

## КІНЕТИКА ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ СЕКЦІЙ ТРУБ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ В ПРОЦЕСІ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

**Макаренко В. Д.**, д.т.н., професор Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: green555tree@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9178-9657;

**Максимов С. Ю.**, д.т.н., професор, заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: maksimov@paton.kiev.ua, ORCID: 0000-0002-5788-0753;

**Шатохіна І. О.**, старший викладач Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: shatirua8@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5767-3674;

**Лобов О. О.**, к.т.н., доцент Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: lobov.oleksandr@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0001-8486-3847;

**Сусорова О. А.**, старший викладач Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: helena.gaiko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6695-8196;

**Стогній О. В.**, докторант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.

*Стаття містить результати натурних випробувань в умовах спеціально обладнаного полігону відрізків газопровідних труб для магістральних газопроводів, що дали можливість отримати кінематичні та динамічні параметри руйнування модельного трубопроводу під робочим навантаженням в умовах, максимально наближених до експлуатаційних. Результати натурних випробувань (при напруженнях 600...615 МПа) дали можливість встановити, що з моменту ініційованого руйнування в центральній трубі швидкість магістральної тріщини (на дві сторони від ініціатора) збільшується і сягає максимального значення на відстані близько 2–3 діаметрів від надрізу. Зміна швидкості за довжиною центральної труби може бути симетричною відносно надрізу всередині труби, чи несиметричною, що пов'язано з наявністю зміщення ініціюючого надрізу відносно середини труби і відмінністю між властивостями металу труб у зоні локального зриву. Встановлено, що загальною закономірністю є наявність максимуму швидкості росту тріщини на стадії її розгону. Показано, що досягнуті під час проведення експерименту високі швидкості руйнування збереглися при вході вершини тріщини в досліджувані ділянки, а найбільша швидкість розповсюдження тріщин спостерігається в областях, наближених до контейнерів з охолоджувачем, де температура металу досягала - 60...- 70 °С (213...203 К).*

**Ключові слова:** газопровід; деформація; тріщина; пластична зона; міцність.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.167-173**

**Вступ.** Забезпечення міцності та довговічності трубопроводів є надзвичайно важливою задачею, оскільки трубопровідний транспорт є важливим чинником стабільності економіки будь-якої країни, яка транзитуює чи добуває рідкі енергоносії та сировину. З огляду на це, дослідження міцності з'єднань трубопроводів та підвищення їх тріщиностійкості є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомо [1–10], що пластичні деформації які неминуче виникають у зварювальних з'єднаннях і конструкціях, по своїй природі виникнення в процесі технологічного циклу виготовлення і експлуатації зварної конструкції можна розділити на наступні групи:

а) вихідні деформації в основному металі, які залежать від способу отримання і обробки металу, литтям, порошковою металургією, тиском (прокат, штампування, кування);

б) деформації, виникаючі при операціях заготовляння і збирання, різка, правка, згин, вальцівка, закріплення на збиральних пристосуваннях;

в) зварювальні деформації, що виникають внаслідок термдеформаційного циклу зварювання;

г) технологічні деформації;

д) експлуатаційні деформації, які можуть мати місце в процесі експлуатації в результаті місцевих перевантажень, втрати стійкості та ін.

**Постановка проблеми.** Дослідження впливу різних факторів (температури, навантажень матеріалу, швидкості деформування) на розповсюдження тріщин і в цілому на стійкість трубних сталей проводилися, як правило, на стандартних зразках і в умовах, які не повністю відповідали експлуатаційним умовам роботи трубопроводів, а тому терміново виникла необхідність у проведенні натурних випробувань відрізків труб.

**Мета дослідження.** Метою роботи є дослідження кінетики деформування металу зварних труб у процесі полігонних (натурних) випробувань, а також моделювання поведінки трубних сталей на стандартних зразках при циклічному навантаженні.

**Матеріали та методи.** В якості матеріалу слугували трубні сталі марок 17Г1С; 15ХСНД; D32. Натурні випробування зварних відрізків труб проводили на полігоні в спеціально обладнаній барокамері. Показники кінетики деформування труб реєстрували дистанційно із дотриманням вимог безпеки для персоналу. Аналіз, реєстрацію сигналів і їх обробку проводили за допомогою аналізатора емісійних процесів (АЕП), який додатково включав у свій склад контрольний осцилограф, дисплей на базі осцилографа СІ-30, фотореєстратор ФОР-2, алфавітно-цифровий дисплей “Відеотон – 340”, двохкоординатний графопобудовник “NE-230”.

Малоциклові дослідження проводили на установці моделі “1251” фірми “Інстрон” (Великобританія), а металографічні дослідження зломів зразків вирізаних з труб на мікроскопі фірми “Джеол” (Японія). Модельне середовище готували заздалегідь згідно вимог [11].

**Виклад основного матеріалу.** Вплив пластичної деформації на корозійне руйнування неоднозначний, оскільки в результаті пластичної деформації можуть виникати як сприятливі так і несприятливі зміни властивостей металу і напруженого стану. Роль середовища наглядно видно з результатів повторно-статичних випробувань при  $\sigma/\sigma_v = 0,8$  з частотою навантаження 10 цикл/хв зразків діаметром 10 мм, вирізаних з труби товщиною стінки 22 мм. У дослідженнях використовували дві марки сталей 15ХСНД і D32, які пройшли напередодні термообробку, зокрема загартування з відпуском на міцність 600 МПа (табл. 1).

У центрі зразку по діаметру вздовж прокатки наносили надріз довжиною 30 мм на глибину 1 мм з радіусом заокруглення у основі надрізу 0,1 мм. Результати повторно-статичних випробувань при двовісному напруженому стані наведені на рис. 1, які корелюють з результатами натурних випробувань газопровідних труб, які виконувалися безпосередньо в спеціально облаштованих барокамерах при тиску 10,9 МПа і які максимально наближені до реальних умов експлуатації газопроводів (рис. 1).

Найважливіші процеси при деформуванні які спричиняють зниження стійкості проти корозійних руйнувань в напруженому стані є:

- виникнення при деформації корозійно-активних шляхів внаслідок появи анодних фаз дефектів решітки мікро- і макронапружень поверхні і структури, які супроводжуються збільшенням концентрацій напружень II роду;
- виникненням власних напружень розтягування I роду при нерівномірній пластичній деформації.

На рис. 2 показано не однозначний вплив степені деформації розтягуванням на стійкість проти корозійного розтріскування при постійному одновісному навантаженні ( $\sigma=0,9\cdot\sigma_{0,2}$ ) найбільш широко використаних у промисловому будівництві сталей марки 17Г1С.

Аналіз даних, наведених на рис. 1 та рис. 2 показує суттєвий вплив на швидкість росту і розповсюдження тріщин структурного складу трубної сталі. Чітко видно в'язке руйнування в зонах пластичної структури – ферит + перліт з подальшим переходом в зону крихкого руйнування, якій притаманна крихка структура – карбідів заліза. Причому, стримуючим фактором швидкого розповсюдження тріщин слугують зварювальні (монтажні – кільцеві) шви, які в даному випадку виявляються м'якою складовою структури

труби. Найбільша швидкість розповсюдження тріщин спостерігається в областях, наближених до контейнерів з охолоджувачем, де температура металу досягала  $-60\dots-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $213\dots203\text{ K}$ ).

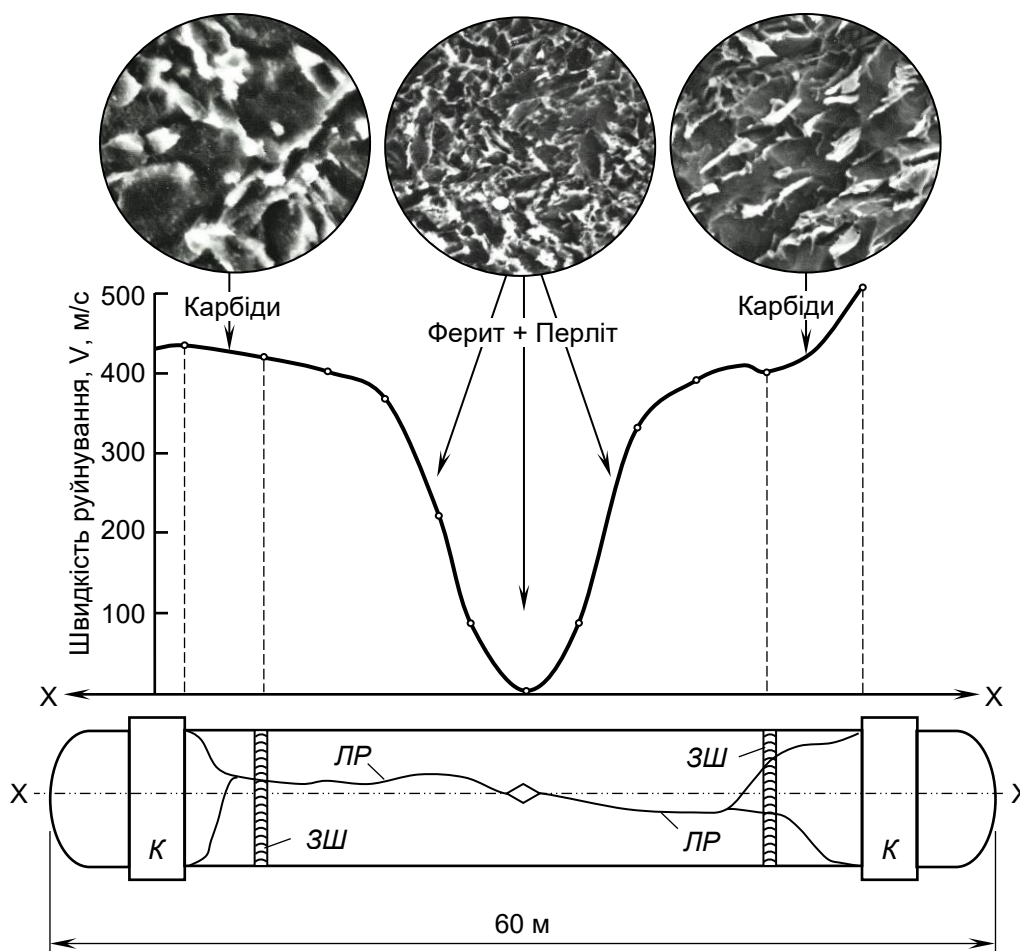


Рисунок 1 – Пневматичні випробування газопровідного трубопроводу: Сталь 17Г1С, діаметр 820x18мм, тиск 10,9 МПа. Позначення: Ф + П – структура ферит і перліт; ЛР – лінія розриву труби; К – контейнер охолодження; ЗШ – зварювальний шов

Таким чином, у залежності від природи металу і середовища деформаційно-силової схеми ступеню і умов деформування переважають ті чи інші процеси і мають місце збільшення, чи зменшення стійкості металу проти корозійного розтріскування при змінній двовісній схемі навантаження газопроводу. Це чітко підтверджується даними викладеними на рис. 3.

Виходячи з експериментальних натурних випробувань відрізків труб (рис. 1) можна підсумувати, що використання зварних з'єднань застосовується як додатковий спосіб покращення якості трубопроводів, тобто підвищення стійкості трубопроводу проти розповсюдження поздовжніх розгалуджених тріщин.

Таблиця 1 – Довговічність трубних матеріалів при двовісному мало цикловому навантаженні

Матеріали	Середовище, об'єкт досліджень	Рівень напружень МПа	Поява тріщин	
			Число циклів	Тривалість навантаження, хв
Сталь 15ХСНД	Основний метал Середовище – 3% NaCl	615	6250	1920
	Зварювальне з'єднання Середовище – 3% NaCl	605	32	25

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Сталь D32	Повітря	656	52 150	17 176
	Основний метал Середовище – NaCl	600	12 157	4061
	Зварне з'єднання – Середовище NaCl	585	16 480	5438,4

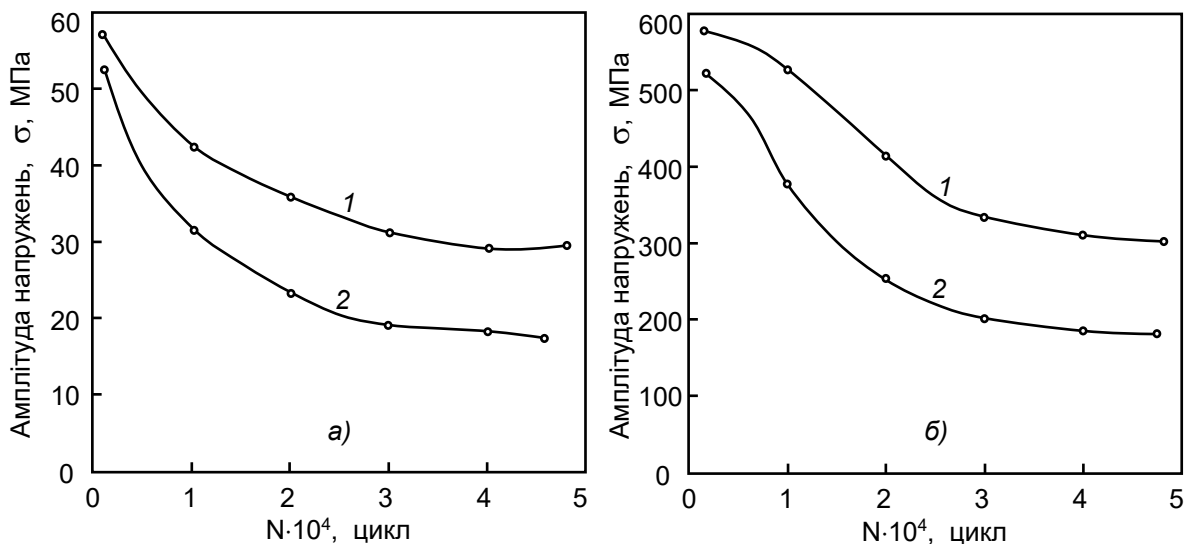


Рисунок 2 – Криві малоциклової втоми (міцності) в розчині NaCl сталі D32 (а) і 15ХСНД (б). Позначення терміну експлуатації (в роках): 1–10; 2–25

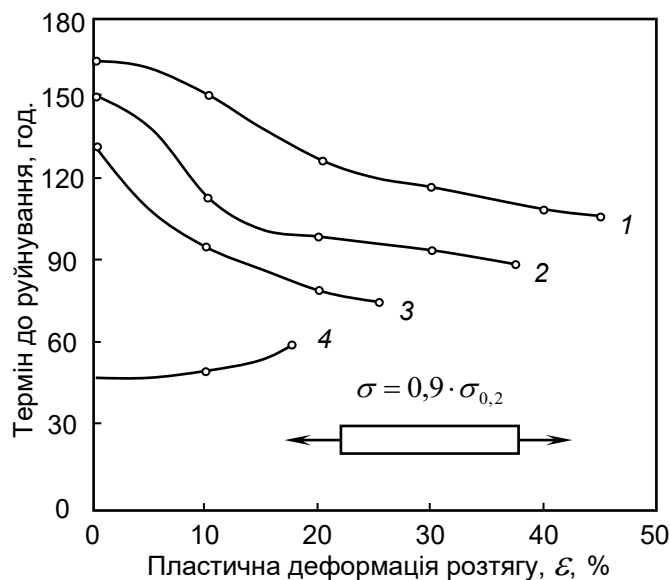


Рисунок 3 – Вплив пластичної деформації розтягуванням на корозійне розтріскування сталі 17Г1С з різними термінами експлуатації (в роках): 1–10; 2–20; 3–30; 4–40

Різну чутливість матеріалу до розтріскування при різному ступені деформації можна пояснити з точки зору впливу пластичної деформації, як джерела напружень II роду. Виникнення напруженості II роду в полікристалічних матеріалах обумовлено наступними причинами:

а) неоднорідністю пластичної деформації всередині зерен, так і між зернами внаслідок різного опору дії активних і реактивних навантажень, різноманітно орієнтованих зерен і кристалографічних площин;

б) структурними і фазовими перетвореннями, що спричиняють мікроструктурну і

хімічну неоднорідність і додаткові місцеві пружно-пластичні деформації кристалічної решітки.

Згідно сучасним дислокаційним теоріям, пластична деформація представляє собою процес зародження, переміщення, а також анігіляції дислокацій. Напружений стан дислокації залежить від характеру розташування дислокацій і відстані між ними. Неоднорідність розподілу дислокацій приводить до неоднорідності розподілу прихованої енергії деформації в деформованому об'єму металу.

Відповідно з теорією дислокацій крихкі тріщини в металі виникають у тих областях, де щільність затриманих дислокацій досягає критичної величини [12–15], тобто величина енергії пружної деформації решітки в об'ємі в результаті накопичення і взаємодії їх досягає граничної для даної решітки величини. Коли рухома тріщина проходить поблизу накопичень з критичною (чи близької до критичної) щільністю дислокацій її розповсюдження полегшується внаслідок того, що пружна енергія запасена в області, яка розташована у вершини рухомої тріщини, переходить безпосередньо в роботу руйнування.

Отже, в'язко-крихке руйнування виникає в результаті утворення як крихких тріщин внаслідок накопичення критичної щільності дислокацій, так і в'язких тріщин у результаті виходу на поверхню дислокацій.

### Висновки

1. Проведені натурні випробування на спеціально обладнаному полігоні відрізків труб, призначених для будівництва магістральних газопроводів, дозволили отримати кінематичні та динамічні параметри руйнування модельного газопроводу під робочим навантаженням і в умовах, максимально наближених до експлуатаційних.

2. Аналіз результатів полігонних (натурних) випробувань при напруженнях 600...615 МПа свідчить, що з моменту ініційованого руйнування в центральній трубі швидкість магістральної тріщини (на дві сторони від ініціатора) зростає і на відстані приблизно 2–3 діаметри від надрізу досягає максимуму ( $\approx 440$  м/с). Встановлено, що зміна швидкості по довжині центральної труби може бути симетричною відносно надрізу виконаному в середній трубі чи несиметричною. Це пов'язано з технікою проведення експерименту і умовами старту тріщини, зокрема зі зміщенням ініціюючого надрізу відносно середини труби і різними властивостями металу труб у зоні локального зриву. Загальною закономірністю залишається наявність максимуму швидкості на стадії розгону тріщини. Встановлено, що найбільша швидкість розповсюдження тріщин мала місце в областях, наближених до контейнерів з охолоджувачем, де температура металу досягала – 60...– 70 °С (213...203 К).

3. Вперше, з використанням натурних (полігонних) випробувань, досліджено вплив структурно-фазового складу трубних сталей на спротив труб корозійно-механічному розтріскуванню. При цьому показано, що найбільший спротив корозійному розтріскуванню чинить ферито-перлітна структура, у той час як карбідні фази спричиняють окрихчення металу з різким ростом швидкості розповсюдженню тріщин уздовж трубопроводу.

**Перспективи подальших досліджень** охоплюють вивчення впливу температури та сейсмочинників на тріщиностійкість матеріалів трубопроводів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тревого І. С., Ільків Є. Ю., Кухтар Д. В. Геодезичний контроль деформацій споруд магістральних газопроводів: монографія. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 181 с.
2. Лучко Й.Й. Методики розрахунку та дослідження матеріалів газопроводу на міцність, втомну тріщиностійкість. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. Дніпро: ДНУЗТ, 2018. Вип. 13. С. 54–66.
3. Федорович І. Я. Оцінювання небезпеки руйнування магістральних газопроводів з виявленими поверхневими тріщиноподібними дефектами: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища": Дата захисту 03.07.18 / І. Я. Федорович. – Івано-Франківськ, 2018. – 193 с.

4. Лучко Й.Й., Кичма А.О. Напружено-деформований стан та моніторинг проблемних ділянок трубопроводів тривалої експлуатації: монографія. Львів : Світ, 2019. 265 с.
5. Насонкіна Н. Г., Антоненко С. Є. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*, 2019. Том 15. №1. С. 23–34.
6. Maksimov S. Yu., Makarenko V. D., Tkachenko S. M., Panchenko O. S. Influence of Temperature and Long-Term Operation on Metal Durability of Pipelines of Hydrotechnical Structures. *Key Engineering Materials*, 2023, P. 25–33.
7. Makarenko V. D., Maksimov S. Yu., Makarenko Y. V., Panchenko O. S. Study of Durable Strength of Steel Mining and Metallurgical Equipment. *Solid State Phenomena*, 2022. P. 111–121.
8. Макаренко В. Д., Чепелюк О. В., Войтович О. А., Мешков Ю. Є., Макаренко Ю. В., Максимов С. Ю., Гоц В. І., Савенко В. С., Аргатенко Т. І. Методи підвищення корозійної стійкості підземних трубопроводів водопостачання. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К. : КНУБА, 2023. Вип. 42. С. 49–57.
9. Бойко А. В., Кулик В. П., Макаренко В. Д., Сизоненко А. В. Дослідження трубних сталей охолоджуючих систем тривалої експлуатації в умовах промислових виробництв. *Проблеми тертя та зношування*, Хмельницький : ХНУ, 2019. № 2 (83). С. 65–74.
10. Макаренко В. Д., Гоц В. І., Макаренко Ю. В., Аргатенко Т. І., Поліщук В. І. Дослідження аварійних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Київ: КНУБА, 2022. № 40. С. 31–43.
11. ASTM E399-78. Method for determining crack resistance parameters (for compact samples and samples with a central notch). *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005. P. 107–116.
12. Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами. *Машинознавство*, 1999. №8. С. 52–56.
13. Чирков О.Ю. Радіаційна повзучість у задачах механіки непружного деформування матеріалів та елементів конструкцій. К.: Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, 2020. 160 с.
14. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. К.: Наукова думка, 2018. 430 с.
15. Kawakubo T., Hishida M. Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis on Environmentally Accelerated Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005. Vol.107. P. 240–245.

## REFERENCES

1. Trevoho, I. S., Ilkiv, Ye. Yu., Kukhtar, D. V. (2019). Heodezychnyi kontrol deformatsii sporud mahistralnykh hazoprovodiv : monohrafiia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH.
2. Luchko, Y. I. (2018). Metodyky rozrakhunku ta doslidzhennia materialiv hazoprovodu na mitsnist, vtomnu trishchynostiikist. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. 13. 54–66.
3. Fedorovych, I. Ya. (2018). Otsiniuvannia nebezpeky ruinuvannia mahistralnykh hazoprovodiv z vyjavlenymy poverkhnevymy trishchynopodibnymy defektamy: dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.15.13 "Truboprovodnyi transport, naftohazoskhovyshcha": Data zakhystu 03.07.18. Ivano-Frankivsk. 193 p.
4. Luchko, Y. I., Kychma, A. O. (2019). Napruzhenno-deformovanyi stan ta monitorynh problemnykh dilianok truboprovodiv tryvaloi ekspluatatsii: monohrafiia. Lviv : Svit.
5. Ilnytskyi, Yu. V. (2012). Analiz vidmov ta avarii na mahistralnykh hazoprovodakh UMN "Lvivtranzhaz" i zakhody dlia zapobihannia yikh vynykenniu. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*, № 2. 210–214.
6. Nasonkina, N. G., & Antonenko, S. E. (2019). Damage analysis of water and sewer networks. *Modern industrial and civil construction*, 15(1). 23–34.

7. Maksimov, S. Yu., Makarenko, V. D., Tkachenko, S. M., Panchenko, O. S. (2023). Influence of Temperature and Long-Term Operation on Metal Durability of Pipelines of Hydrotechnical Structures. *Key Engineering Materials*, P. 25–33.
8. Makarenko, V. D., Maksimov, S. Yu., Makarenko, Y. V., Panchenko, O. S. (2022). Study of Durable Strength of Steel Mining and Metallurgical Equipment. *Solid State Phenomena*, P. 111–121.
9. Makarenko, V. D., Chepeliuk, O. V., Voitovych, O. A., Mieshkov, Yu. Ye., Makarenko, Yu. V., Maksymov, S. Yu., Hots, V. I., Savenko, V. S., Arhatenko, T. I. (2023). Metody pidvyshchennia koroziiinoi stiikosti pidzemnykh truboprovodiv vodopostachannia. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. K.: KNUBA/ Vyp. 42. 49–57.
9. Boiko, A. V., Kulyk, V. P., Makarenko, V. D., Syzonenko, A. V. (2019). Doslidzhennia trubnykh stali okholodzhuiuchykh system tryvaloї ekspluatatsii v umovakh promyslovykh vyrobnytstv. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, Khmelnytskyi: KhNU. 2019. № 2 (83). 65–74.
10. Makarenko, V. D., Hots, V. I., Makarenko, Yu. V., Arhatenko, T. I., Polishchuk, V. I. (2022). Doslidzhennia avariinykh truboprovodiv. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. Kyiv: KNUBA, № 40. 31–43.
11. ASTM E399-78. (2005) Method for determining crack resistance parameters (for compact samples and samples with a central notch). *Journal of Engineering Materials and Technology*. – P. 107–116.
12. Chaplia, O., Radkevych, O., Piasetskyi, O., Spektor, Ya. (1999). Porivnialnyi analiz koroziiino-mekhanichnykh vlastyvostei vitchyznianoї trubnoi stali 20IuCh z inozemnymy analohamy. *Mashynoznavstvo*, 1999. № 8. 52–56.
13. Chyrkov, O. Iu. (2020). Radiatsiina povzuchist u zadachakh mekhaniky nepruzhnoho deformuvannia materialiv ta elementiv konstruksii. Kyiv: Instytut problem mitsnosti imeni H. S. Pysarenka NAN Ukrainy.
14. Pisarenko, G. S., Stryzhalo, V. A. (2018). Experimental methods in the mechanics of a deformable solid. Kyiv: Naukova Dumka.
15. Kawakubo, T., Hishida, M. (2005). Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis on Environmentally Accelerated Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107. P. 240–245.

**Makarenko V. D., Maksymov S. Yu., Shatokhina I. O., Lobov O. O., Susorova O. A., Stognii O. V.**  
KINETICS OF METAL DEFORMATION OF WELDED PIPE SECTIONS UNDER CYCLIC LOADING IN THE PROCESS OF FIELD TESTS

*Full-scale tests were carried out at a specially equipped test site for pipe sections intended for the construction of main gas pipelines, which made it possible to obtain kinematic and dynamic parameters of the destruction of a model gas pipeline under operating load and in conditions as close as possible to operational ones. Analysis of the results of field (full-scale) tests indicates that from the moment of initiation of destruction in the central pipe, the speed of the main crack (on both sides of the initiator) increases and reaches a maximum at a distance of approximately 2-3 diameters from the notch. The change in speed along the length of the central pipe can be symmetrical relative to the cut made in the central pipe or asymmetrical. This is due to the experimental technique and the crack initiation conditions, in particular, the displacement of the initiating notch relative to the middle of the pipe and the different properties of the pipe metal in the local failure zone. The general pattern remains the presence of a maximum velocity at the stage of crack acceleration. It should be noted that in order to conduct the experiment, in order to achieve high fracture rates, the crack tips were preserved upon entering the studied areas. This condition is ensured by suitable selection of the viscosity of the metal of the central pipe.*

*First, using full-scale (polygon) tests, the influence of the structural phase composition of pipe steels on the resistance of pipes to corrosion-mechanical cracking was investigated. At the same time, it is shown that the ferrite-pearlite structure has the greatest resistance to corrosion cracking, while the carbide phases cause embrittlement of the metal with a sharp increase in the rate of crack propagation along the pipeline.*

**Key words:** pipe; deformation; crack; plastic zone; strength.

© Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Шатохіна І. О., Лобов О. О., Сусорова О. А., Стогній О. В.

Статтю прийнято  
до редакції 05.10.2023