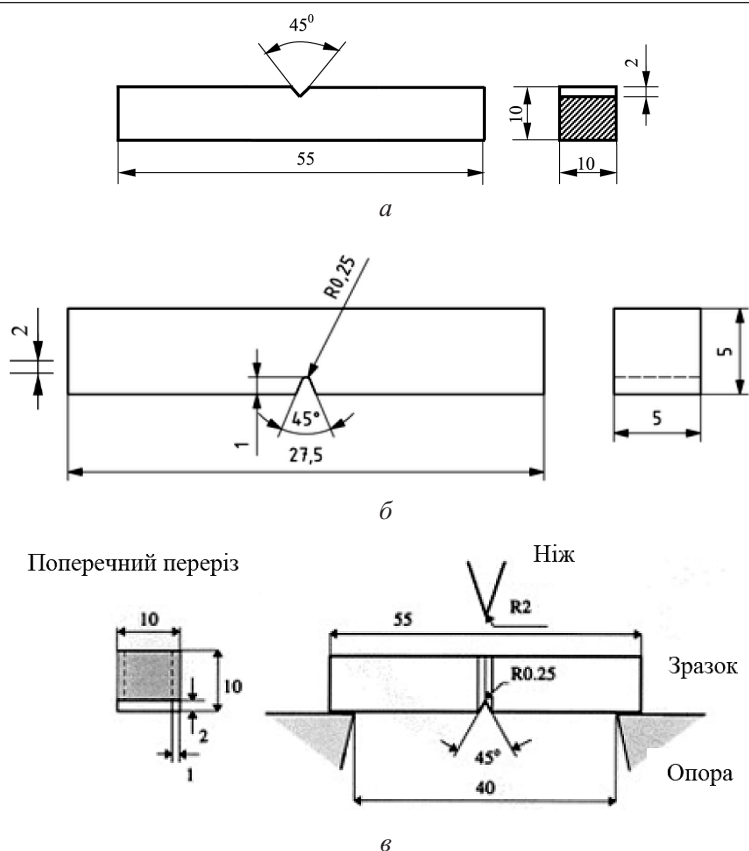


Рис. 1. Зразки для ударних випробувань: а – стандартний зразок Шарпі; б – малорозмірний зразок; в – зразок із глибокими бічними надрізами.

для дослідження впливу бічної утяжки на результати випробувань та експериментального визначення моменту зародження тріщини [4].

Всі зразки вирізали зі сталі 45 листового прокату вздовж напрямку прокату. Основний надріз виконували поперек напрямку прокату, щоб уникнути утворення вторинних тріщин при ударних випробуваннях. Було виготовлено по 30 зразків кожного типу з можливістю побудови кривої в'язкокрихкого переходу і визначення критичної температури крихкості. Ударні випробування проводили для всіх типів досліджуваних зразків у діапазоні температур  $T = -50 \dots 150^\circ\text{C}$ .

#### Аналіз результатів ударних випробувань зразків різних типів.

**Діаграми деформування та руйнування.** На рис. 2 представлено діаграми зміни зусилля  $P$  від часу  $t$ , отримані за результатами випробувань зразків усіх типів. Видно, що за температури випробувань  $-50^\circ\text{C}$  руйнування зразків завершується ділянкою крихкого проскоку. Діаграма на рис. 2, б описує в'язкокрихке руйнування стандартних зразків Шарпі та зразків із боковими надрізами. Для малорозмірних зразків спостерігається чітко виражена зона в'язкого долому за температури випробувань  $35^\circ\text{C}$ . За температури  $75^\circ\text{C}$  характер руйнування малорозмірних зразків в'язкий, в той час як для зразків інших двох типів має місце зона крихкого проскоку нестабільної тріщини та в'язкого долому. За температури  $120^\circ\text{C}$  характер руйнування всіх зразків в'язкий. Це свідчить про те, що критична температура крихкості для малорозмірних зразків нижча, ніж для стандартних зразків Шарпі та зразків із бічними надрізами.

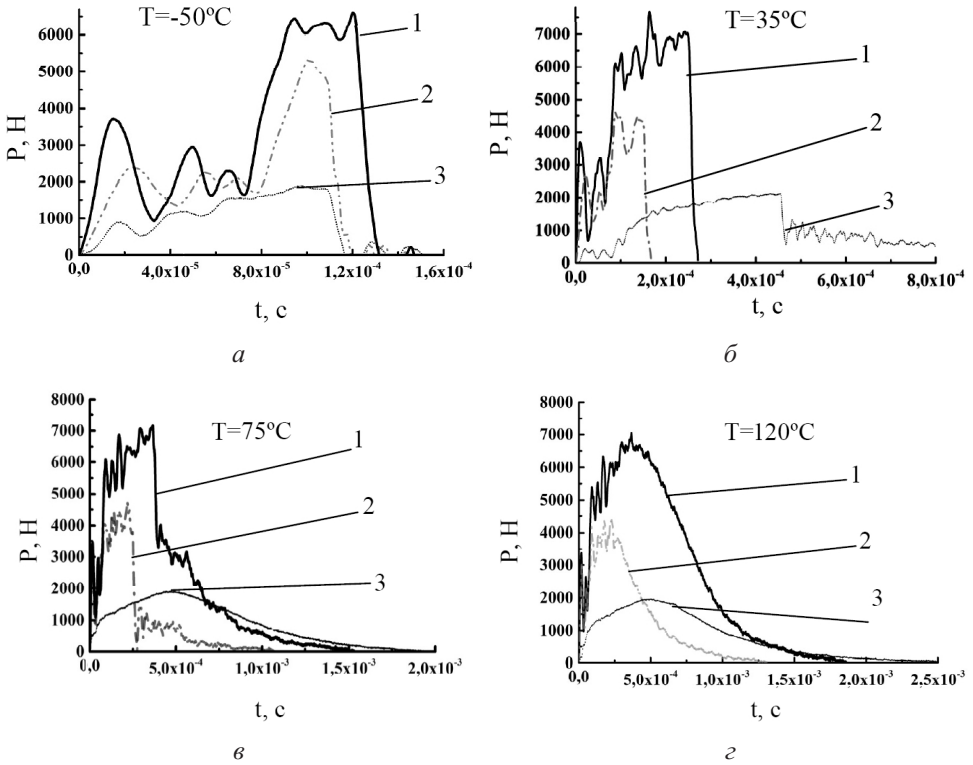


Рис. 2. Діаграми деформування зразків за різних температур випробування: а – крихке руйнування; б, в – в'язкокрихке руйнування; г – в'язке руйнування (1 – стандартні зразки Шарпі; 2 – зразки з бічними надрізами; 3 – малорозмірні зразки).

**Визначення енергії деформування та руйнування.** Висока точність і чутливість системи реєстрації дозволяє розділити діаграму зусилля на характерні ділянки, що дає можливість оцінити величину складових повної енергії деформування і руйнування. Розділення повної енергії деформування і руйнування на складові проводилось за діаграмою  $P(t)$  (рис. 3).

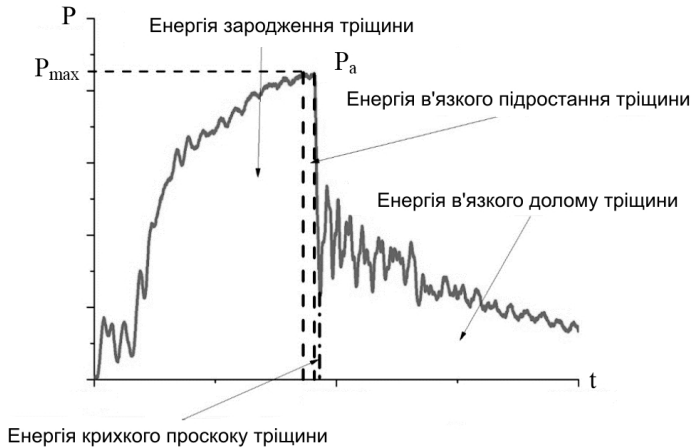


Рис. 3. Розділення повної енергії деформування і руйнування на складові.

Повна енергія деформування та руйнування  $E_t$  розділялась на енергію зародження тріщини  $E_{in}$ , енергію стабільного (в'язкого) підростання тріщини  $E_{dg}$ , енергію нестабільного (крихкого) проскоку тріщини  $E_b$  та енергію в'язкого долому  $E_{dr}$ . 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 [11], що передбачає перетворення діаграми  $P(t)$  в  $P(s)$ .

На рис. 4 наведено температурні залежності питомої енергії розповсюдження тріщин у характерних зонах зламу зразків усіх типів. 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:

$$\delta E = E_i / S_i,$$

де  $E_i$  – енергія руйнування на цій ділянці (площа під кривою на характерній ділянці діаграми);  $S_i$  – площа характерної зони зламу, що відповідає ділянці діаграми.

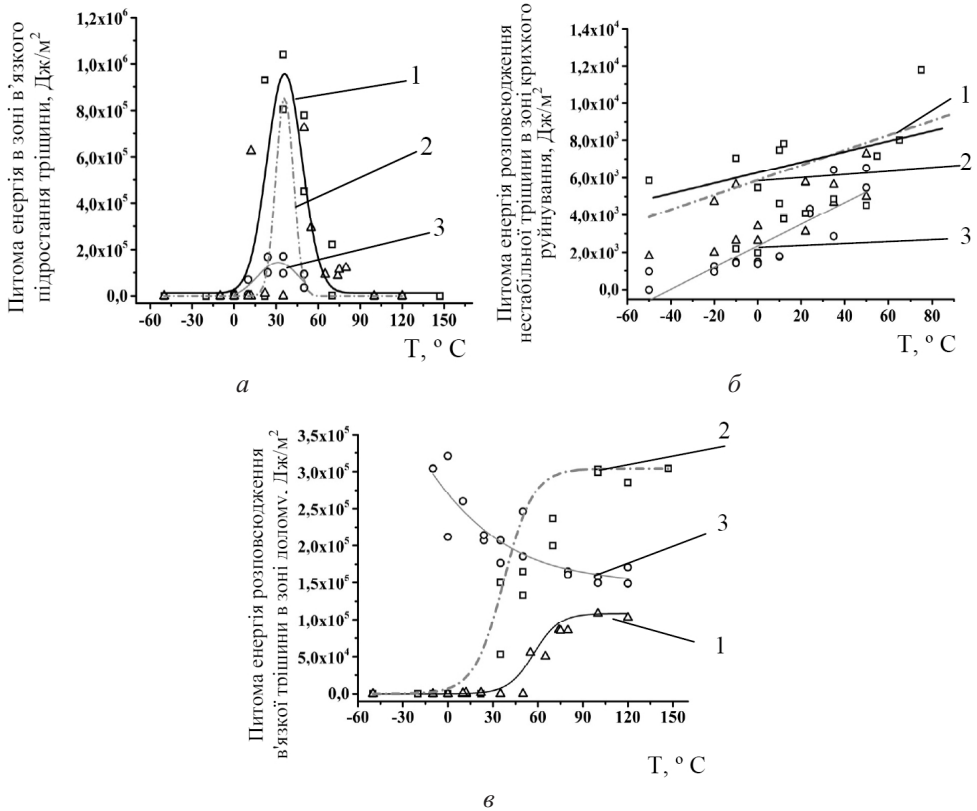


Рис. 4. Температурна залежність питомої енергії розповсюдження тріщин. (Тут і на рис. 5–9: 1 – стандартні зразки Шарпі; 2 – зразки з бічними надрізами; 3 – малорозмірні зразки.)

За питомою енергією руйнування можна визначити енергію, що витрачається тріщиною при її поширенні в одиниці об'єму. 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 в'язкого ямкового. Застосування фрактографічних методів дослідження спільно з

аналізом діаграм контакту ножа зі зразком дозволяє порівняти питому енергію на характерному етапі поширення тріщини з механізмом руйнування, що спостерігається у відповідній зоні зламу.

Питома енергія на ділянці стабільного підростання тріщини сягає максимуму за температури  $T = 36^{\circ}\text{C}$  (рис. 4,а). Зокрема, 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. 4,б).

Питома енергія розповсюдження в'язкої тріщини на ділянці долому зростає з підвищенням температури для стандартних зразків Шарпі і зразків із бічними надрізами і знижується для малорозмірних зразків (рис. 4,в).

На рис. 5 показано діаграми температурних залежностей повної питомої енергії руйнування для трьох типів досліджуваних зразків. Видно, що для малорозмірних зразків крива зміщена вліво, що зумовлено масштабним ефектом [8, 12].

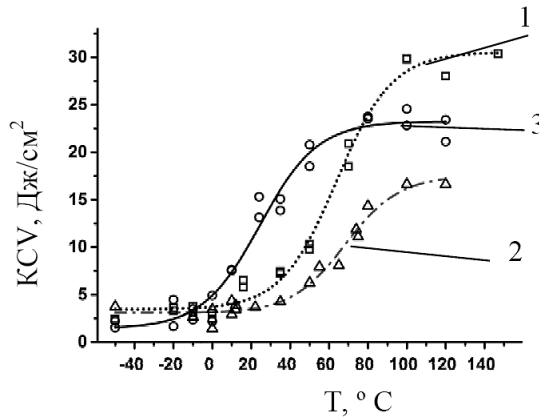


Рис. 5. Температурна залежність питомої енергії руйнування для трьох типів зразків.

Апроксимуючі криві для питомої енергії руйнування побудовано за методикою [13], яку рекомендовано нормативним документом [14], із використанням функції гіперболічного тангенса:

для стандартних зразків Шарпі:

$$KCV = 16,99 + 13,56 \tanh\left(\frac{T + 63,92}{28,57}\right);$$

для зразків із боковими надрізами:

$$KCV = 10,36 + 7,33 \tanh\left(\frac{T + 69,11}{31,23}\right);$$

для малорозмірних зразків:

$$KCV = 12,61 + 10,96 \tanh\left(\frac{T + 23,05}{29,79}\right).$$

Результати фрактографічних досліджень дозволяють оцінити величини зон розповсюдження тріщини. Довжина зони нестабільного проскоку тріщини зменшується з підвищенням температури випробувань (рис. 6,а), у той час як довжина зони долому збільшується (рис. 6,б). При цьому значення довжини зони долому для всіх типів зразків практично збігаються.

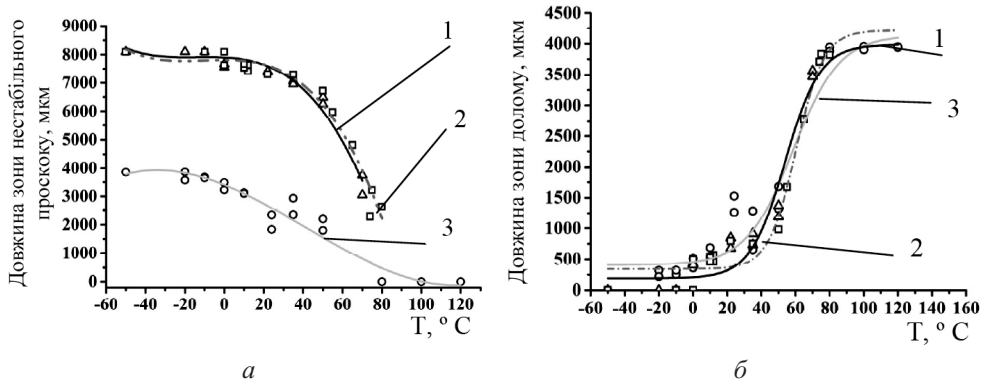


Рис. 6. Температурна залежність довжини зони нестабільного проскоку тріщини (а) і зони долому (б) для всіх типів зразків.

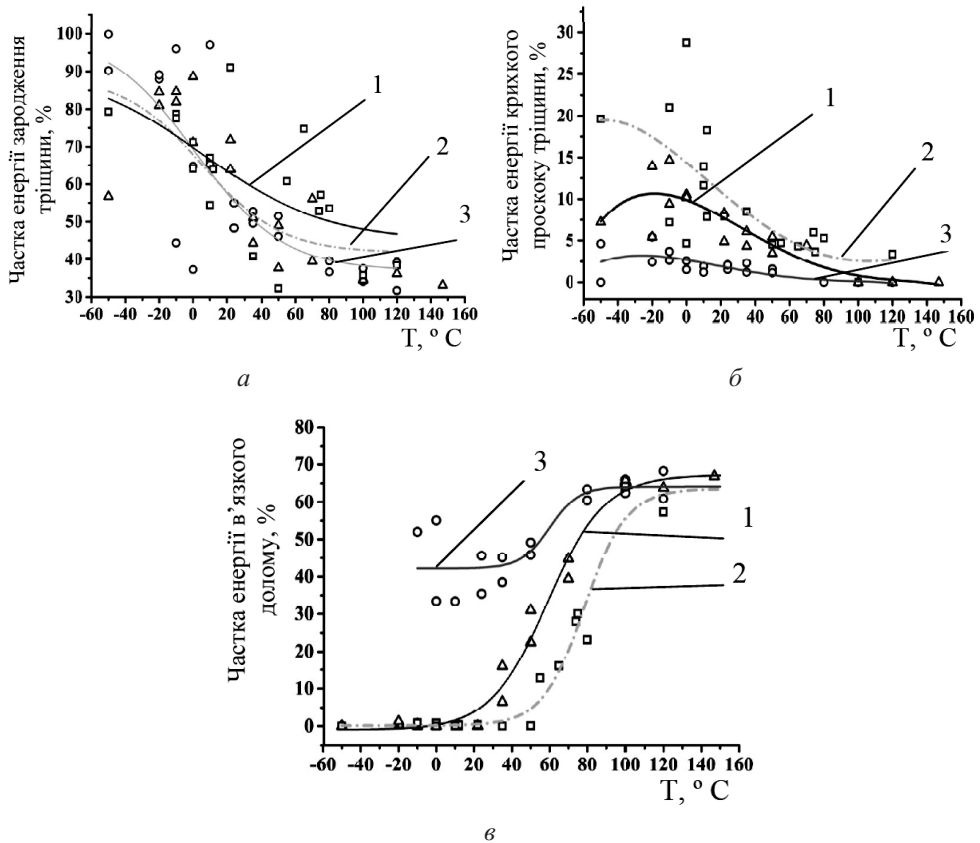


Рис. 7. Температурна залежність часток енергії на різних ділянках діаграми контакту ножа зі зразком.

На рис. 7 наведено температурну залежність часток енергії на різних ділянках для всіх типів зразків. Видно, що внесок енергії зародження тріщини зменшується з підвищенням температури випробувань, а енергії в'язкого долому, навпаки, збільшується. Відмінність у внеску енергій зародження і підростання тріщини для стандартних зразків Шарпі і зразків із бічними надрізами зумовлена похибкою визначення моменту зародження тріщини.

Рис. 8 ілюструє температурну залежність середньої швидкості розповсюдження тріщини при руйнуванні зразків. Значення швидкості визначено як відношення довжин відповідних зон на зламі зразка, отриманих методами кількісної фрактографії, до часу розповсюдження тріщини (руйнування) на відповідній ділянці діаграми контакту ножа зі зразком:

$$v_{cp} = L_i / t_i,$$

де  $L_i$  – довжина характерної зони на зламі зразка (зони в'язкого підростання, крихкого руйнування, долому);  $t_i$  – час розповсюдження тріщини на відповідній ділянці діаграми (рис. 3).

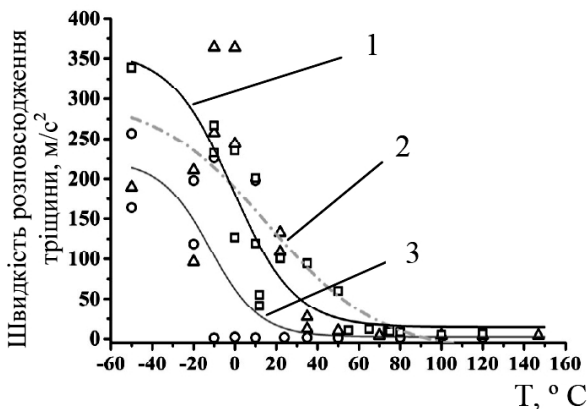


Рис. 8. Температурна залежність середньої швидкості розповсюдження тріщини при руйнуванні зразків.

Як видно з рис. 8, середня швидкість розповсюдження тріщини знижується зі збільшенням температури випробувань для всіх типів зразків.

**Визначення критичної температури крихкості** є одним із найбільш важких і складних завдань сучасної фізики металів. Існують різноманітні методи визначення цієї характеристики. Метод визначення критичної температури крихкості для таких відповідальних конструкцій, як елементи атомних енергетичних установок, регламентується нормативним документом [14], в основу якого покладено залежність ударної в'язкості від границі плинності за температури 20°C. Досліджуваний матеріал не належить до цієї категорії сталей. Під критичною температурою крихкості будемо розуміти температуру, яка приймається за границю зміни характеру руйнування матеріалу від крихкого до в'язкого. Вона визначається за енергією, що витрачається на руйнування (ударна в'язкість), та по виду зламу зразків, за показник якого приймається частка в'язкої складової або значення поперечного розширення зразка в зоні зламу. Виділяють дві критичні температури крихкості [15, 16]. Перша критична температура характеризує точку переходу матеріалу з в'язкого стану до квазікрихкого [17]. Зі зниженням температури крихкість матеріалу збільшується. Друга критична температура характеризує точку переходу матеріалу з квазікрихкого стану в крихкий. Першу критичну температуру крихкості  $T_{50\%}$  можна визначити по виду зламу. При

цьому за критичну приймають температуру  $T_k = T_{50\%}$ , за якої частка в'язкої складової в зламі становить 50% усієї площі зламу [15].

Було проведено фрактографічні дослідження поверхонь зламів зразків усіх типів і оцінено в'язку складову. За отриманими залежностями в'язкої складової зламу зразка від температури та температурною залежністю енергії руйнування досліджуваних зразків було визначено першу критичну температуру крихкості (рис. 9).

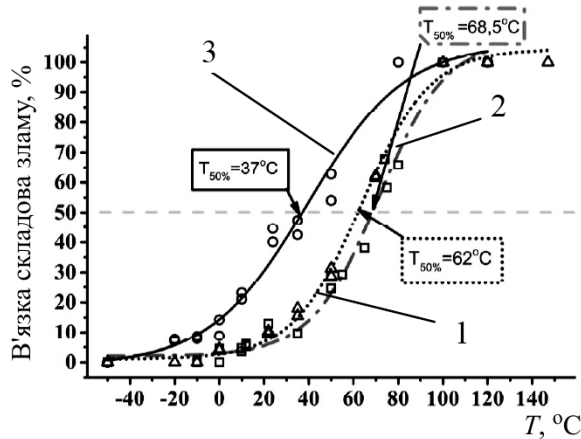


Рис. 9. Залежність в'язкої складової зламу від температури для трьох типів зразків.

Як видно, метод визначення критичної температури крихкості за в'язкою складовою чутливий до розміру зразка і слабчутливий до типу концентратора. Так, для малорозмірних зразків отримано  $T_{50\%} = 37^\circ\text{C}$ , для стандартних зразків Шарпі –  $62^\circ\text{C}$ , для зразків із бічними надрізами –  $68,5^\circ\text{C}$ .

## Висновки

1. Проведено ударні випробування стандартних зразків Шарпі, малорозмірних зразків та зразків із бічними надрізами зі сталі 45 за різних температур на інструментованому вертикальному копрі. Побудовано температурні залежності повної енергії деформування і руйнування та її складових.

2. За результатами фрактографічних досліджень для різних типів зразків отримано температурні залежності питомої енергії в різних зонах поверхні зламу та проведено їх порівняння.

3. Розраховано середні швидкості розповсюдження тріщини в зразках різних типів у залежності від температури випробування.

4. За допомогою фрактографічних досліджень визначено в'язку складову зламів зразків та критичну температуру крихкості  $T_{50\%}$ . Показано, що розмір зразка, на відміну від типу концентратора, впливає на величину критичної температури крихкості.

## Резюме

Проведены ударные испытания стандартных образцов Шарпи, малоразмерных образцов и образцов с боковыми надрезами при различных температурах. Построены температурные зависимости полной энергии деформирования и разрушения и ее составляющих для всех типов образцов. С помощью фрактографических исследований определены вязкая составляющая изломов образцов и критическая температура хрупкости  $T_{50\%}$ .



1. Cao L. W., Wu S. J., and Flewitt P. E. J. Comparison of ductile-to-brittle transition curve fitting approaches // Int. J. Pres. Ves. Pip. – 2012. – **93–94**. – P. 12–16.
2. Yu M., Luo Z., and Chao Y. J. Correlations between Charpy V-notch impact energy and fracture toughness of nuclear reactor pressure vessel (RPV) steels // Eng. Fract. Mech. – 2015. – **147**. – P. 187–202.
3. Schindler H. J. Estimation of the dynamic  $J$ - $R$ -curve from a single impact bending test // Mechanisms and Mechanics of Damage and Failure (Proc. of the ECF 11, Sept. 3–6, 1996, Poitiers, France), 1996. – P. 2007–2012.
4. Кондряков Е. А., Панасенко А. В., Харченко В. В. Экспериментальное определение момента зарождения трещины в стандартных образцах Шарпи и образцах с боковыми надрезами // Пробл. прочности. – 2015. – № 2. – С. 88–94.
5. Zhang X. P. and Shi Y. W. Fracture toughness of Charpy-size compound specimens and its application in engineering // Int. J. Pres. Ves. Pip. – 1994. – **57**. – P. 91–98.
6. Neale B. K. The influence of side-grooving on precracked Charpy specimens in bending // Ibid. – 1982. – **10**. – P. 375–398.
7. Wallin K., Planman T., and Valo M. Fracture mechanics based scaling criteria for miniature and sub-size Charpy-V specimens // ESIS Publ. – 2002. – **30**. – P. 279–286.
8. Chernobaeva A. A., Medvedev K. I., Zhurko D. A., et al. Scale factor of standard and mini Charpy specimens from VVER-1000 RPV materials // Int. J. Pres. Ves. Pip. – 2016. – **145**. – P. 23–28.
9. Харченко В. В., Кондряков Е. А., Жмака В. Н., Бабуцкий А. А. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – № 27. – С. 120–127.
10. Kondryakov E. A., Zhmaka V. N., Kharchenko V. V., et al. System of strain and load measurement in dynamic testing of materials // Strength Mater. – 2005. – **37**, No. 3. – P. 331–335.
11. ISO 14556:2000. Steel – Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. – International Organization for Standardization. – Introduced since January 5, 2000.
12. Николаев В. А., Марголин Б. З., Рядков Л. Н., Фоменко В. Н. Анализ применимости малоразмерных образцов для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения // Пробл. прочности. – 2009. – № 2. – С. 5–26.
13. Oldfield W. Curve fitting impact test data: a statistical procedure // ASTM Stand. News. – 1975. – **3**, No. 11. – P. 24–29.
14. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
15. Горицкий В. М. Диагностика металлов. – М.: Металлургия, 2004. – 408 с.
16. Немец Я. К. Жесткость и прочность стальных деталей / Пер. с чеш. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1970. – 528 с.
17. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: Наука, 2006. – 328 с.

Поступила 10. 04. 2017