

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ДЕФЕКТІВ СТАЛІ ВОДОПРОВІДНИХ ТРУБ НА СПРОТИВ РУЙНУВАННЮ

Валерій Макаренко<sup>1</sup>, Володимир Гоц<sup>2</sup>, Володимир Піпа<sup>3</sup>,  
Тетяна Аргатенко<sup>4</sup>, Володимир Азутів<sup>5</sup>, Ірина Нестеренко<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Херсонський національний технічний університет  
24, Бериславське шосе, Херсон, 73008, Україна

<sup>2,3,4,5,6</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна

<sup>1</sup> докт. техн. наук, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9178-9657

<sup>2</sup> докт. техн. наук, gots.vi@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-7702-1609

<sup>3</sup> канд. техн. наук, pipa.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4646-1083

<sup>4</sup> канд. техн. наук, argatenko.tv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-2516-2906

<sup>5</sup> канд. техн. наук, azutov.vp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-3071-367X

<sup>6</sup> канд. техн. наук, nesterenko.is@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-9619-7471

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.17-24

**Анотація.** Низьколеговані будівельні сталі характеризуються недостатньо високими і стабільними корозійно-механічними властивостями, а також спротивом проти втомного руйнування в процесі тривалої експлуатації в агресивних середовищах. Представлені результати експериментальних досліджень впливу металургійних дефектів сталі безперервної розливки на спротив руйнуванню водопровідних труб. Використовувались низьколеговані сталі 08ХМЧА і 06Х1. Проведені дослідження зміни швидкості розповсюдження руйнування, залежності ударної в'язкості по Менаже від рівня робочих напружень, мало циклової втомленості при випробуванні на повітрі та в агресивному середовищі NACE. Встановлено динаміку поширення магістральних тріщин. Показана закономірність зміни параметрів в'язкості та спротиву втомленої міцності в залежності складу дослідних сталей.

**Ключові слова:** труба, тріщина, в'язкість, втомлена міцність.

### ВСТУП

Однією з основних причин руйнувань водопровідних труб є їх корозійне ушкодження. За результатами спостережень стану водопровідних мереж в Україні [1-4] у більшості випадків корозія вражає зовнішню поверхню трубопроводу (до 42 % відмов), в той час як на частку аварій в зв'язку з корозією внутрішньої поверхні приходить близько 15-18 %. Зі збільшенням тривалості експлуатації трубопроводів небезпека їх корозійного руйнування зростає.

Відомо, що низьколеговані будівельні сталі характеризуються недостатньо високими і стабільними корозійно-механічними

властивостями, а також спротивом проти втомного руйнування в процесі тривалої експлуатації в агресивних середовищах [5-10].

Основний об'єм сталі для виробництва водопровідних труб виплавляється в мартенівських печах, киснево-конвертерних агрегатах і в невеликих об'ємах – в індукційних установках. Основна перевага перших агрегатів – висока продуктивність. Якість киснево-конвертерної сталі суттєво залежить від ступеню очистки кисню, що застосовується для продувки розплавленого металу. Фактично мартенівська і киснево-конвертерна сталь використовується для

виготовлення труб на рівних умовах. На властивості сталі більше впливають ступінь розкислення, характер мікролегування, методи прокатки та інші процеси виробництва [11-14]. Для забезпечення високої якості трубної сталі важливе значення має кінцеве розкислення низьколегованої сталі алюмінієм і кальцієм, її модифікація рідкоземельними металами, зокрема церієм. Ці операції виконуються з метою покращення структури катаної сталі, регламентації кількості і форми неметалевих включень. Обробка сталі в розливному ківші усуває міцні гострокутові включення в металі, які спричиняють напруження, переводить залишки оксидів і оксисульфідів в міцні глобулярні включення, які не знижують міцність сталі. З підвищенням чистоти сталі та її однорідності збільшується в'язкість і пластичність, підвищується зварюваність та спротив сталі руйнуванням в конструкції. Максимальне зниження забрудненості, практична відсутність рядкових включень і гострокутових оксисульфідів, які виявляються концентраторами напружень, досягається при одночасному введенні в сталь алюмінію (002-005%), кальцію (0003%) і церію (001-003%). Така обробка сталі в ківші дозволяє знизити індекс забрудненості неметалевих включень у 3-7 разів, при цьому залишкові включення приймають глобулярну форму. Разом із тим така обробка сталі сприяє зниженню вмісту в металі газів – кисню і азоту. В результаті пластичність і в'язкість сталі сягають можливого максимуму, помітно покращується зварюваність. Метод безперервної розливки має й свої недоліки. Зокрема при безперервній розливці розплавленого металу відсутня можливість додаткової очистки сталі від шкідливих домішок, як це мало місце при розливці металу у виливницю, коли неметалеві включення і гази в значній мірі спливали і зосереджувалися у вхідній частині, яка потім відрізала від основного злитку. При безперервній розливці усі шкідливі домішки в сталі залишаються в прокаті, а тому для отримання високоякісної сталі, необхідної для виробництва водопровідних труб, потрібно забезпечити якомога більш повну

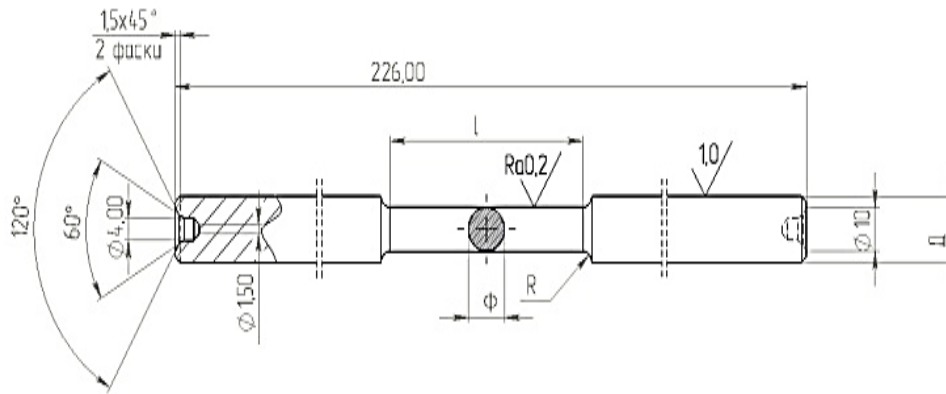
очистку чавуну і сталі в процесі їх виплавки і розливання. Для цього застосовують продувку рідкого металу аргоном, вакуумування, обробку сталі в ківші синтетичними шлаками а також модифікацію сталі кальцієм, алюмінієм і рідкоземельними металами [15-17].

**Метою** даної роботи є експериментальне дослідження впливу металургійних дефектів сталі безперервної розливки на спротив руйнуванню водопровідних труб.

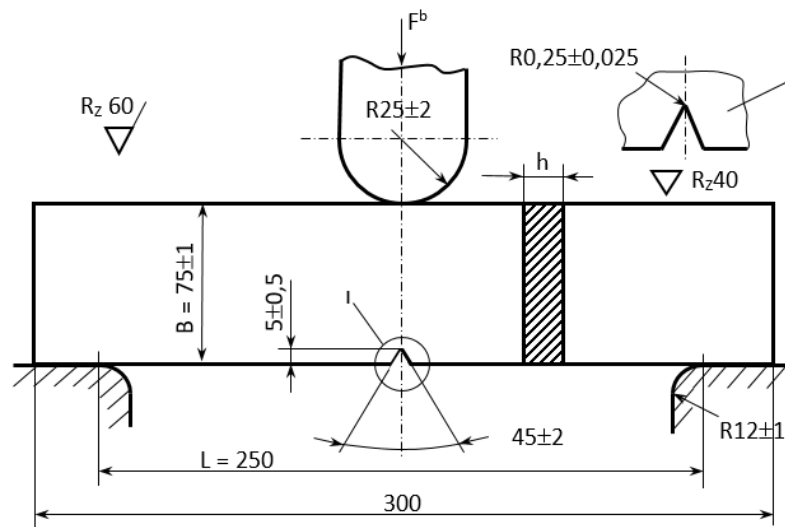
### **МЕТОДИКА ВИПРОБУВАННЯ ПОВНОВОТВОРИНИХ ЗРАЗКІВ**

Для проведення малоциклових втомних випробувань використовували низьколеговану економно модифіковану ніобієм сталь 08ХМЧА (ТУ-14-162-14-96), еквівалентну сталі класу X70 – AISI 1035) і сталь низьколеговану 06Х1 (ТУ-14-156-33-96), яка пройшла нормалізацію з нагрівом до температури 865°C і витримкою 30 хв. Сталь 08ХМЧА пройшла контрольовану прокатку з наступним прискореним охолодженням, що забезпечило наступні механічні властивості: межа текучості  $\sigma_T = 435$  МПа, границя міцності  $\sigma_B = 680$  МПа, відносне подовження  $\delta = 33$  %, відносне звуження  $\psi = 62$  %. Із сталей 08ХМЧА і 06Х1 виготовляли зразки, які показані на рис.1. Аналогічним чином готували зразки для механічних випробувань зварювальних з'єднань. Зварювальний процес здійснювали на спеціальному стенді із залученням електродів основного виду марки АНО-26. Технологія зварювання детально описана в монографіях [18, 19]. Модельне корозійно-активне середовище NACE [20] представляло собою насичений сірководневий розчин, який містив 5% NaCl і 0,5% оцтової кислоти. При цьому вміст  $H_2S$  складав 5,0 г/л. Температура середовища складала 22°C. Експериментальні дослідження проводили на уставці моделі 1251 фірми "Інстрон" (Великобританія).

Метод випробування на трьох точковий удар з використанням зразків DWTT наведено на рис.2.



**Рис. 1.** Зразок для випробувань на втомленість при осьовому навантаженні  
**Fig. 1.** Sample for fatigue testing under axial load



**Рис. 2.** Ескіз і схема випробування повно товщинного зразку типу DWTT на ударний згин. Товщина зразку складає  $h \approx 18-22$  мм  
**Fig. 2.** Sketch and diagram of the test of a full-thickness specimen of the DWTT type for impact bending. The thickness of the specimen is  $h \approx 18-22$  mm

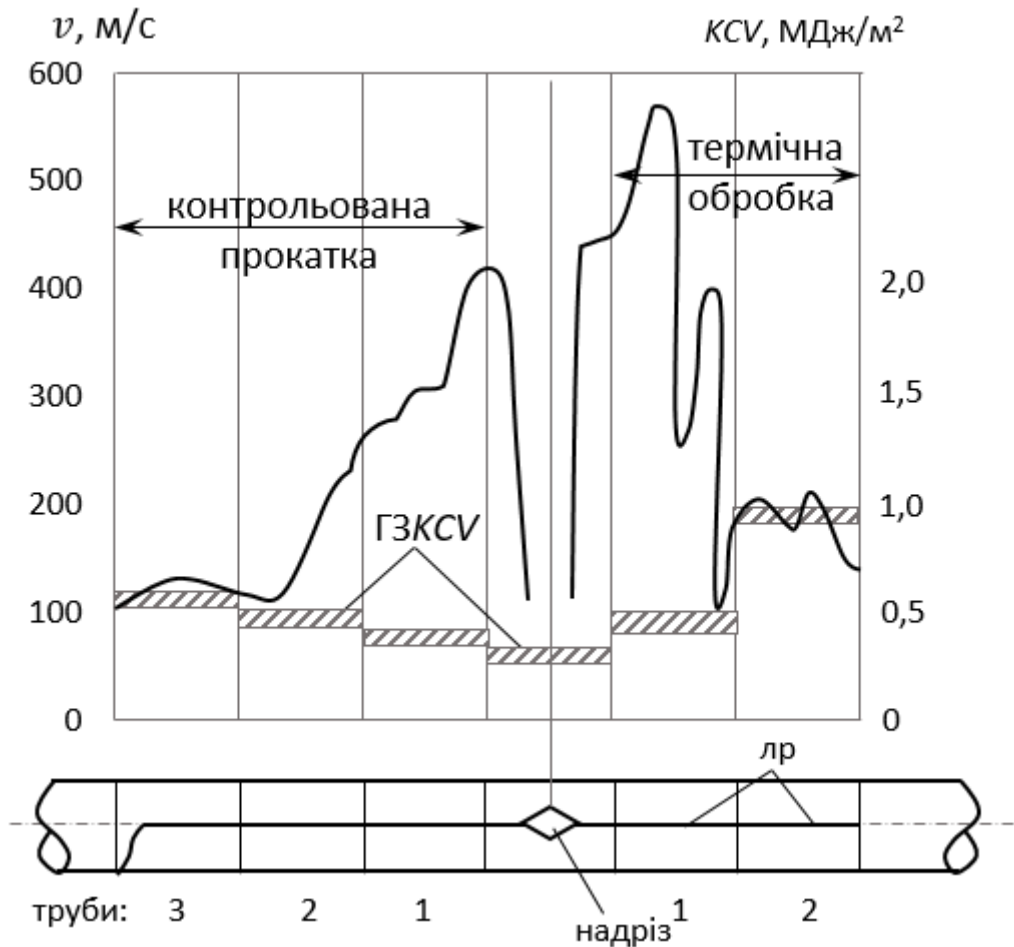
## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати експериментів приведені на рис. 3.

Встановлено, що з моменту ініціювання руйнування в центральній трубі швидкість магистральних тріщин (в обидва напрямки від ініціатора) зростає і на відстані 2-3 діаметрів від надрізу сягає максимуму. Зміна швидкості по довжині центральної труби може бути симетричною відносно надрізу (рис. 3). Загальною закономірністю

залишається наявність максимуму швидкості на стадії розгону тріщини. Важливо відзначити, що величина швидкості характеризує спротив металу труб розповсюдженню руйнувань в конкретних умовах випробувань.

Аналіз залежностей наведених на рис. 4 свідчить про більш високу в'язкість експериментальної економно модифікованої сталі 08ХМЧА, ніж сталі 06Х1. При чому така тенденція спостерігається при різних значеннях співвідношення  $\sigma_p/\sigma_{0,2}$  від 0,2 до 0,8.



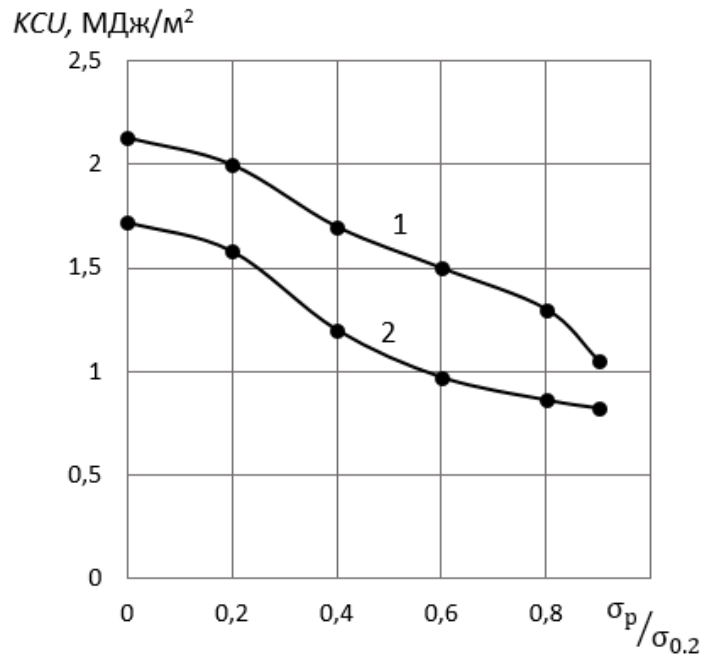
**Рис. 3.** Зміна швидкості розповсюдження руйнування при випробуванні відрізків труби 1020x16 мм із сталей X70 (сталь марки 08ХМЧА) контрольованої прокатки і X60 (марка сталі 06Х1) термообробленої; тиск руйнування  $P_p = 9$  МПа; ГЗКCV – границі зміни KCV; ЛР – лінія руйнування

**Fig. 3.** Change in fracture propagation rate during testing of 1020x16 mm pipe sections made of controlled-rolled steels X70 (steel grade 08KhMChA) and X60 (steel grade 06Kh1) heat-treated; fracture pressure  $P_w = 9$  MPa; GZKCV – limits of change of KCV; LR – fracture line

Дані рис. 5 показують що удосконалена сталь марки 08ХМЧА має значно більший спротив втомленій міцності ніж сталь 06Х1. Ця тенденція зберігається не лише при випробуванні зразків металу на повітрі, але й у корозійно-агресивному середовищі NACE, що дозволяє рекомендувати економно модифіковану церієм сталь 08ХМЧА для будівництва водопроводів в хімічно-агресивних середовищах, зокрема в засолених ґрунтах.

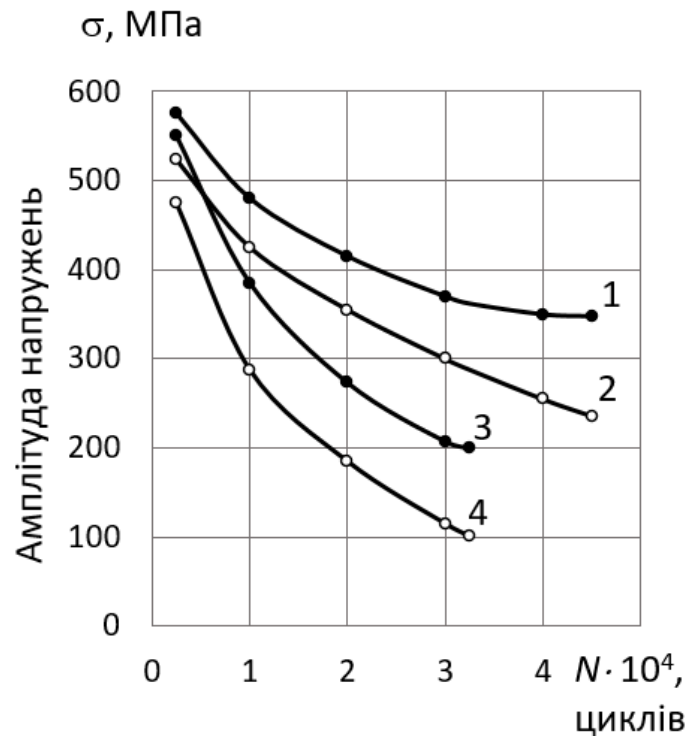
Викладені на рис. 6 результати

підтверджують суттєвий вплив швидкості охолодження виробів в процесі контрольованої прокатки на міцнісні і пластичні властивості при випробуванні зразків ТТ. Причому на вказані властивості впливає також температура нагріву слябу перед його прокаткою в листи, тобто металургійним шляхом можна регулювати температуру крихкості та в'язко-пластичні характеристики сталей економно модифікованих ніобієм і ванадієм.



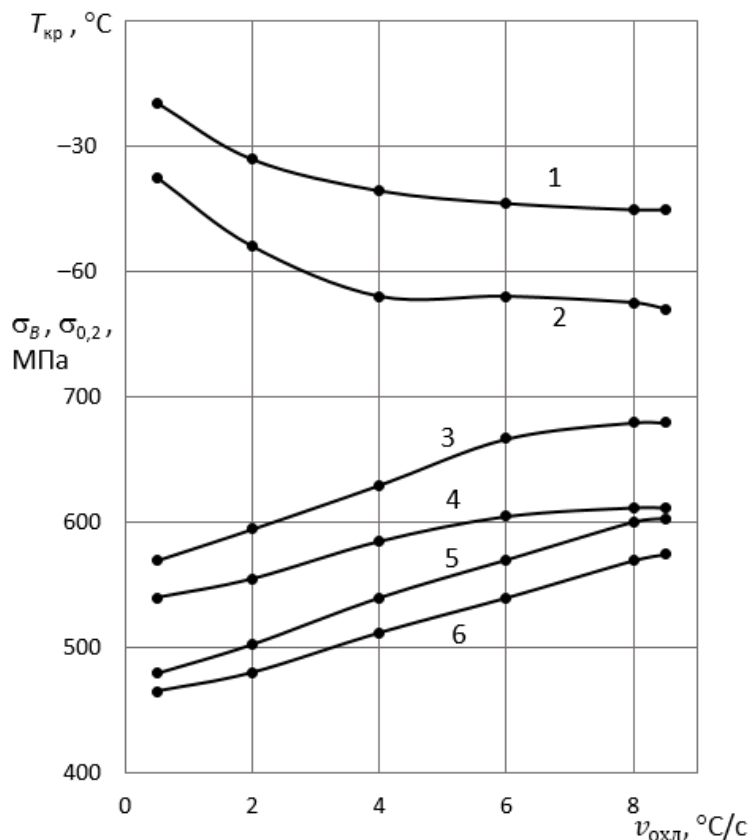
**Рис. 4.** Залежність ударної в'язкості по Менаже від рівня робочих напружень для сталей 08ХМЧА (1) і 06Х1 (2)

**Fig. 4.** Dependence of Menage impact strength on the level of working stresses for steels 08KhMChA (1) and 06Kh1 (2)



**Рис. 5.** Криві мало циклової втомленості сталей 08ХМЧА (●) і 06Х1 (○) при випробуванні на повітрі (1,2) і в агресивному середовищі NACE (3,4)

**Fig. 5.** Low-cycle fatigue curves of steels 08KhMChA (●) and 06Kh1 (○) when tested in air (1,2) and in an aggressive NACE environment (3,4)



**Рис. 6.** Вплив швидкості охолодження при контрольованій прокатці на міцнісні властивості і температуру крихкості  $T_{кр}$ , відповідній 50% волокна в зломі зразка DWTT феритно-перлітної сталі (0,03%Nb; 0,04%V) з температурою нагріву слябу 1250°C і 1050°C: 1,4,6 – 1250°C; 2,3,5 – 1050°C; 3,4 –  $\sigma_B$ ; 5,6 –  $\sigma_{0.2}$

**Fig. 6.** Effect of cooling rate during controlled rolling on strength properties and brittleness temperature of TCR corresponding to 50% fiber in fracture of DWTT sample of ferritic-pearlite steel (0.03%Nb; 0.04%V) with slab heating temperature of 1250°C and 1050°C: 1,4,6 – 1250°C; 2,3,5 – 1050°C; 3,4 –  $\sigma_B$ ; 5,6 –  $\sigma_{0.2}$

## ВИСНОВКИ

1. Уперше проведено експериментальні дослідження удосконаленої економно модифікованої сталі 08ХМЧА і низьколегованої сталі 06Х1 з визначення в'язкості та спротиву втомленої міцності (мало циклові випробування) на зразках DWTT.

2. Встановлено динаміку поширення магистральних тріщин. Показано, що зміна швидкості по довжині центральної труби може бути симетричною відносно надрізу, за наявності максимуму на стадії розгону тріщини.

3. Встановлені закономірності зміни параметрів в'язкості та спротиву втомленої

міцності в залежності складу дослідних сталей. Показано, що економно модифікована сталь 08ХМЧА має кращі показники ніж сталь 06Х1.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Білик С. І. і ін.** Корозійні руйнування каналізаційних систем України : монографія. Київ: НУБіП України, 2021. 272 с.
2. **Макаренко В., Чепелюк О., Войтович, О., Мешков Ю., Макаренко Ю., Максимов С., Гоц В., Савенко В., Аргатенко Т.** Методи підвищення корозійної стійкості підземних трубопроводів водопостачання // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2023. 42,



С. 49–58. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.49-58>

3. **Насоніна Н. Г., Антоненко С. Є.** Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж // Сучасне промислове та цивільне будівництво. 2019. Том15. №1. С23-34.

4. **Макаренко В., Гоц В., Макаренко Ю., Аргатенко Т., Поліщук В.** Дослідження аварійних трубопроводів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2022 40, С.31–43. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.40.31-43>

5. **Андрейків О. Є., Никифорчин Г. М., Ткачов В. І.** Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневомісних середовищах // Фізико-механічний інститут / Під ред. В. В. Панасюка, НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. Львів: Простір-М, 2001. С. 248-286.

6. **Василенко І. І., Мелехов Р. К.** Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Наук, думка, 1977. 265 с.

7. **Дмитрах І. М., Панасюк В. В.** Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. Львів: Львівська обласна книжкова друкарня, 1999. 342 с.

8. **Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Харин В. С.** Модель роста трещин в деформированных металлах при воздействии водорода // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 1987. №2. С.3-17

9. **Швачко В. И.** Макромеханические аспекты обратимой водородной хрупкости // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2000. №4. С.36-40

10. **Макаренко В. Д., Крижанівський Є. І., Чернов В. Ю.** Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів // Нафтова і газова промисловість. 2002. №6. С.42-44

11. **Порівняльний** аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами / О. Чапля, О. Радкевич, О. П'ясецький, Я. Спектор // Машинознавство. 1999. №8. С52-56

12. **Основні** закономірності наводнювання та поверхневого пухиріння трубної сталі в сірководневих середовищах / О. Радкевич, Г. Чумало, І. Доминюк і ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2004. Спец. вип. № 4, т. 1. С. 446-449.

13. **Tyson W. R.** Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. 1980. Vol. 36, No. 8. Pp. 441-443.

14. **Мешков Ю. Я.** Физические основы разрушения стальных конструкций. Киев: Наукова думка, 1981. 265с

15. **Самойленко М. І.** Функціональна надійність трубопроводних транспортних систем //

Харків: ХНАМП. 2009. 184 с.

16. **Ford F. P.** Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science-1, Ed., R. N. Parkins, Applied Science Publishers, 2002.

17. **Василенко І. І., Шульте О. Ю., Радкевич О. І.** Вплив хімічного складу і технології виробництва сталей на їх чутливість до водневого тріщини утворення та сірководневого корозійного розтріскування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 1990. №4. С.8-22

18. **Макаренко В. Д.** Експериментальні випробування трубопроводів. Ніжин:НДУ ім. Миколи Гоголя, 2020. 543 с.

19. **Макаренко В. Д., Стогній О. В., Гоц В. І. і ін.** Полігонні випробування газопроводів. Монографія. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. 2023. 160 с.

20. **NACE Standard TM01-77(90).** Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H<sub>2</sub>S Environments. NACE. Houston. P.O. BOX 218340. 1990. 22 p.

#### REFERENCES

1. **Makarenko, V. D., Maksimov, S. Yu., Bilyk, S. I., and oth. (2021).** *Corrosion destruction of sewage systems of Ukraine: monograph.* Kyiv: NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian]

2. **Makarenko, V., Chepelyuk, O., Voytovych, O. ., Mieshkov, Y. ., Makarenko, Y., Maksimov, S., Gots, V., Savenko, V., & Arhatenko, T. (2023).** Methods of increasing the corrosion resistance of underground water supply pipelines. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (42), 49–58. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.49-58>

3. **Nasonina, N. G., & Antonenko, S. Ye. (2019).** Analysis of damage to water supply and sewage networks. *Modern industrial and civil construction*. 15(1). 23-34. [in Ukrainian]

4. **Makarenko, V., Gots, V., Makarenko, Y., Arhatenko, T., & Polishchuk, V. (2022).** Research of accidents pipelines. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (40), 31–43. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.40.31-43>

5. **Andreykiv, O. E., Nikiforchyn, G. M., & Tkachev, B. I. (2001).** *Strength and fracture of metallic materials and structural elements in water-containing environments.* Institute of Physics and Mechanics, NAS of Ukraine, Institute of Physics and Mechanics named after G. V. Karpenko. Lviv: Prostir-M. [in Ukraine]

6. **Vasylenko, I. I., & Melekhov, R. K. (1977).** *Corrosion cracking of steels*. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
7. **Dmytrah, I. M., & Panasyuk, V. V. (1999).** *The influence of corrosive environments on local destruction of metals near stress concentrators*. Lviv: Lviv Regional Book Printing House. [in Ukrainian]
8. **Panasyuk, V. V., Andreikiv, A. E., & Kharin, V. S. (1987).** Model of crack growth in deformed metals under the influence of hydrogen. *Phys.-Chem. Mechanics of Materials*. 2. 3-17. [in Russian]
9. **Shvachko, V. I. (2000).** Macromechanical aspects of reversible hydrogen embrittlement. *Phys.-chem. mechanics of materials*. 4. 36-40. [in Russian]
10. **Makarenko, V. D., Kryzhanivskiy, E. I., & Chernov, V. Yu. (2002).** Problems of corrosion resistance of industrial pipelines. *Oil and gas industry*. 6. C.42-44. [in Ukrainian]
11. **Chaplya, O., Radkevych, O., Pyasetsky, O., & Spektor, J. (1999).** Comparative analysis of corrosion-mechanical properties of domestic pipe steel 20YuCh with foreign analogues. *Mashynoznavstvo*. 8. 52-56. [in Ukrainian]
12. **Radkevych O., Chumalo G., Domynyuk I. et al. (2004).** Basic regularities of hydrogenation and surface blistering of pipe steel in hydrogen sulfide environments. *Phys.-Chem. Mechanics of Materials*. 4(1). 446-449. [in Ukrainian]
13. **Tyson W. R. (1980).** Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions. *Corrosion*. 36(8). 441-443. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-36.8.441>
14. **Meshkov, Yu. (1981).** Physical foundations of destruction of steel structures. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
15. **Samoilenko, M. I. (2009).** Functional reliability of pipeline transport systems. Kharkiv: NUUEKh. [in Ukrainian]
16. **Ford, F. P., & Parkins, R. N. (2002).** *Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science*, Applied Science Publishers.
17. **Vasylenko, I. I., Schulte, O. Yu., & Radkevych, O. I. (1990).** The influence of the chemical composition and production technology of steels on their sensitivity to hydrogen cracking and hydrogen sulfide corrosion cracking. *Phys.-Chem. Mechanics of Materials*, 4. 8-22. [in Ukrainian]
18. **Makarenko, V. D. Experimental tests of pipelines.** Nizhyn: Mykola Gogol National University. [in Ukrainian]
19. **Makarenko, V. D., Stogniy, O. V., Gots, V. I., et al. (2023).** *Field tests of gas pipelines. Monograph*. Nizhyn: NDU named after M. Gogol. [in Ukrainian]
20. **NACE Standard TM01-77(90).** Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H<sub>2</sub>S Environments // NACE. Houston. P.O. BOX 218340.

### Experimental studies on the influence of metallurgical defects in water pipe steel on the resistance to crushing

Valery Makarenko, Volodymyr Gots, Volodymyr Pipa, Tetiana Arhatenko,  
Volodymyr Azutov, Iryna Nestrenko

**Abstract.** Low-alloy construction steels are characterized by insufficiently high and stable corrosion-mechanical properties, as well as resistance to fatigue fracture during long-term operation in aggressive environments. The results of experimental studies of the influence of metallurgical defects in continuously cast steel on the resistance to fracture of water pipes are presented. Low-alloy steels 08KhMChA and 06Kh1 were used. Studies of the change in the rate of fracture propagation, the dependence of the Menage impact toughness on the level of working stresses, and low-cycle fatigue during testing in air and in an aggressive NACE environment were conducted. The dynamics of the propagation of main cracks is established. The pattern of changes in the parameters of toughness and fatigue strength resistance depending on the composition of the experimental steels is shown.

**Keywords:** pipe, crack, toughness, fatigue strength.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2025