

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Валерій Макаренко¹, Володимир Гоц², Володимир Піпа³, Володимир Савенко⁴,
Оксана Бердник⁵, Ірина Нестеренко⁶

¹ Херсонський національний технічний університет
24, Бериславське шосе, Херсон, 73008, Україна

²⁻⁶ Київський національний університет будівництва і архітектури
31, Повітрофлотський проспект, Київ, 03037, Україна

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

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

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

⁴ канд. техн. наук, savenko.vi@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1490-6730

⁵ канд. техн. наук, berdnyk.oyu@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-5321-3518

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

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.52-61

Анотація. Встановлено, що значення критичного напруження S_k для усіх дослідних сталей з ростом терміну експлуатації збільшується, а ударної в'язкості зменшується, що свідчить про структурне окрихчення трубних сталей, пов'язане з їх різким наводненням. Показано, що найбільш високими в'язко-пластичними властивостями і спротивом крихкому руйнуванню володіє нова сталь марки 20ФА, яка економно модифікована карбідотворюючим елементом (ванадій) і відрізняється дрібнозернистою структурою та має низький вміст шкідливих домішок (сірка, фосфор). Рентгеноструктурними методами оцінено мікронапруження кристалічної решітки α -Fe, а також кількісний розпад цементиту і перерозподіл вуглецю між феритом і перлітом. Нова сталь марки 10ФА рекомендується для використання у будівництві підземних каналізаційних систем та, наприклад, мостових конструкцій, які постійно знаходяться під циклічними навантаженнями при одночасному контакті з корозійно-агресивним середовищем. Вперше визначено вплив терміну експлуатації трубопроводів на вміст водню і мікровідкол в трубних сталях.

Ключові слова: трубні сталі, корозія, руйнування, несуча здатність, легування, в'язкість.

ВСТУП

Освоєння і експлуатація водоносних горизонтів України із складними інженерно-геологічними умовами обумовлюють особливі вимоги до якості труб, зварювально-монтажних і ізоляційних робіт при будівництві водоводів, які представляють собою складні технічні системи. Руйнування таких конструкцій, як правило, призводить до негативних економічних і екологічних наслідків, тож експлуатація трубопроводів пов'язана з небезпекою для обслуговуючого персоналу, населення та навколишнього середовища.

Аналіз літературних даних [1,3,4] і результатів власних багаторічних спостережень показує, що основні проблеми промислової безпеки і надійності трубопровідних конструкцій пов'язані з тривалим терміном їх експлуатації.

Відомо [1,3-8], що основними марками трубних сталей є 17Г1С, 17ГС, 19Г, 14ХГС, 14ГН, 10Г2С, 09Г2С, Ст3, Ст10, Ст20. Імпорtnі труби виготовляються із сталей марок Х50, Х52, Х60 та ін., які відносяться до низьковуглецевих і низьколегованих сталей ферито-перлітного класу. Кількість вуглецю

у них складає до 0,22%, а основними легуючими елементами є Mn, Si, Cr, V, Cu. В незначних кількостях присутні шкідливі домішки S, P, H та ін. також відомо, що ці сталі в основній масі достатньо глибоко досліджені, в той час як сталі трубного сортаменту, які широко використовуються для будівництва підземних трубопроводів з ціллю водовідведення, вивчені недостатньо, особ-

ливо з точки зору зміни їх структури і параметрів тріщиностійкості в процесі тривалого терміну експлуатації.

Основні причини руйнувань трубопроводів, тривалий час транспортуючих воду і водневу суміш наведені на рис. 1.

Тому питання несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення є досить актуальною на сьогоднішній день.

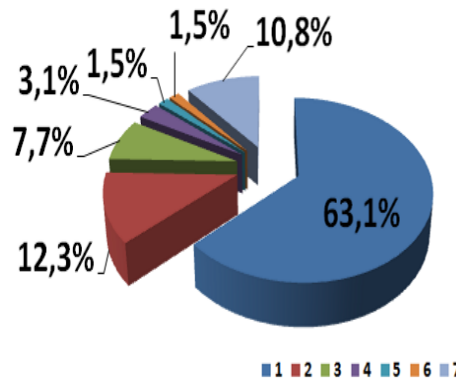


Рис. 1. Причини аварій трубопроводів водовідведення в період з 2000р. по 2022р.: 1 – крихке руйнування; 2 – корозійні ушкодження; 3 – зварювально-монтажні дефекти; 4 – корозійно-ерозійне зношення; 5 – просідання ґрунтової основи; 6 – заводські дефекти труб; 7 – експлуатаційні помилки

Fig. 1. Causes of accidents of drainage pipelines in the period from 2000 by 2022: 1 – fragile destruction; 2 – corrosion damage; 3 – welding and assembly defects; 4 – corrosion-erosion wear; 5 – subsidence of the ground base; 6 – factory defects of pipes; 7 – operational tricks

МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є лабораторно-експериментальні дослідження кінетики росту тріщин і її взаємозв'язок з параметрами тріщиностійкості і тривалою (циклічною) міцністю трубних сталей різних термінів експлуатації та структурно-фазовим складом сталей, які піддаються деформаційному старінню в процесі експлуатації.

Завданням роботи було:

- оцінка міцності труб на тріщиностійкість, за допомогою крихко-в'язкого руйнування;
- визначення акустичних властивостей в металах під дією навантаження тривалої експлуатації.

Об'єкт дослідження – фрагменти труб, вирізаних з аварійних водоводів різних термінів експлуатації.

Предмет дослідження – деградація структури трубних сталей.

Матеріали досліджень – трубні сталі.

Для лабораторних випробувань зразки матеріалу вирізали безпосередньо з експлуатованих труб в процесі аварійних зупинок чи то профілактичного ремонту трубопроводів. Зразки на механічне руйнування досліджували за допомогою універсальної машини «Інстрон» (Великобританія). Похибка експериментальних результатів, яка була визначена методом найменших квадратів, склала 2-5%. Формат зразку з відповідними розмірами для дослідження кінетики росту тріщин наведений на рис.2.

Відомо, що випробування на крихко-в'язке руйнування регламентуються стандартами: ASTM E399, ASTM E1820 [2,3,7].

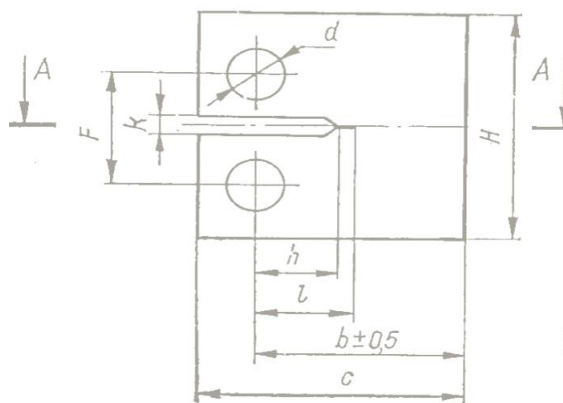


Рис. 2. Зразок для випробувань на тріщиностійкість (визначення параметрів K_{1C} і δ_C) та вивчення кінетики росту тріщин дослідних сталей: $C=70$ мм; $H=60$ мм; $b=C/1,25=70/1,25=56$ мм; $t \approx 0,5 \cdot b=28$ мм; $d=0,25 \cdot b=0,25 \cdot 56=14$ мм; $l=0,5 \cdot b=0,5 \cdot 56=28$ мм; $h=0,35 \cdot 56=19$ мм; $F=0,55 \cdot b=0,55 \cdot 56=30$ мм; $k=1/16 \cdot b=1/16 \cdot 56=3,5$ мм.

Fig 2. Sample for crack resistance tests (determination of K_{1C} and δ_C parameters) and study of crack growth kinetics of test steels: $C=70$ mm; $H=60$ mm; $b=C/1.25=0/1.25=56$ mm; $t \approx 0.5 \cdot b=28$ mm; $d=0.25 \cdot b=0.25 \cdot 56=14$ mm; $l=0.5 \cdot b=28$ mm; $h=0.35 \cdot 56=19$ mm; $F=0.55 \cdot b=0.55 \cdot 56=30$ mm; $k=1/16 \cdot b=1/16 \cdot 56=3.5$ mm

Елементарний аналіз розміру СТ зразка за відомою залежністю $2,5(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$ для дослідних сталей марок 20, 09Г2С і 06Г2БА за температури $+20^\circ\text{C}$ у експлуатованому стані на протязі 15-25 років в корозійно-агресивному середовищі показує, що мінімальна товщина СТ зразка для коректного визначення кінетики росту мікротрі-

щин визначалася з урахуванням впливу корозійного середовища, тобто значення параметра K_{1C} в корозійному середовищі і значення межі текучості таких металів. В розрахунках приймали $K_{tSSC} = 35$ МПа·м^{1/2}, а $\sigma_{0,2} = 410$ МПа, тоді товщина зразка повинна бути $t = 17,5$ мм (табл.1). Аналогічний розрахунок для сталей 09Г2С і 06Г2БА дозволив отримати наступні значення товщини зразка відповідно 12 мм і 18 мм.

Табл. 1. Результати розрахунку товщини зразків в залежності від критеріїв тріщиностійкості сталей з різним терміном експлуатації.

Table 1. The results of the calculation of the thickness of the samples depending on the criteria of crack resistance of steels with different service life

Сталі	Термін експлуатації, роки	Критерії тріщиностійкості			t , мм
		K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	K_{tSSC} , МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,2}$, МПа	$t > 2,5 \cdot (K_{tSSC}/\sigma_{0,2})^2$
Ст20	0	70	-	410	-
	25-30	56	35	400	17,5
20А	0	68	-	500	-
	25	60	35	495	12,3
06Х1	30	69	35-40	487	12,0
	0	75	-	510	-
06Г2БА	0	80	-	526	-
	25	72	45	505	18,0

Довготривалу і безпечну роботу трубопроводів в умовах окрихчення (старіння) і росту втомних тріщин в результаті повторно-статичних навантажень металу труб можна забезпечити шляхом контролю технічного стану трубопроводів неруйнівним АЕ-методом. Рішення такої задачі базується на результатах дослідження закономірностей нестабільного розвитку втомних тріщин в локальних окрихчених областях металу труб, тривало експлуатованих трубопроводів, іншими словами метод АЕ дозволяє дослідити закономірності нестабільного розвитку тріщин на стандартних зразках (рис.3), а також контролювати процеси розвитку втомних тріщин з невідомою K -гарировкою (коефіцієнт інтенсивності напружень) в місцях, недоступних для інших методів [1,2].

Акустичною емісією супроводжується практично усі процеси, які відбуваються в металі труб під навантаженням,; рух дислокацій, руй-

нування зерна шляхом зсуву, деформаційне старіння, утворення мікротріщин, корозійне розтріскування. Основним ефектом, який проявляється при дослідженні методом АЕ є ефект Кайзера, суть якого полягає у відсутності АЕ в матеріалі до тих пір, поки не перевищений рівень напружень попередньої дії [2]. Початкове навантаження, при якому в процесі повторного навантаження появляється акустична емісія називається коефіцієнтом накопичення.

Дослідженнями встановлено [1-6], що найбільш інформативними, але складними для визначення є параметри, які характеризують форму сигналу АЕ. Найбільше нової інформації про форму сигналів дає амплітудно-частотний спектр. Характеристики сигналів АЕ в значній мірі залежать від властивостей матеріалу, анізотропії, механічних характеристик, від ступені розшарування, неоднорідності, структури, тощо (рис.3).

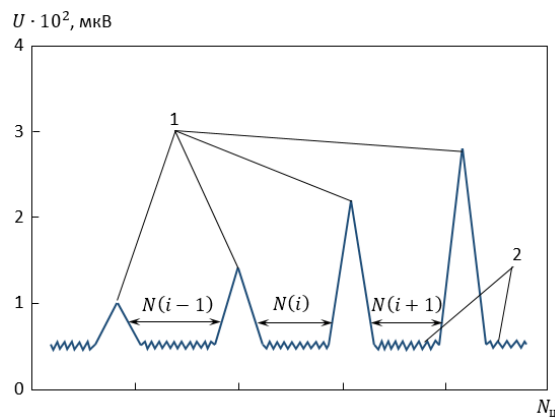


Рис. 3. Ділянка осцилограми отриманій пери циклічному навантаженні зразків: 1 – дискретна АЕ; 2 – непереривна АЕ

Fig 3. Section of the oscillogram obtained during cyclic loading of the samples: 1 – discrete AE; 2 – continuous AE

Апаратура для реєстрації і вимірювань параметрів АЕ. АЕ є методом неруйнівного контролю, при якому розвиток дефектів (тріщин) в металі супроводжується генерацією акустичних сигналів. Роль приймача сигналів грає електроакустичний перетворювач (ЕАП), виготовлений з п'єзокераміки. В наших експериментах використовували апарат АЕ типу “Ультраскан-VN”, в склад якого входили: самописець, осцилограф, магнітний реєстратор, цифро печатний пристрій. При циклічних випробуваннях матеріалів використовували синхронізатори, які дозволяли реєструвати сигнали АЕ в певній фазі навантажень.

Спосіб імітації сигналів АЕ крихких матеріалів. Для імітації сигналів АЕ деформованих

зістарених трубних сталей на зразок наносили механічним шляхом надріз. Втомні тріщини в зразках вирощували за допомогою гідро пульсатора моделі “ЦДМпу-10” (Німеччинва) при частоті навантаження 10-15Гц і коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0,1 \dots 0,2$.

В процесі розвитку втомної тріщини зразки трубних сталей піддавали циклічним навантаженням до появи тріщин. При цьому паралельно проводили реєстрацію сигналів неперервної АЕ і імпульсні дискретні сигнали АЕ, що дозволяло вирахувати момент початку нестабільного росту тріщини. По числу циклів навантажень між двома імпульсами визначали запас міцності металу. Так як в окрихчених областях швидкість росту тріщин різко зростає, то стрибко-образна

зміна швидкості росту тріщин відображається на характері утворення сигналів АЕ. Для виконання подібних операцій електроакустичні перетворювачі розміщали на поверхні зразків по різні сторони від вершини тріщини на лінії її ймовірного розповсюдження.

Враховуючи ефект Кайзера [2], нами визначалися сигнали, які приблизно на 20 дБ перевищували сигнали АЕ неперервної АЕ. Було виявлено, що число імпульсів нестабільних стрибків тріщин відповідає числу імпульсів дискретної АЕ. Знаючи відстань між числом стрибків циклів навантажень і шириною основи піку стрибків визначали швидкість, їх розповсюдження і ступінь окрихчення металу (див. рис.2). Амплітуду імпульсів АЕ реєстрували осцилографом НО-43 системи “Сигнал-4М”, або електропроміневим осцилографом РМ-3234 фірми “Філіпс” (Нідерланди). Отримані дані надали можливість визначити коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , при якому відбувається старт тріщини, що відповідає нерівності $t > 2.5 (K_Q/\sigma_{0.2})^2$, де t – товщина зразка (стілки труби). Ця формула відповідає крихкому механізму

руйнування, для пластичних матеріалів вона не придатна.

Середня швидкість крихкого стрибка тріщина (одиниця вимірювання в мікронах за мілісекунду) визначали по пройденому шляху (довжина стрибка тріщини) і часу, за який цей шлях пройдений (час від старту до зупинки тріщини). Оскільки в момент старту і раптової зупинки тріщини відбувається перетворення потенційної енергії в кінетичну і зворотно, то ці моменти супроводжуються хвилею пружної деформації в області вершини тріщини, тобто імпульсами дискретної АЕ.

При контролі за параметрами стрибка тріщини використана апаратура має для цього два ідентичні вимірювальні канали. Для цього перетворювачі сигналів АЕ розміщували по різні сторони від вершини тріщини (рис.4). На рис.4 одночасно показані геометричні характеристики: L – відстань між перетворювачами сигналів (ПС) АЕ (може бути менше навантаженого об’єкту); l – довжина тріщини (відстань між вершиною тріщини і першим перетворювачем сигналів АЕ); Δl – довжина стрибка тріщини.

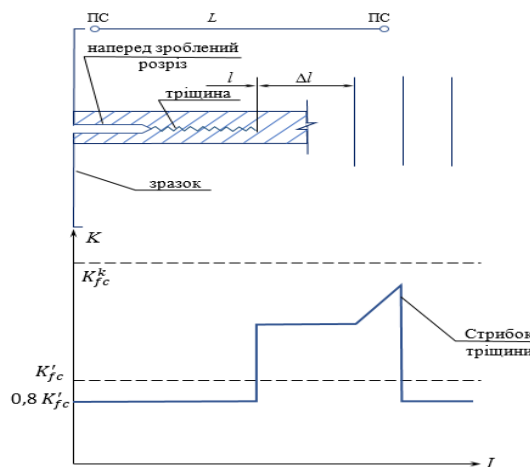


Рис. 4. Схематичне зображення режиму навантаження при дослідженні кінетики росту втомних тріщин

Fig. 4. Schematic representation of the load mode in the study of fatigue crack growth kinetics

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В табл. 2. приведені значення критичного напруження S_K і коефіцієнту спротиву R_{MB} мікровідколу для дослідних труб:

$$R_{MB} = S_K / K^\Psi,$$

де K^Ψ – функція відносного звуження в шийці зразку.

Методом апроксимації встановлено вид функції:

$$K^\Psi = 2,75^2 \Psi^2 + 2,2 \Psi + 1.$$

Дані, наведені в табл.2, стосовно сталей ВСтЗсп і Ст20 були взяті для порівняння з монографією [2].

Табл. 2. Значення параметрів тріщиностійкості трубних сталей тривалого терміну експлуатації
Table 2. The value of the crack resistance parameters of pipe steels with a long service life

Сталь	Термін експлуатації, роки	Механічні властивості		Вміст водню, ррп
		S_K , МПа	R_{MB} , даНм ²	[H], ppm
ВСтЗсп	0	679	60,5	15,5
	15	647	55,0	17,8
	25	725	52,4	32,4
	30	740	456,3	46,5
Ст20	5	724	55,0	16,2
	15	737	52,4	22,1
	25	749	45,1	36,5
06Г2БА	0	756	83,6	9,0
	5	755	72,3	12,6
	10	776	71,1	14,1
	15	779	70,0	20,2
	20	820	65,4	21,3

Як видно з табл.2 значення R_{MB} зі збільшенням терміну експлуатації знижується, а S_K – збільшується, що свідчить про те, що в процесі тривалої експлуатації магістральних трубопроводів відбувається окрихчення металу труб.

Одним з характерних показників спротиву крихкому руйнуванню є ударна в'язкість, яка згідно нормативно-регламентної документації сприймається в якості основного параметра несучої здатності трубопроводів тривалого терміну експлуатації. Ударну в'язкість прийнято розділяти на складові: K_{C3} – робота зародження тріщини; K_{Cp} – робота розповсюдження тріщини (здатність металу чинити опір розвитку тріщини).

Вважається, що великі значення K_{Cp} свідчать про малу чутливість металу до концентраторів напружень.

Із наведених даних видно, що для сталей ВСтЗсп і Ст20 ударна в'язкість при -40°C нижче $0,3 \text{ МДж/м}^2$, що не відповідає вимогам ДБН України. Вимогам Держстандарту щодо холодостійкості відповідає експериментальна сталь 06Г2БА (див. табл.1 і 2).

Результати експериментального дослідження взаємозв'язку між корозійно-втомною

(тривалою) міцністю і коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_{IC}) та швидкістю росту тріщин трубних сталей марок: 20ГС; 15ХСНД; 08ХМЧА; 16БАФ і сталь 20 наведені на рис. 5.

Таким чином, підводячи підсумки експериментальних результатів можна відмітити, що підвищена схильність до водневого уповільненого руйнування мабуть є наслідком: 1) пониженої стійкості трубної сталі, внаслідок утворення нестійких проти руйнування структур за рахунок утворення гідридів заліза та інших складових; 2) підвищеного рівня напружень, спричинених напруженнями і дефектами форми труб магістральних трубопроводів (внутрішні і зовнішні). Звертає на себе увагу той факт, що фізичні властивості, які характеризують несучу здатність трубної конструкції, в найбільшій ступені проявляються при використанні нових типів сталей (див. табл.2), в яких спостерігається швидкий ріст межі текучості в порівнянні з ростом тимчасового спротиву при одночасному підвищенні всього комплексу властивостей [8]. Тому в трубах на високоміцних і в'язких контрольованій прокатки при розрахунку по межі текучості значення робочих напружень в стінках труб можуть бути підвищені на 20%, що неминуче дозволить отримати значну економію металу.

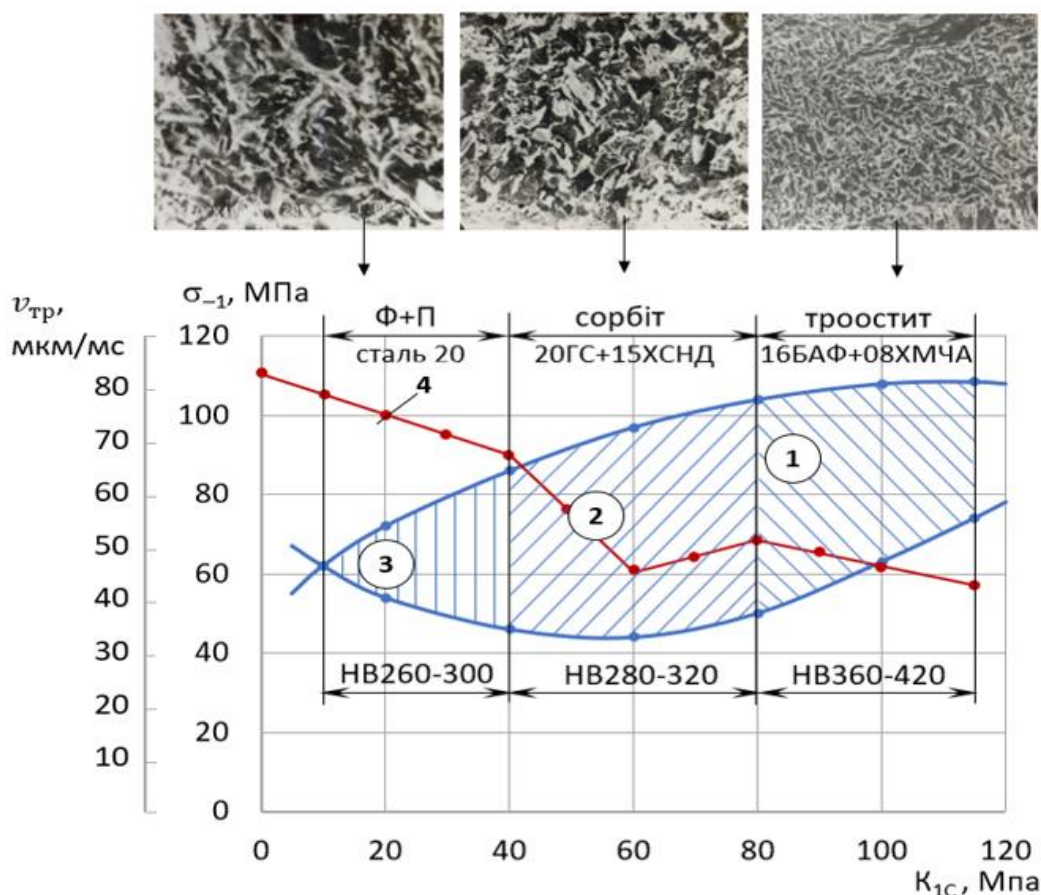


Рис. 5. Взаємозв'язок між корозійно-втомною міцністю і коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_{1c}) та кінетикою росту тріщин трубних сталей марок: 20ГС; 15ХСНД; 08ХМЧА; 16БАФ і сталі 20. Позначення: 1 – область високої тріщиностійкості; 2 – область середньої тріщиностійкості; 3 – область низької тріщиностійкості арматурних сталей різного фазово-структурного стану; 4 – графік кінетики росту тріщин різних трубних сталей; НВ – твердість по Брінелю

Fig. 5. The relationship between the corrosion-fatigue strength and the stress intensity factor (K_{1c}) and the crack growth kinetics of pipe steel grades: 20GS; 15 KhSND; 08 KhMChA; 16 BAF and steels 20. Designation: 1 – area of high crack resistance; 2 – area of medium crack resistance; 3 – region of low crack resistance of reinforcing steels of different phase and structural state; 4 – graph of crack growth kinetics of various pipe steels; HB - Brinell hardness

Представлений на рис.5 взаємозв'язок між тривалою міцністю, кінетикою росту тріщин і параметром тріщиностійкості K_{1c} в залежності від структурно-фазового стану металу дозволяє вибирати обґрунтовано області, які характеризуються різним ступенем тріщиностійкості, що може слугувати конструкторам і проєктантам трубчастих конструкцій при оптимальному виборі сталей в залежності від їх структурно-фазового складу.

Аналіз експериментальних даних, наведених в табл. 1-4, показує, що найбільш високими параметрами несучої здатності володіє удосконалена сталь 06Г2БА, яка економно модифікована мікродобавкою ніобієм, який, в свою чергу, є

дуже сильним карбідоутворюючим елементом. Крім того, нова сталь 06Г2БА в процесі виплавки пройшла прогресивну термообробку «ноу-хау» (2-3х разове загартування, після чого високу відпуску з подальшим охолодженням із застосуванням системи спрійер). Це спряло отриманню дрібнозернистої структури (11-12 бал зерна), а також отриманню дрібнодисперсних неметалевих включень глобулярної форми, що спрєє значному зниженню концентрації напружень в структурі. Причому нова сталь характеризується низьким вмістом газів (кисень, сірка, водень) і шкідливих елементів, зокрема фосфору ($\leq 0,008-0,011$).

Табл. 3. Кількість розпаду цементиту (Fe_3C , %) в металі труб
Table 3. The amount of decay of cementite (Fe_3C , %) in pipe metal

Сталь	Термін експлуатації, роки	Fe_3C , %	Сталь	Термін експлуатації, роки	Fe_3C , %
14ХГС	0	100	10ГС	0	100
	7	16-18		32	24-28
	12	20-22			
	24	23-25			
17ГС	0	100	06Г2БА	5	10-15
	16	15-20		10	16-20
	19	25-30		20	23-25
	29	35-40		25	26-28

Табл. 4. Значення мікронапружень кристалеві α -решітки і розподіл вуглецю в трубних сталях
Table 4. Value of microstresses of crystal α -lattice and distribution of carbon in pipe steels

Сталь	Термін експлуатації, роки	σ_s , Мпа	Кількість, %	
			В фериті	В перліті
ВСт3сп	0	12	0,02	0,30
	10	16	0,026	0,316
	20	12	0,033	0,283
	25	29	0,044	0,274
	30	27	0,074	0,273
Ст20	0	7	0,020	0,018
	5	8	0,029	0,179
	10	9	0,054	0,176
	25	11	0,079	0,175
	30	12	0,083	0,190
06Г2БА	0	6-7	0,020	0,20
	10	9-11	0,028	0,25
	20	12	0,032	0,29
	30	18-20	0,035	0,33

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що значення критичного напруження S_K для усіх дослідних сталей з ростом терміну експлуатації збільшується, що свідчить про структурне окрихчення трубних сталей, пов'язане з їх різким наводненням.

2. Показано, що найбільш високими в'язкопластичними властивостями і спротивом крихкому руйнуванню володіє нова сталь марки

06Г2БА, яка економно модифікована карбідоутворюючим елементом (ніобієм) і відрізняється дрібнозернистою структурою та має низький вміст шкідливих домішок (сірка, фосфор).

3. Рентгеноструктурними методами оцінено мікронапруження кристалічної решітки α -Fe, а також кількісний розпад цементиту і перерозподіл вуглецю між феритом і перлітом.

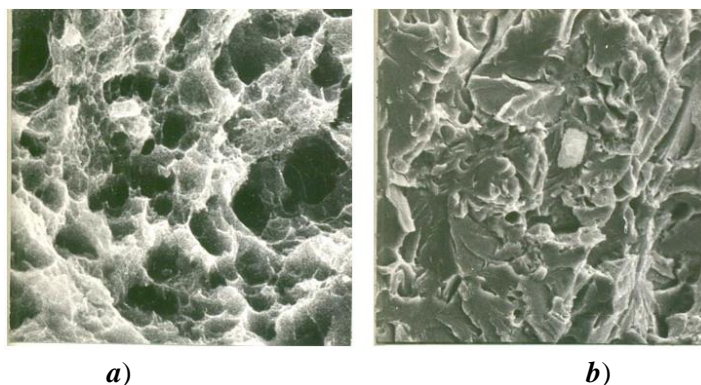


Рис. 6. а) Картина в'язкого руйнування нової сталі марки 06Г2БА після 20-річного терміну експлуатації трубопроводів з водовідведення побутово-технічних відходів на очисні споруди; **б)** картина крихкого руйнування традиційної сталі марки ВСт3сп після 20-річного терміну експлуатації трубопроводів з водовідведення побутово-технічних відходів на очисні споруди

Fig. 6. a) Viscous failure pattern of new 06G2BA steel after a 20-year period of operation of pipelines for the drainage of domestic and technical waste to sewage treatment plants; **b)** a picture of the brittle destruction of traditional VSt3sp steel after a 20-year period of operation of pipelines for the drainage of domestic and technical waste to sewage treatment plants

4. Нова сталь марки 06Г2БА рекомендується для використання у будівництві каналізаційних трубопроводів та, наприклад, мостових конструкцій, які постійно знаходяться під циклічними навантаженнями при одночасному контакті з корозійно-агресивним середовищем. Вперше визначено вплив терміну експлуатації трубопроводів на вміст водню і мікровідкол в трубних сталях.

5. Встановлено тривіальний взаємозв'язок між втомною (циклічною) міцністю основним параметром тріщиностійкості (коефіцієнтом K_{1C} та кінетикою росту тріщин трубних сталей тривалості експлуатації Дано пояснення отриманим залежностям із залученням структурно-фазового складу зломі зразків та їх наводненням.

6. Для зниження металоємності трубопроводів розрахунки несучої здатності таких конструкцій потрібно виконувати по основному показнику механічних властивостей – межі текучості з урахуванням коефіцієнтів концентрації напружень, що дозволить більше задіяти внутрішній ресурс металу та підвищити робочі напруження до $(0,75-0,8)\sigma_{0,2}$. Для цього необхідно використовувати сталі з високою в'язкістю, що дозволить наблизити зростання межі текучості до границі міцності (тимчасового спротиву) при відношенні $\sigma_{0,2}/\sigma_B \approx 0,8-0,9$, що спричинить зростання спротиву тріщиноутворенню в'язко-плас-

тичної структури і використанню повного фізико-механічного ресурсу матеріалу трубних конструкцій.

7. Рекомендовано діаграму взаємозв'язку тривалої і статичної міцності в залежності від вмісту водню в сталях, яку можна використовувати конструкторам для раціонального вибору типу сталей з високою тріщиностійкістю в агресивних технологічних середовищах. Для подовження експлуатаційного робочого ресурсу трубних конструкцій потрібно використовувати економно-модифіковані сталі (ніобієм, ванадієм, церієм та ін.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.** Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1988. 488 с.
2. **Радкевич О. І., П'ясецький О. С., Василеико І. І.** Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірководневому середовищі // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2000. 3. С. 93-97.
3. **Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я.** Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами // Машинознавство, 1999. 8. С. 52-56.

4. **Василенко І. І., Мелехов Р. К.** Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Наукова думка, 1974. 265 с.
5. **Makarenko V. D., Shatilo S. P., Astafev V. I.** Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines // *Welding International*, 1998. 12(12) 988-991.
6. **Makarenko V. D., Shatilo S. P.** Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines // *Welding International*, 1999. 13(12). 991-995.
7. **Самойленко М.І.** Функціональна надійність трубопроводів цих транспортних систем // Харків: ХНАМП, 2009. 184 с.
8. **Berdnyk O. Yu., Lastivka O. V., Maystrenko A. A., Amelina N. O.** Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*. Vol. 907. 012036.

REFERENCES

1. **Panasyuk, V. V., Andreykiv, A. E., & Parton, V. Z. (1988).** *Fracture mechanics and strength of materials: A reference guide*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian]
2. **Radkevich, O. I., P'yasetsky, O. S., & Vasilenko, I. I. (2000).** Corrosion-mechanical corrosion of pipe steel in a hot-water medium. *Phys.-chem. Mechanics of Materials*, 3. 93-97. [in Russian]

3. **Chaplya, O., Radkevich, O., Pyasetsky, O., & Spektor, Y. (1999).** Rival analysis of corrosion-mechanical properties of 20YuCh laminated steel with foreign analogues. *Mashinoznavstvo*, 8. 52-56. [in Ukrainian]
4. **Vasilenko, I. I., & Melekhov, R. K. (1974).** *Corrosion cracking of steels*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian]
5. **Makarenko, V. D., Shatilo, S. P., Astafev, V. I. (1998).** Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 12(12). 988-991. <https://doi.org/10.1080/09507119809448548>
6. **Makarenko, V. D., & Shatilo, S. P. (1999)** Increasing desulphurization of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 13(12). 991-995. <https://doi.org/10.1080/09507119909452086>
7. **Samoylenko, M. I. (2009)** *Funktional reliability of pipelines of transport systems*. Harkiv: HNAMP .
8. **Berdnyk, O. Yu., Lastivka, O. V., Maystrenko, A. A., & Amelina, N. O. (2020)** Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technology in Architecture and Design*, 907. 012036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>

Experimental studies of the bearing capacity of pipe steels of sewage systems

Valery Makarenko, Volodymyr Gots, Volodymyr Pipa, Volodymyr Savenko, Oksana Berdnyk, Iryna Nesterenko

Abstract. It was established that the value of the critical stress SK for all experimental steels increases with the increase in the service life, and the impact viscosity decreases, which indicates structural embrittlement of pipe steels associated with their sudden flooding. It is shown that the new 20FA steel has the highest visco-plastic properties and resistance to brittle fracture, which is economically modified with a carbide-forming element (vanadium) and has a fine-grained structure and a low content of harmful impurities (sulfur, phosphorus). The microstrain of the α -Fe crystal lattice, as well as the quantitative decay of cementite and the redistribution of carbon between ferrite and pearlite, were evaluated by X-ray diffraction methods. The new steel grade 10FA is recommended for use in the construction of underground sewage systems and, for example, bridge structures, which are constantly under cyclic loads with simultaneous contact with a corrosive and aggressive environment. For the first time, the influence of the service life of pipelines on the hydrogen content and microcracks in pipe steels was determined.

Key words: pipe steels, corrosion, destruction, bearing capacity, alloying, viscosity.

Стаття надійшла до редакції 09.11.2023