

DOI: <https://doi.org/>

ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ НА КОРОТКИХ ЗРАЗКАХ З ГОСТРИМ ШЕВРОННИМ НАДРІЗОМ

М. М. ГВОЗДЮК^{1,2}, В. М. ПАЛЮХ², Т. В. ГЕМБАРА³

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Визначено критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} за умови плоскої деформації згідно з вимогами стандарту ISO 12135:2021. Описано альтернативні методи встановлення в'язкості руйнування. Як найбільш перспективну оцінено методику визначення коефіцієнта K_{IC} на коротких прямокутних зразках квадратного перерізу зі шевронним надрізом. Описано експериментальне її випробування, а також порівняно в'язкість руйнування, одержану стандартним методом на компактних зразках, з визначеною на зразках зі шевронним надрізом.

Ключові слова: механіка руйнування, тріщиностійкість, в'язкість руйнування, шевронний надріз, плоска деформація.

The critical stress intensity factor K_{IC} under the condition of plane deformation was determined in accordance with the requirements of ISO 12135:2021 Alternative methods for determining fracture toughness were described. The method of calculating the K_{IC} coefficient using short rectangular samples of a square section with a chevron notch was evaluated as the most promising. The experimental testing of the method was described, and the fracture toughness obtained by the standard method on compact samples and that with a chevron notch was compared.

Keywords: fracture mechanics, crack growth resistance, fracture toughness, chevron notch, plane deformation.

Вступ. Сьогодні на нафтогазопроводах країни зростає кількість аварійних ситуацій. Це пов'язано зі складними умовами тривалої експлуатації технологічного обладнання, зокрема, за різних видів механічних, теплових і корозійних навантажень. Структура матеріалу деградує, через що погіршуються характеристики опірності крихкому і втомному руйнуванню [1]. Тому надійність таких конструкцій оцінюють за механічними характеристиками металу з тріщинами і тріщиноподібними дефектами [2]. У стандарті ISO 12135:2021 [3] для визначення характеристик в'язкості руйнування під статичним навантаженням як основні рекомендують випробування зі встановлення критичного значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{IC} за плоскої деформації [4], за яким для даного матеріалу розрахують напруження, яке спричинить нестабільне руйнування за наявності в тілі дефекту певних розміру і форми [5]. Тобто за цим параметром і довжиною тріщини можна знайти руйнівні напруження і оцінити міцність конструкції.

Умови плоскої деформації вважають виконаними, якщо розмір пластичної зони біля вершини тріщини не перевищує 1/50 будь-якого характерного розміру зразка, зокрема товщини t , розміру нетто-перетину $(B-l)$ або довжини тріщини l ,

чого досягають, якщо

$$t, (B-l), l \geq \beta [K_{IC} / \sigma_{0,2}]^2, \quad (1)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, що враховує стиснення матеріалу за пластичних деформацій ($\beta = 2,5$ – для алюмінієвих, титанових, магнієвих сплавів і сталей).

Через вимогу виконати умову (1) застосування вказаної характеристики тріщиностійкості обмежене, що призводить у низці випадків до суперечливих ситуацій [4]: під час використання пластичних сталей необхідно випробувати зразки, товщини яких більші, ніж конструкційних елементів; під час експериментального визначення КІН слід випробовувати зразки з тріщинами, розміри яких істотно перевищують допустимі за вимогами дефектоскопічного контролю.

Жорсткі вимоги до розмірів експериментальних зразків перешкоджають використанню стандартних методів лінійної механіки руйнування для випробувань на тріщиностійкість, оскільки товщина стінки труби магістральних продуктопроводів становить від 6 до 22 мм. Встановити достовірні характеристики тріщиностійкості тоді практично неможливо, оскільки розміри зразків, необхідні для їх коректного визначення, перевищують товщини труб [6, 7].

Внаслідок обмежень, пов'язаних з визначенням параметра K_{IC} за стандартними методами, а також через підвищену складність випроб, виконували експериментальні дослідження, щоб спростити визначення в'язкості руйнування. У різних джерелах її пропонують оцінювати за статичним і циклічним навантаженнями, результатами фрактографічного аналізу та випробувань на твердість. Однак ці дослідження стосувалися або вузького класу конструкційних матеріалів, або були надто складні [8]. Тому виникла необхідність розробити прості методи визначення характеристик тріщиностійкості металів для зразків малих розмірів, що враховують як крихку, так і пластичну поведінку матеріалу. Ґрунтуючись на практичних результатах, в'язкість руйнування визначали на коротких циліндричних або прямокутних зразках квадратного перерізу зі шевронним надрізом (рис. 1). Американське товариство з випробувань та матеріалів (American Society for Testing and Materials) розробило для цього стандарт ASTM E1304-97 [9].

В'язкість руйнування за максимального навантаження квадратного зразка розраховували за формулою

$$K_Q = \frac{P_{\max} \cdot Y_{\min}^*}{B\sqrt{W}}, \quad (2)$$

де $P_{\max}$ – максимальне навантаження; $Y_{\min}^*$ – коефіцієнт мінімальної інтенсивності напружень; B – товщина і висота зразка; W – довжина шевронного надрізу.

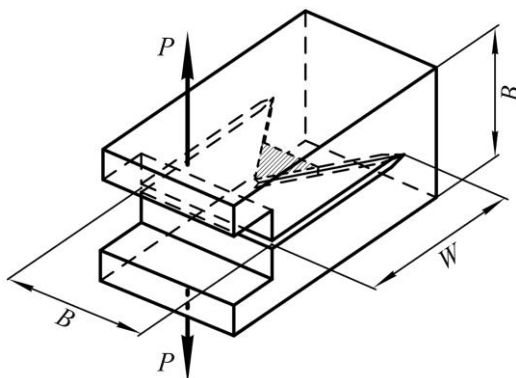


Рис. 1. Схема навантаження короткого прямокутного зразка зі шевронним надрізом.

Fig. 1. Loading mode of a short rectangular specimen with a chevron notch.

Матеріали та методика випроб. Для перевірки формули (2) спочатку визначали КІН K_{IC} за стандартною методикою (ISO 12135:2021). Стандартні прямокутні компактні зразки з крайовим надрізом і створеною із його вершини втомною тріщиною випробовували на позацентровий розтяг (рис. 2). Виготовили десять зразків із вуглецевих сталей 20 та 35ХСН3МА (по п'ять штук з кожної). Усі експерименти виконували на універсальній електромеханічній розривній машині FPZ-100 за швидкості навантаження 2 mm/min^2 і з записом діаграми навантаження–розкриття берегів надрізу.

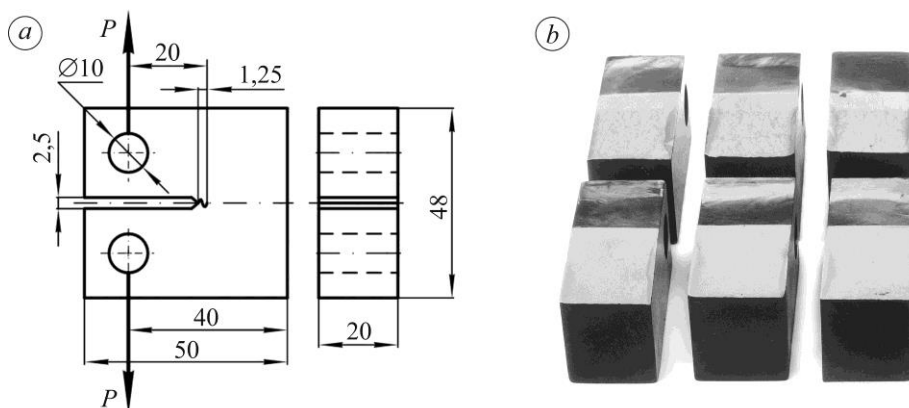


Рис. 2. Схематичне зображення компактного зразка (а) та зруйновані зразки зі сталей 20 та 35ХСН3МА (b).

Fig. 2. Schematic image of a compact sample (a) and damaged samples of steels 20 and 35XCH3MA (b).

Щоб апробувати значення в'язкості руйнування, отримані експериментально на прямокутних коротких зразках зі шевронним надрізом, також виготовили десять зразків зі сталей 20 і 35ХСН3МА (по п'ять з кожного матеріалу). Зразки у перерізі мали форму квадрата зі стороною $B = 17 \text{ mm}$, довжиною шевронного надрізу $W = 24,5 \text{ mm}$ (рис. 3а). Для зразків зі співвідношенням $W/B = 1,45$ коефіцієнт $Y_{min}^* = 29,215$. Кут вершини шеврона 60° . Шевронний надріз наносили дисковою фрезою $\varnothing 75 \text{ mm}$, товщиною $1,6 \text{ mm}$, заточеною під кутом 60° , і радіусом різальної крайки $0,1 \text{ mm}$.

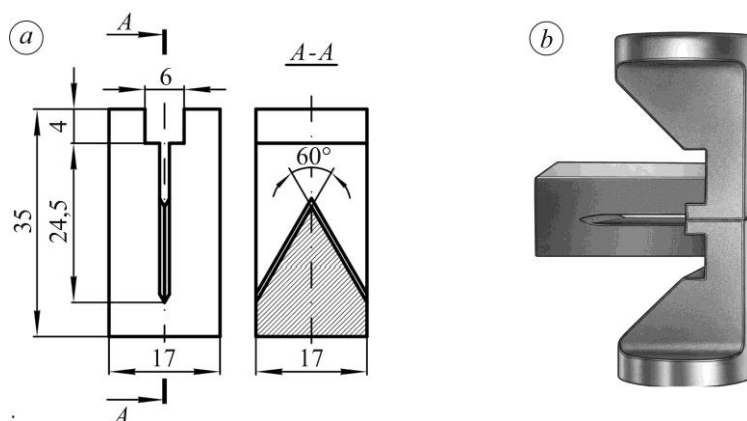


Рис. 3. Схема коротких зразків зі шевронним надрізом (а) та пристосування для навантаження (b).

Fig. 3. Schematic of short specimens with a chevron notch (a) and a loading device (b).

Для експериментальних досліджень згідно з рекомендаціями ASTM E1304-97 [9] також використовували машину FPZ-100. Зразок кріпили у спеціальних захоплювачах (рис. 3b) і розтягували зі швидкістю 2 mm/min до повного руйнування з реєстрацією діаграми зміни навантаження. Під час експерименту тріщина від вершини надрізу поширювалася стабільно, без стрибків. Поверхня руйнування шевронного надрізу матова з поздовжніми хвилями для сталі 20 та поперечними – для сталі 35XCH3MA (рис. 4).

Переміщення берегів шевронного надрізу не фіксували, оскільки в'язкість руйнування K_Q розраховували тільки за максимальним навантаженням за формулою (2). Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці. Виявили, що отримані за формулою (2) середні значення K_Q для коротких прямокутних зразків зі шевронним надрізом незначно перевищують значення K_{IC} для стандартних зразків: для сталі 35XCH3MA – на 15%, а для сталі 20 – на 7%.

Результати визначення K_{IH} , отримані на стандартних компактних зразках зі шевронним надрізом

Матеріал	№ зразка	K_{IC} , МПа $\sqrt{м}$; компактний зразок (ISO 12135:2021)	$\bar{K}_{IC}$, МПа $\sqrt{м}$	K_Q , МПа $\sqrt{м}$; зразок зі шевронним надрізом	$\bar{K}_Q$, МПа $\sqrt{м}$
Сталь 35XCH3MA	1	40,5	38,6	42,6	44,5
	2	36,0		45,4	
	3	38,0		40,0	
	4	43,5		46,5	
	5	35,0		48,0	
Сталь 20	1	58,5	58,5	63,8	62,5
	2	62,0		66,0	
	3	60,0		63,0	
	4	57,2		60,4	
	5	54,8		59,3	

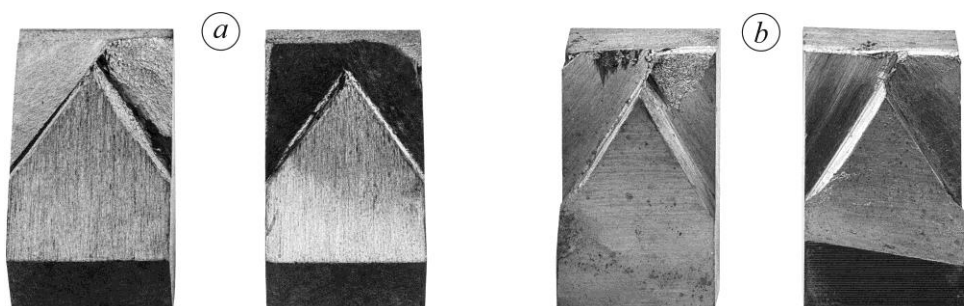


Рис. 4. Поверхні руйнування зразків зі шевронним надрізом:
a – сталь 20; b – сталь 35XCH3MA.

Fig. 4. Fracture surfaces of samples with a chevron notch:
a – steel 20; b – 35XCH3MA steel.

ВИСНОВКИ

Експериментальною апробацією методики визначення в'язкості руйнування K_Q на коротких прямокутних зразках квадратного перерізу зі шевронним надрізом (ASTM E1304-97) зі сталей 20 та 35ХСН3МА встановлено задовільну збіжність зі значеннями K_{IC} , отриманих на стандартних компактних зразках (ISO 12135:2021).

Метод визначення в'язкості руйнування на коротких зразках зі шевронним надрізом має переваги проти стандартного, зокрема, відсутня процедура вирощування втомної тріщини; можливість застосувати і для крихких, і для в'язких матеріалів; економія матеріалу через малі розміри зразків; зменшення вартості та часу випробувань.

1. *Influence of the long-term operation of gas pipelines on the cyclic crack-growth resistance of 17G1S steel* / E. V. Kharchenko, S. Klysz, V. M. Palyukh, and T. M. Lenkovs'kyi // *Materials Science*. – 2017. – **52**, Is. 6. – P. 827–833. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0027-5>
2. *Development of fracture mechanics approaches for assessing the state of long-term operated defective pipes of main gas pipelines* / Ye. I. Kryzhanivskyi, R. S. Hrabovskyy, O. M. Tuts, O. M. Mandryk, V. B. Zapukhliak and I. M. Fartushok // *Materials Science*. – 2025. – **61**, Is. 3. – P. 359–365. <http://doi.org/10.15407/pcomm.2025.03.077>
3. *ISO 12135:2021. Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasi-static fracture toughness*. – Geneva: Int. Organization for Standardization, 2021. – 100 p.
4. *Panasyuk V. V. Strength and Fracture of Solids with Cracks*. – Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2002. – 466 p.
5. *Ostsemin A.A. A method of determining the crack resistance of thin-sheet tube steels* // *Strength Mater.* – 1987. – **19**, No. 1. – P. 17–22. <https://doi.org/10.1007/BF01524455>
6. *Method for evaluating the crack resistance of small sized metallic materials* / V. A. Rakovskii, V. P. Naumenko, V. I. Prokhorov, and A. V. Golubenko // *Strength Mater.* – 1993. – **25**, No. 6. – P. 417–424. <https://doi.org/10.1007/BF00773028>
7. *Wu S.-X. Fracture toughness determination of bearing steel using chevron-notch three-point bend specimen* // *Eng. Fract. Mech.* – 1984. – **19**, Is. 2. – P. 221–232. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(84\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0013-7944(84)90017-1)
8. *Grant T. J., Weber L., and Mortensen A. Plasticity in Chevron-notch fracture toughness testing* // *Eng. Fract. Mech.* – 2000. – **67**, No. 3. – P. 263–276. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00061-8)
9. *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Plain Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials (ASTM E 1304-97)*. – Philadelphia, 2005.

Одержано 22.12.2025