

УДК 669.14:620.191.33

**КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ  
ТРУБ ГАЗОПРОВІДІВ З РІЗНОЮ В'ЯЗКІСТЮ****В.Д. Макаренко<sup>1</sup>,**  
д-р техн. наук, професор**О.А. Войтович<sup>1</sup>,**  
канд. техн. наук, професор**Ю.В. Макаренко<sup>2</sup>,**  
магістерка**В.І. Савенко<sup>3</sup>,**  
д-р техн. наук, професор**Ю.Л. Винников<sup>4</sup>,**  
д-р техн. наук, професор<sup>1</sup>*Херсонський національний технічний університет, Україна*<sup>2</sup>*Медичний університет провінції Манітоба, м. Вінніпег, Канада*<sup>3</sup>*Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна*<sup>4</sup>*Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Україна*

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.276-283

Проведені натурні випробування газопровідних труб з різною в'язкістю в умовах полігону які максимально наближені до натуральних умов експлуатації газопроводів. Експериментально досліджена кінетика розповсюдження тріщин уздовж зварних з'єднань - їх траєкторія, перехід із зварювального шва в основний метал труби і на оборот, швидкість руху тріщин у в'язкому і крихкому метали та визначені зони пластичної деформації. Відомо, що випробування на зразках Менаже, Шарпі та інших, які мають товщини, не відповідаючи товщині стінок труб, не відображають реальну картину в'язко-пластичних і крихких руйнувань, що не дозволяє розробити методикку чи модель прогнозування остаточного ресурсу (безаварійного) газопроводів тривалого терміну експлуатації. В той же час теоретичні і лабораторні дослідження не завжди з достатньою повнотою відповідають на питання, пов'язані безпосередньо із забезпеченням довговічності і безаварійної працездатності трубопроводів. Вірогідно, що в лабораторних умовах підприємств чи наукових закладів важко відтворити і урахувати всі фактори, які характеризують зростання і розповсюдження руйнування в реально діючому газопроводі. Тому дані лабораторних досліджень потрібно перевіряти і обов'язково уточнювати по результатах пневматичних випробувань довгомірних трубних секцій, тобто в теперішній час гостро назріла необхідність поєднання лабораторних і натурних випробувань труб газопровідної мережі. Такі випробування не є масовими, але в результаті їх виконання отримують важливу інформацію стосовно поведінки і властивостей металу в умовах навантаження і експлуатації, найбільш наближених до експлуатаційних. В полігонних випробуваннях використовували труби діаметром 1000x18мм, які пройшли контрольовану прокатку (сталь класу Х70 – марки 06Г2БА) на робочий тиск  $P_p = 9.7$  МПа (в північному – низькотемпературному виконанні). Дослідження на розтягування, вивчення ударної в'язкості, міцності і пластичності металу шва проводили за стандартними методиками, викладеними в роботах [2-5]. В процесі проведення експериментів застосовували у великій кількості датчики температури тиску деформацій напруження швидкості розповсюдження тріщини та ін. Отримані результати щодо кінетики руйнування натуральних труб в полігонних умовах закладають підґрунтя для розробки математичної моделі інженерного прогнозу залишкового (безаварійного) ресурсу діючих на нафтогазових родовищах трубопроводів.

**Ключові слова:** труба, деформація, тріщина, пластична зона, полігон.

**Вступ.** Відомо [1-5, 7-12], що фактичні руйнування трубопроводів, осередок яких знаходився в поздовжньому заводському шві трубних секцій, спостерігали випадки розповсюдження руйнування по зварювальному з'єднанню труб. В той же час відомо, що при експериментальних дослідженнях розповсюдження руйнувань у якісно зварених швах прямо шовних труб із сталей контрольованої прокатки (СКП) і низьколегованих нормалізованих сталей не відбувалося [25-26]. Причому траєкторія руйнування відхилялася із металу заводського поздовжнього шва в зону термічного впливу, а також із зони термічного впливу в основний метал. Все це дозволяє вченим шляхом проведення

серії системних натуральних випробувань труб обґрунтовано підійти до питання щодо встановлення вимог до ударної в'язкості металу шва по моменту відхилення траєкторії руйнування від осі зварювального шва труб. Таку спробу було здійснено при комплексному дослідженні працездатності експериментальних труб, які були з'єднані в заводських умовах шляхом автоматичного зварювання на спеціальних стендах.

**Мета роботи** – експериментальні дослідження кінетики розповсюдження тріщин в процесі полігонних випробувань зварних з'єднань секцій газопровідних труб різної в'язкості.

**Методика і матеріали досліджень** В полігонних випробуваннях використовували труби діаметром 1000x18мм, які пройшли контрольовану прокатку (сталь класу Х70 – марки 06Г2БА) на робочий тиск  $P_p = 9.7$  МПа (в північному – низькотемпературному виконанні). В заводських умовах були зварені 8 труб (по 4 на кожний варіант - I варіант - сталь 06Г2БА; II варіант – сталь нормалізована 17Г1С). При цьому середнє значення ударної в'язкості =(по трьом зразкам) металу шва КСУ<sub>40</sub> (I) = 0.435 МДж/м<sup>2</sup> – перший варіант; КСУ<sub>40</sub> (II) = 0.365 МДж/м<sup>2</sup> – другий варіант.

Дослідження на розтягування, вивчення ударної в'язкості, міцності і пластичності металу шва проводили за стандартними методиками, викладеними в роботах [2-5]. В процесі проведення експериментів застосовували у великій кількості датчики температури тиску деформації напруження швидкості розповсюдження тріщини та ін. Сама методика оцінки кінетики руйнувань в натуральних (полігонних) умовах детально викладена в роботах [25, 26].

#### Результати досліджень і їх обговорення

**Випробування 1** (рис. 1). Труба (перший варіант) була зварена по першому варіанту з надрізом по лінії сплавлення, зруйнувалася при напруженні  $\sigma_p = 375$  МПа. Тріщина розповсюджувалася в'язко на відстані 0.45м, відхилилася на 25мм від лінії сплавлення і далі розповсюджувалася паралельно шву аж до розгалуження і зупинки кільцюванням. При цьому встановлено, що мінімальна швидкість розповсюдження в'язкої тріщини складала приблизно 120-130 м/с. Максимальне значення пластичного розкриття  $\delta_{пл} \approx 25$ мм при  $T_m = -5^\circ\text{C}$ . Температура переходу на ділянці в'язко-крихкого зламу при 50% волокна складала  $T = -60^\circ\text{C}$ . Характер руйнування труби при пневматичних випробуваннях показаний на рис. 1.

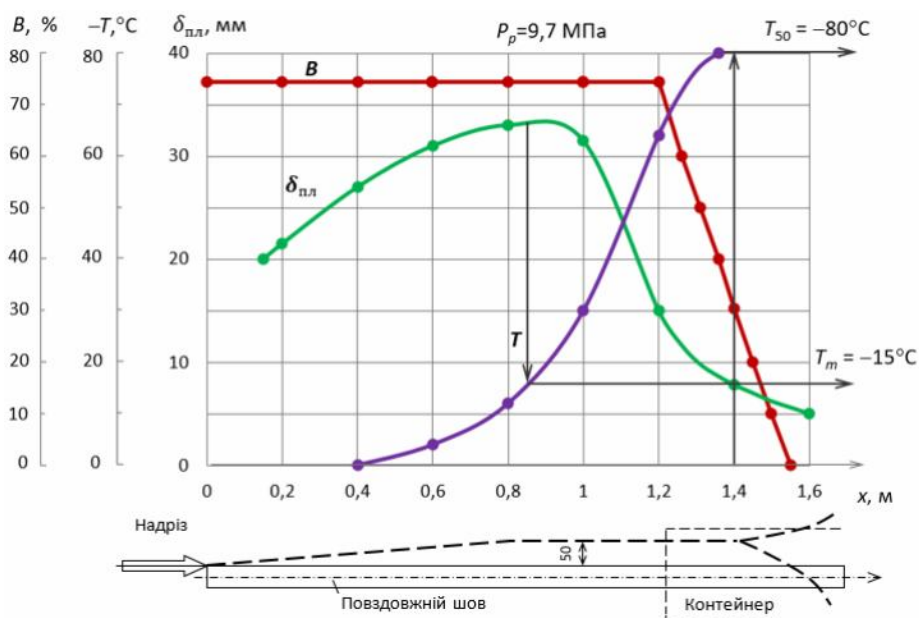


Рис. 1. Результати натуральних пневматичних випробувань зварювальних з'єднань в експериментальних трубах з ініціюючим надрізом по зоні сплавлення. Варіант зварювання – I. Діаметр труби – 2020x22мм

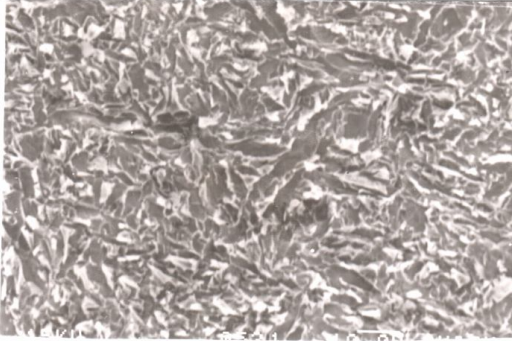


Рис. 2. Характер в'язкого руйнування по зоні термічного впливу зварювального з'єднання сталі 06Г2БА

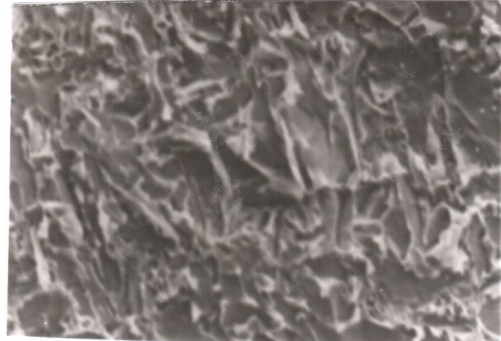


Рис. 3. Характер крихкого руйнування по зоні термічного впливу зварювального з'єднання сталі 06Г2Б в процесі натурних випробувань зварних секцій труб. На фрактограмі показана карбідна структура зони сплавлення (x2000)

**Випробування 2** (рис. 4 і 5). Труба (другий варіант) з надрізом по металу шва зруйнувалася при  $\sigma_p = 325$  МПа. Тріщина розповсюджувалася в'язко по зоні термічного впливу і на відстані  $x = 1.0$  м рівномірно відхилилась на 10 мм в зону термічного впливу. Потім в полі від'ємних температур тріщина розповсюджувалася крихко з відхиленням при  $x \approx 1.15$  м на величину 35 мм, а подальше розгалужувалася і закольцювалася.

Отримані при натуральних випробуваннях характеристики спротиву розповсюдженню руйнувань в трубах зведені в табл. 1. Там же наведені результати випробування труби з ініціюванням тріщини в основному металі. Необхідно відмітити, що призупинення руйнування розгалуженням тріщини в полі мінусових температур, яке спостерігали у всіх випробуваннях, виявляється закономірністю для даного методу полігонних випробувань.

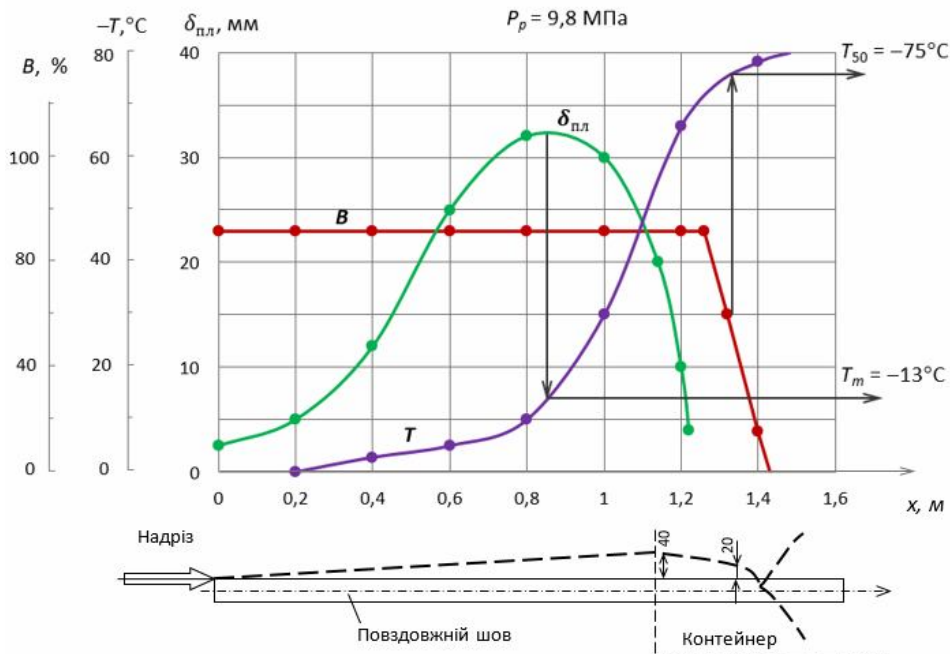


Рис. 4. Результати натурних пневматичних випробувань зварювальних з'єднань в експериментальних трубах з ініціюючим надрізом по зоні сплавлення. Варіант зварювання – II. Діаметр труби – 2020x22мм

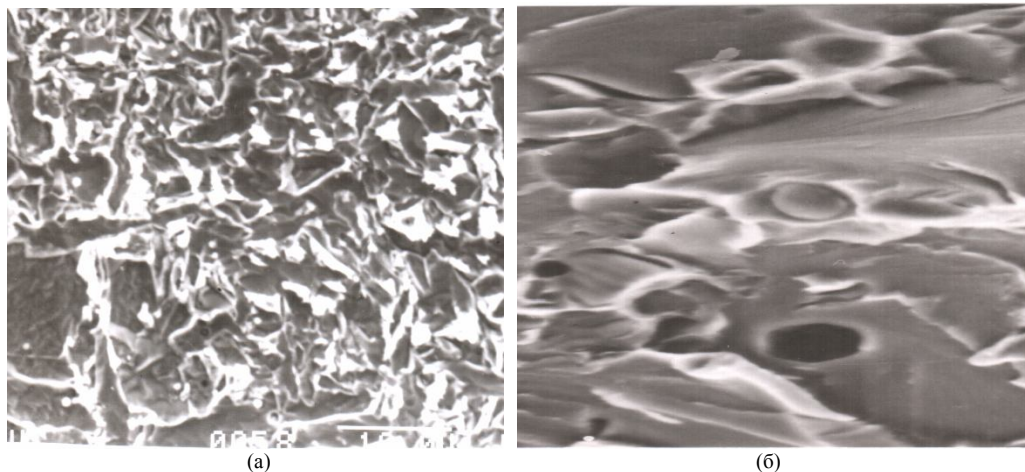


Рис. 5. Характер в'язкого (а) і крихкого (б) руйнування наплавленого металу по зоні термічного впливу зварювального з'єднання на сталі 17Г1С (x2200)

Таблиця 1  
Результати натурних пневматичних випробувань експериментальних труб діаметром 1000x18 мм із СКП (06Г2БА).

Середнє руйнівне напруження $\sigma_p$ , МПа	Об'єкт аналізу (варіант зварювання)	Характеристики спротиву розповсюдженню руйнування			
		Швидкість тріщини, м/с		Максимальне пластичне розкриття тріщини $\delta_{пл}$ мм	Температура максимального спротиву $T_m$ , °С
		в'язкої, $V_{min}$	крихкої, $V_{max}$		
394	зона термічного впливу (I)	135	-	20	-10...-15
345	те ж (II)	151	-	27	-7...-8
347	метал шва	-	265	10	-5
415	основний метал	195	-	30	-20

Результати виконаних досліджень свідчать про слабку кореляцію в області малих значень ударної в'язкості з характеристиками спротиву розповсюдженню руйнування зварних з'єднань в умовах натурних випробувань труб. Характеристики отримані в результаті випробувань повнотовщинних зразків DWTT більш близькі, ніж зразки Шарпі чи Менаже відповідають дійсним характеристикам працездатності зварювальних з'єднань в трубі. Зокрема встановлено, що значення  $A_3(-15^{\circ}\text{C}) = 0.75$  кДж і  $A_p(-15^{\circ}\text{C}) = 0.45$  кДж забезпечують задовільний спротив зародженню і розповсюдженню руйнувань в зварювальних з'єднаннях (на рівні основного металу). Такі характеристики відповідають  $KCV_{-60} = 0.52$  МДж/м<sup>2</sup>, що близько до вимог по ударній в'язкості для основного металу (0.55 МДж/м<sup>2</sup>). Тому можна вважати що для труб із СКП (06Г2БА) великої в'язкості рівень ударної в'язкості зварювальних з'єднань повинен приближатися до ударної в'язкості основного металу. Вимоги по ударній в'язкості і пластичності зварювальних з'єднань наряду з вимогами їх статичної рівномірності є визначальними з точки зору попередження руйнувань. Обов'язковим є також випробування труб на заводі під

гідрравлічним внутрішнім тиском, значення якого декілька вище випробуваного на трасі (в польових умовах будівництва)

Таким чином, із вище наведених прикладів достатньо щоб прийти до висновку, що рівень проектування зварювальних трубопроводів в багатьох випадках не відповідає ще сучасним вимогам, а якість їх виготовлення повинна бути суттєво підвищена. Важливу роль в покращенні цього положення зобов'язані відіграти спеціалісти-зварювальники.

Випробування окремих труб і трубних секцій виконаних на полігоні показали, що труби із сталі 06Г2БА (СКП) прийнятої конструкції володіють тривалою статичною міцністю не піддаються крихким руйнуванням в заданому інтервалі температур малочутливі до поверхневих дефектів заводського і монтажного походження і, як правило, мають малу довжину (до 2 – 1.5 оболонки) руйнувань. Подальша експлуатація таких труб в газопроводах при робочому тиску 8-9.4 МПа підтвердила, що при існуючих методах будівництва трубопроводів місцева стійкість стінок труб діаметром 820-1020 мм з товщиною стінок 18-22мм є вповні достатньою, а тим більше заводський контроль на герметичність відповідає вимогам нормативно-регламентної документації, прийнятих в НАК “Укрнафгаз”. В табл. 2 наведені механічні властивості сталі 06Г2Ба (СКП).

Таблиця 2

Механічні властивості сталі 06Г2БА

Характеристики сталі	Сталь 06Г2БА-СКП	Вимоги ТУ 15-1-22-87-99 (не нижче)
$\sigma$ , МПа	520	460
$\sigma$ , МПа	620	560
$\delta$ , %	24	22
KCV <sub>-15</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	125	90
KCV <sub>-15</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	110	60
Кількість волокна (%) в зломі ТТ при 15 <sup>0</sup> С	90	80

Таким чином, вище викладені експериментальні результати надають можливість зробити наступні **висновки**:

1. Проведені натурні випробування газопровідних труб з різною в'язкістю в умовах полігону які максимально наближені до натуральних умов експлуатації газопроводів.

2. Експериментально досліджена кінетика розповсюдження тріщин уздовж зварних з'єднань - їх траєкторія, перехід із зварювального шва в основний метал труби і на оборот, швидкість руху тріщин у в'язкому і крихкому металі та визначені зони пластичної деформації.

3. Отримані результати щодо кінетики руйнування натуральних труб в полігонних умовах закладають підґрунтя для розробки математичної моделі інженерного прогнозу залишкового (безаварійного) ресурсу діючих на нафтогазових родовищах трубопроводів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрейків О.С., 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.
2. Василенко І.І., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. – Киев: Наук, думка, 1977. - 265 с.
3. Дмитрах І.М., Панасюк В.В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. - Львів: Львівська обласна книжкова друкарня, 1999. - 342 с.
4. Крижанівський Є.І., Цирульник О.Т., Петрина Д.Ю. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1999. - № 5. - С. 67-70.
5. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі сірководневого середовища // Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000. -№3. -С. 93-97.
6. 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.

7. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carrbon Structural Steel, Fukui Univeersity, Япония: Теоретические основы инженерных расчетов (Труды Американского общества инженеров-механиков); изд-во Мир, 1985, №3, S.98-107.
8. Ткачов В.І. Проблеми водневої деградації металів// Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000.-№4.—С.7-14.
9. Борисова Н.С., Амосова Л.М. К вопросу об аномальном поведении водорода в сталях при низких температурах// Физ.-хим. механика материалов. –Львов. -1986.-№12.-С.10-13.
10. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Харин В.С. Модель роста трещин в деформированных металлах при воздействии водорода// Физ.-хим. механіка матеріалів.-1987.-№2.-С.3-17.
11. Швачко В.И.Макромеханические аспекты обратимой водородной хрупкости// Физ.-хим. механика материалов. -2000.- №4.-С.36-40.
12. Макаренко В.Д., Крижанівський С.І., Чернов В.Ю. Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів// Нафтова і газова промисловість. -2002.-№6.-С.42-44.
13. Самоїленко М.І., Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем// Харків: ХНАМП. – 2009.- 184 с.
14. Насоніна Н.Г., Антоненко С.С. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж// Сучасне промислове та цивільне будівництво. -2019.-Том15.-№1.- С. 23-34.
15. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Аргатенко Т.В. і ін. Дослідження аварійних трубопроводів// Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, вип. 42. -2023.- С. 49-58.
16. Бриду А., Лафранс М., Прову И. Разработка новых сортов стали с повышенными характеристиками для транспорта кислого газа и нефти// Нефтегаз-Франция –Юзичор Асье, 1986. -19 с.
17. Исследование отечественных и зарубежных низколегированных сероводородостойких сталей дл нефтегазопроводного оборудования/А.И. Радкевич, Р.К. Мелехов, Я.И. Спектор, Р.В. Яценко// Межотраслевая науч-конф. Конструкционные стали – прогрессивные процессы производства и эффективность применения. Днепропетровск, 1995. – С.58-59
18. 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.
19. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами/ О. Чапля, О.Радкевич, О.П'ясецький, Я.Спектор//Машинознавство. -1999.-№8.- С. 52-56.
20. 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.
21. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - P. 441-443.
22. Мешков Ю.Я Физические основы разрушения стальных конструкций Киев Наукова думка 1981 – 265с
23. Ford F.P.Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science-1, Ed., R.N.Parkins, Applied Science Publishers, 2002.
24. Кавакубо Т, Хісида М. Розрахунок прискореного навколишнім середовищем росту тріщини для неіржавіючої сталі у воді високої температури на основі механіки пружно-пластичного руйнування//Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, Vol.107, p.240-245.
25. Макаренко В.Д. Експериментальні випробування трубопроводів//Ніжин:НДУ ім.Миколи Гоголя, 2020.-543 с.
26. Макаренко В.Д., Стогній О.В., Гоц В.І. і ін. Полігонні випробування газопроводів. Монографія// Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. -2023. – 160 с.

## REFERENCES

1. Andreykiv O.E., Nikyforchyn H.M., Tkachev B.I. Mitsnist i ruinuvannya metalichnykh materialiv i elementiv konstrukttsii u vodnevomisnykh seredovyschakh (Strength and destruction of metallic materials and structural elements in hydrogen-containing environments) // Physical and Mechanical Institute: - Ed. V.V. Panasyuka, NAS of Ukraine, Institute of Physics and Mechanics named after G.V. Karpenka - Lviv: Prostr-M, 2001. - 248-286 p.
2. Vasylenko I.I., Melekhov R.K. Koroziiine roztriskuvannya stalei (Corrosion cracking of steels) - Kyiv: Nauk, dumka, 1977. - 265 p.
3. Dmytrykh I.M., Panasiuk V.V. Vplyv koroziiynykh seredovyschch na lokalne ruinuvannya metaliv bilia kontsentropativ napruzhen (The influence of corrosive environments on the local destruction of metals near stress concentrators) - Lviv: Lviv regional book printing house, 1999. - 342 p.
4. Kryzhanivskiy E.I., Tsirulnyk O.T., Petryna D.Yu. Vplyv navodniuвання ta poperednoho plastychnoho deformuvannya stali na yii trishchynostiikist (The influence of water treatment and preliminary plastic deformation of steel on its crack resistance) // Phys.-chem. mechanics of materials. - 1999. - No. 5. - 67-70 p.
5. Radkevich O.I., Pyasetskiy O.C., Vasylenko I.I. Koroziiino-mekhanichna tryvkist trubnoi stali v sirkovodnevomu seredovyschi (Corrosion-mechanical durability of pipe steel in a hydrogen sulfide environment)// Phys.-chem. mechanics of materials. -2000. - No. 3. - 93-97 p.
6. Standart NACE TM01-77(90). Standartnyi metod testuvannya. Laboratorne vyprobuvannya stiikosti metaliv do sulfidnoho roztriskuvannya v seredovyschi H2S (NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H2S Environments) // NACE. - Houston. P.O. BOX 218340. 1990.-22 p.
7. Okada T., Hattori S. Spivvidnoshennia mizh kontsentratsiieiu solonoї vody ta koroziiinoї vtomnoїu mitsnistiї 0,37% vuhletsevoi konstrukttsiinoї stali (Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on

- 0.37 Percent Carbon Structural Steel) Fukui University, Japan: Theoretical foundations of engineering calculations (Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers)// Myr publishing house, 1985, No. 3, 98-107p.
8. Tkachev V.I. Problemy vodnoyi dehradatsii metaliv (Problems of hydrogen degradation of metals)// Phys.-chem. mechanics of materials. -2000.-№4.—7-14 p.
  9. Borysova N.C., Amosova L.M. Do pytannia pro anomalnu povedinku vodniu v staliakh za nyzkykh temperatur (To the question of anomalous behavior of hydrogen in steels at low temperatures)// Phys.-chem. mechanics of materials. - Lviv. -1986.-№12.-10-13 p.
  10. Panasyuk V.V., Andreykiv A.E., Harin V.S. Model zrostantnia trishchyn u deformovanykh metalakh pry dii vodniu (A model of crack growth in deformed metals under the influence of hydrogen)// Phys.-chem. mechanics of materials.-1987.-№2.-3-17 p.
  11. Shvachko V.I. Mikromekhanichni aspekty oborotnoi vodnoyi krykhhkosti (Macromechanical aspects of reversible hydrogen embrittlement)// Phys.-chem. mechanics of materials. -2000.- No. 4.-36-40 p.
  12. Makarenko V.D., Kryzhanivskiy E.I., Chernov V.Yu. Problemy koroziiinoi stiiikosti promyslovykh truboprovodiv (Problems of corrosion resistance of industrial pipelines// Oil and gas industry). -2002.-№6.-42-44p
  13. Samoilenko M.I. Funktsionalna nadiinist truboprovodnykh transportnykh system (Functional reliability of pipeline transport systems)// Kharkiv: KhNAMP. – 2009.-184 p.
  14. Nasonina N.G., Antonenko S.E. Analiz poshkodzhennosti vodoprovodnykh i kanalizatsiinykh mrezezh (Damage analysis of water supply and sewage networks// Modern industrial and civil construction) -2019.-Vol.15.-No.1.- 23-34 p.
  15. Makarenko V.D., Gots V.I., Argatenko T.V. etc. Doslidzhennia avariinykh truboprovodiv// Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky (Research of emergency pipelines// Problems of water supply, drainage and hydraulics)//vol. 42. -2023.- 49-58 p.
  16. Brydu A., Lafrance M., Provu I. Rozrobka novykh sortiv stali z pidvyshchenymy kharakterystykamy dlia transportuvannia kysloho hazu ta nafty (Development of new grades of steel with increased characteristics for the transport of sour gas and oil)// Neftegaz-France – Yuzychor Asye, 1986. -19 p.
  17. A.I. Radkevich, R.K. Melekhov, Y.I. Spektor, R.V. Yatsenko Doslidzhennia vitchyznianskykh ta zarubizhnykh nyzkolehovanykh sirkovodoroldostiikykh stalei dlia naftohazoprovodnoho obladnannia (Research of domestic and foreign low-alloy hydrogen sulfide-resistant steels for oil and gas pipeline equipment) // Mezhotraslevaya nauch-conf. Structural steel - progressive production processes and efficiency of application. Dnipropetrovsk, 1995. - 58-59 p.
  18. Vasylenko I.I., Shulte O.Yu., Radkevich O.I. Vplyv khimichnoho skladu i tekhnologii vyrobnystva stalei na yikh chutlyvist do vodnevoho trishchyno utvorennia ta sirkovodnevoho koroziiinoho roztriskuvannia (The influence of the chemical composition and production technology of steels on their sensitivity to hydrogen cracking and hydrogen sulfide corrosion cracking)// Physic-chemical mechanics of materials. -1990.-№4.-8-22 p.
  19. O. Chaplya, O. Radkevich, O. Pyasetskyi, Ya. Cpektor Porivnialnyi analiz koroziiino-mekhanichnykh vlastyvoستي vitchyzniansoi trubnoi stali 20YuCh z inozemnymy analogamy (Comparative analysis of corrosion-mechanical properties of domestic pipe steel 20XX with foreign analogues) //Mashinoznavstvo. -1999.-№8.- 52-56p
  20. O. Radkevich, G. Chumalo, I. Dominyuk and others. Osnovni zakonirnosti navodniuvannia ta poverkhnovoho pukhyrinnia trubnoi stali v sirkovodnevnykh seredovyshchakh (Basic regularities of waterlogging and surface blistering of pipe steel in hydrogen sulfide environments) // Phys.-chem. mechanics of materials. - 2004. - Special. issue No. 4, vol. 1. - 446-449 p.
  21. Tyson W.R. Vodneve okrykhhennia ta vodnevi dyslokatsiini vzaiemodii (Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions )// Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. -441-443 p.
  22. YuYa Meshkov. Fizychni osnovy ruinvannia stalevykh konstruksii (Physical foundations of the destruction of steel structures)// Kyiv Scientific opinion 1981 – 265 p.
  23. Ford F.P. Korozine roztriskuvannia pid napruhoiu v rozvytku korozii (Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions) Science -I, Ed., R.N.Parkins, Applied Science Publishers, 2002.
  24. Kawakubo T, Hisida M. Rozrakhunok pryskorenogo navkolyshnim seredovyshchem rostu trishchyny dlia neirzhaviiuchoi stali u vodi vysokoi temperatury na osnovi mekhaniky pruzhno-plastychnoho ruinvannia (Calculation of environmentally accelerated crack growth for stainless steel in high-temperature water based on elastic-plastic fracture mechanics)//Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, Vol.107, 240-245p
  25. Makarenko V.D. Eksperymentalni vyprovuvannia truboprovodiv (Experimental tests of pipelines)//Nizhyn: Mykola Gogol State University, 2020.-543 p.
  26. Makarenko V.D., Stognii O.V., Gots V.I. etc. Polihonni vyprovuvannia hazoprovodiv (Polygon tests of gas pipelines) Monograph// Nizhin: NSU named after M. Gogol. -2023. - 160 p.

Стаття надійшла 19.08.2023

Makarenko V.D., Voityovych O.A., Makarenko Y.V., Savenko V.I., Vynnykov Yu.L.

#### COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF WELDING JOINTS OF GAS PIPELINES WITH DIFFERENT VISCOSITIES

Full-scale tests of gas pipelines with different viscosities were carried out in landfill conditions, which are as close as possible to the natural conditions of operation of gas pipelines. The kinetics of crack propagation along welded joints - their trajectory, the transition from the weld seam to the base metal of the pipe and vice versa, the speed of movement of cracks in viscous and brittle metal and defined zones of plastic deformation - were experimentally investigated. It is known that tests on Menaget, Charpy and other samples, which have thicknesses that do not correspond to the thickness of the pipe walls, do not reflect the real picture of visco-plastic and brittle fractures, which does not allow to develop a

methodology or model for predicting the final resource (non-accident) of long-term gas pipelines period of operation. At the same time, theoretical and laboratory researches do not always adequately answer the questions directly related to ensuring the durability and trouble-free operation of pipelines. It is likely that in the laboratory conditions of enterprises or scientific institutions it is difficult to reproduce and take into account all the factors that characterize the growth and spread of destruction in a real operating gas pipeline. Therefore, the data of laboratory studies must be checked and necessarily clarified according to the results of pneumatic tests of long pipe sections, i.e., at present, the need to combine laboratory and field tests of pipes of the gas pipeline network is urgently needed. Such tests are not massive, but as a result of their performance, important information is obtained regarding the behavior and properties of the metal in the conditions of loading and operation, which are closest to operational conditions. In field tests, pipes with a diameter of 1000x18 mm were used, which underwent controlled rolling (steel class X70 - grade 06G2BA) at a working pressure of  $RR = 9.7$  MPa (in the northern - low-temperature version). Tensile tests, studies of impact toughness, strength and plasticity of the weld metal were carried out according to standard methods described in works [2-5]. During the experiments, a large number of sensors of temperature, pressure, strain, stress, crack propagation speed, etc. were used. The obtained results regarding the kinetics of the destruction of natural pipes in landfill conditions lay the groundwork for the development of a mathematical model of the engineering forecast of the residual (non-accident) resource of pipelines operating in oil and gas fields.

**Key words:** pipe, deformation, crack, plastic zone, polygon.

УДК 669.14:620.191.33

Макаренко В.Д., Войтович О.А., Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Винников Ю.Л. **Комплексний аналіз працездатності зварювальних з'єднань труб газопроводів з різною в'язкістю** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 111. – С. 276-283.

Табл. 2. Іл. 50. Бібліогр. 26 назв.

UDC 669.14:620.191.33

*Makarenko V.D., Voitovych O.A., Makarenko Y.V., Savenko V.I., Vynnykov Yu.L. Comprehensive analysis of the performance of welding joints of gas pipelines with different viscosities* // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2023. – Issue 111. – P. 276-283.

Table 2. Fig. 5. Ref. 26.

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор Херсонський національний технічний університет Макаренко Валерій Дмитрович

**Тел.:** +38(066) 747-67-90

**E-mail:** green555tree@gmail.com

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** канд. техн. наук, професор, Войтович Ольга. Херсонський національний технічний університет, Україна.

**Тел.:** +38(066)-747-67-90

**E-mail:** olgavoytovich@ukr.net

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-0510-4362>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** магістерка університету Манітоби (м. Вінніпег, Канада) Макаренко Юлія Валеріївна

**Тел.:** +38(066) 747-67-90

**E-mail:** green555tree@gmail.com

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Савенко Володимир Іванович

**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

**Тел.:** +38(097)-970-66-59

**E-mail:** savenkoknuba@gmail.com

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" Україна, Винников Ю.Л.

**Тел.:** +38(099) 292-96-94

**E-mail:** savenkoknuba@gmail.com