

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ СИСТЕМ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Валерій Макаренко¹, Володимир Гоц², Юлія Макаренко³, Тетяна Аргатенко⁴

^{1,2,4} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна
³ Університет Манітоби, Вінніпег, Манітоба, Канада

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 green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1252-4231

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

DOI: 10.32347/2524-0021.2024.47.35-46

Анотація. Представлено результати експериментальних досліджень з вивчення кінетики росту тріщин, її взаємозв'язок з параметрами тріщиностійкості і тривалою міцністю трубних сталей різних термінів експлуатації та їх структурно-фазовим складом. 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 06Г2БА, яка економно модифікована карбідоутворюючим 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. Сталь марки 06Г2БА рекомендується для використання у будівництві трубопроводів та, наприклад, мостових конструкцій, які постійно знаходяться під циклічними навантаженнями при одночасному контакті з корозійно-агресивним середовищем. Визначено вплив терміну експлуатації водопроводів на вміст водню і мікровідкол в трубних сталях. 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.

Ключові слова: тріщиностійкість, тривала міцність, тривала експлуатація каналізаційних труб.

ВСТУП

Відомо [1,3-8,10-12], що основними марками трубних сталей є 17Г1С, 17ГС, 19Г, 14ХГС, 14ГН, 10Г2С, 09Г2С, Ст3, Ст10, Ст20. Імпортні труби виготовляються із сталей марок Х50, Х52, Х60 і ін., які відносяться до низьковуглецевих і низьколегованих сталей ферито-перлітного класу. Кількість вуглецю у них складає до 0,22%, а основними легувальними елементами є Mn, Si, Cr, Вi, Cu. В незначних кількостях присутні

шкідливі домішки S, P, H тощо. Ці сталі переважно достатньо глибоко досліджені, в той час як сталі трубного сортаменту, які широко використовуються для будівництва каналізаційних трубопроводів, вивчені недостатньо, особливо з точки зору зміни їх структури і параметрів тріщиностійкості в процесі тривалої експлуатації.

Основні причини руйнувань трубопроводів систем водовідведення наведені на рис. 1. На рис. 2 представлена ілюстрація

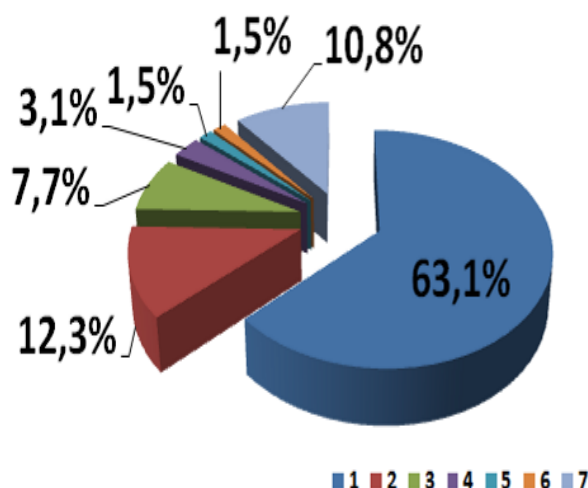


Рис. 1. Причини аварій трубопроводів водовідведення в період 2000-2022 рр.: 1 – крихке руйнування; 2 – корозійні ушкодження; 3 – зварювально-монтажні дефекти; 4 – корозійно-ерозійне зношення; 5 – просідання ґрунтової основи; 6 – заводські дефекти труб; 7 – експлуатаційні помилки

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



Рис. 2. Тріщини корозійної втомності трубопроводів (після очистки зовнішньої ізоляції)

Fig. 2. Corrosion fatigue cracks in pipelines (after cleaning the external insulation)

найбільш характерних корозійних ушкоджень трубопроводів в процесі тривалої експлуатації в корозійно-агресивному середовищі.

Метою експериментальних досліджень було вивчення кінетики росту тріщин, 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.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зразки вирізали безпосередньо з експлуатованих труб в процесі аварійних зупинок чи то профілактичного ремонту трубопроводів. Зразки на механічне руйнування (рис. 3) досліджували за допомогою універсальної машини “Інстрон” (Великобританія). Похибка експериментальних результатів, яка була визначена методом найменших квадратів, складала 2-5%.

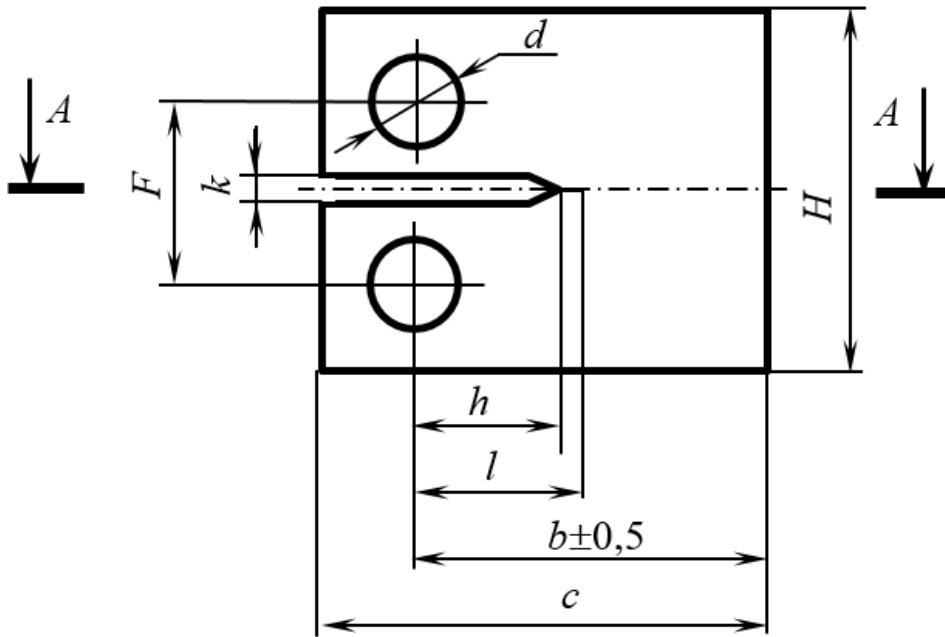


Рис. 3. Зразок для випробувань на тріщиностійкість (визначення параметрів K_{1C} і δ_C) та вивчення кінетики росту тріщин дослідних сталей. Значення геометричних розмірів розраховані згідно співвідношень [16, с.28]: $C = 70$ мм; $H = 60$ мм; $b = C/1,25 = 70/1,25 = 56$ мм; $t \approx 0,5 \cdot b = 0,5 \cdot 56 = 28$ 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. 3. Sample for crack resistance tests (determination of K_{1C} and δ_C parameters) and study of crack growth kinetics of test steels. The values of the geometric dimensions are calculated according to the ratios [16, p. 28]: $C = 70$ mm; $H = 60$ mm; $b = C/1.25 = 70/1.25 = 56$ mm; $t \approx 0.5 \cdot b = 0.5 \cdot 56 = 28$ mm; $d = 0.25 \cdot b = 0.25 \cdot 56 = 14$ mm; $l = 0.5 \cdot b = 0.5 \cdot 56 = 28$ 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

Випробування на крихко-в'язке руйнування регламентуються стандартами: ASTM E399, ASTM E1820, ДСТУ 2825-94 [2,3,7]. 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 впродовж 15-25 років в корозійно-агресивному середовищі показує, що мінімальна товщина СТ зразка для коректного визначення кінетики росту мікротріщин має враховувати вплив корозійного середовища, тобто значення параметра K_{1C} в корозійному середовищі і значення межі текучості таких металів брали з монографії автора [3]. В розрахунках приймали $K_{1SSC} = 35 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а $\sigma_{0,2} = 410 \text{ МПа}$, тоді товщина зразка повинна бути $t = 17,5$ мм (табл.1). Аналогічний розрахунок для сталей 09Г2С і 06Г2БА дозволив отримати значення товщини зразка 12 мм і

18 мм, відповідно.

Довготривалу та 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 акустико-емісійним методом (АЕ). Рішення такої задачі базується на результатах дослідження закономірностей нестабільного розвитку втомних тріщин в локальних окрихчених областях металу труб, тривало експлуатованих трубопроводів. Отже, метод АЕ дозволяє дослідити закономірності нестабільного розвитку тріщин на стандартних зразках (рис.3), а також контролювати процеси розвитку втомних тріщин з невідомою К-тарировкою (коефіцієнт інтенсивності напружень) в місцях, недоступних для інших методів [1, 2].

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

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

Сталі	Термін експлуатації, роки	Критерії тріщиностійкості			t , мм
		K_{IC} , 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

Примітка: параметр t – товщина зразків для дослідження параметрів тріщиностійкості і швидкості росту тріщин в зразках з різним терміном експлуатації трубних сталей

Акустичною емісією супроводжуються практично усі процеси, які відбуваються в метали труб під навантаженням: рух дислокацій, руйнування 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 доти, 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 значною мірою залежать від властивостей матеріалу, анізотропії, механічних характеристик, від ступені розшарування, неоднорідності, структури, тощо (рис.4).

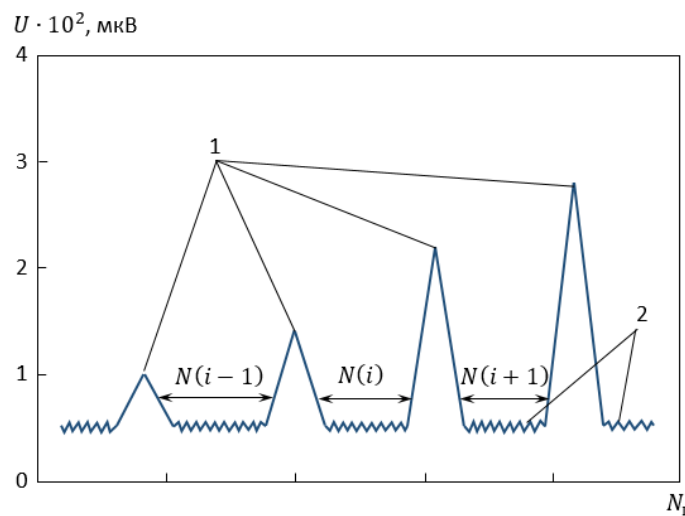


Рис. 4. Ділянка осцилограми отриманій при циклічному навантаженні зразків: 1 – дискретна акустична емісія; 2 – неперервна акустична емісія

Fig. 4. Section of the oscillogram obtained during cyclic loading of samples: 1 – discrete acoustic emission; 2 – continuous acoustic emission

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

Для імітації сигналів АЕ деформованих зістарених трубних сталей на зразок (рис. 2) механічним шляхом наносили надріз. Втої тріщини в зразках вирощували за допомогою гідропульсатора моделі "ЦДМпу-10" (Німеччина) при частоті навантаження 10-15 Гц і коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0,1 \dots 0,2$.

В процесі розвитку втої тріщини зразки трубних сталей піддавали циклічним навантаженням до появи тріщин. При цьому паралельно проводили реєстрацію сигналів неперервної АЕ й імпульсні дискретні сигнали АЕ, що дозволяло вирахувати момент початку нестабільного росту тріщини. За числом циклів навантажень між двома імпульсами визначали запас міцності металу. Оскільки в окрихчених областях швидкість росту тріщин різко зростає, то стрибко-подібна 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 поширення і ступінь окрихчення металу. 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_{1C} , при якому відбувається старт зростання 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 хвилиною 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.5). На рис. 5 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); $\Delta\ell$ – довжина стрибка тріщини.

Рентгеноструктурні дослідження проводили за допомогою растрового електронного мікроскопу фірми "Джеол" (Японія).

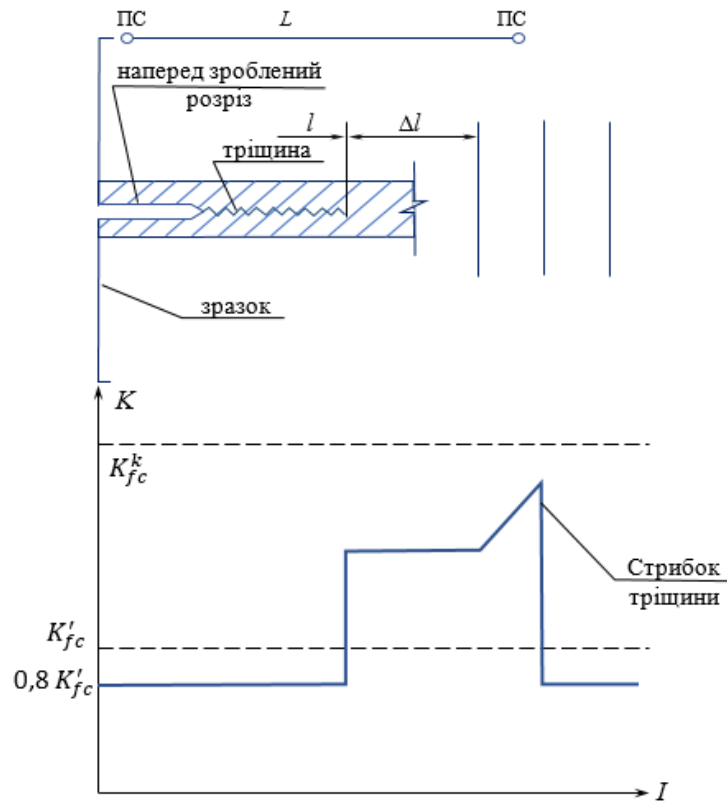


Рис. 5. Схема режиму навантаження при дослідженні кінетики росту втомних тріщин
Fig. 5. Scheme of the load regime in the study of fatigue crack growth kinetics

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

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

$$R_{MB} = S_K / K^\Psi, \quad (1)$$

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

Методом апроксимації встановлено вид функції:

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

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

Одним з характерних показників спротиву крихкому руйнуванню є ударна в'язкість, яка згідно нормативно-регламентної документації приймається 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.

Результати експериментального дослідження взаємозв'язку між корозійно-втомною (тривалою) міцністю і коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_{1C}) та швидкістю росту тріщин трубних сталей марок: 20ГС; 15ХСНД; 08ХМЧА; 16БАФ і сталь 20 наведені на рис.6.

Отже, підбиваючи підсумки експериментальних досліджень можна відмітити, що підвищена схильність до водневого уповільненого руйнування ймовірно викликається: – пониженою стійкістю трубної сталі внаслідок утворення нестійких проти руйнування структур за рахунок утворення гідридів заліза та інших складових;

Табл. 2. Параметри тріщиностійкості трубних сталей тривалого терміну експлуатації
Table 2. Parameters of crack resistance of pipe steels with a long service life

Сталь	Термін експлуатації, роки	Механічні властивості		Вміст водню, [Н], ppm
		S_K , МПа	R_{MB} , Н/м ²	
ВСтЗсп	0	679	605	15,5
	15	647	550	17,8
	25	725	524	32,4
	30	740	4563	46,5
Ст20	5	724	550	16,2
	15	737	524	22,1
	25	749	451	36,5
06Г2БА	0	756	836	9,0
	5	755	723	12,6
	10	776	711	14,1
	15	779	700	20,2
	20	820	654	21,3

Примітка: величини параметрів для сталей ВСтЗсп і Ст20 запозичені із [2].

– підвищеним рівнем напружень, спричинених дефектами форми труб (внутрішніми та зовнішніми).

Звертає на себе увагу той факт, що фізичні властивості, які характеризують несучу здатність трубної конструкції, найбільшою мірою проявляються при використанні нових типів сталей, в яких спостерігається швидке зростання межі текучості в порівнянні з ростом тимчасового спротиву при одночасному підвищенні всього комплексу властивостей [8-10]. Тому при розрахунку межі текучості в трубах значення робочих напружень в стінках труб можуть бути підвищені на 20%, що неминуче дозволить отримати значну економію металу [11, 14].

Представлений на рис. 6 взаємозв'язок між тривалою міцністю, кінетикою росту тріщин і параметром тріщиностійкості K_{IC} в залежності від структурно-фазового стану металу дозволяє обґрунтовано вибирати області, які характеризуються різним ступенем тріщиностійкості. Це може бути корисним конструкторам і проектантам трубчастих конструкцій при оптимальному виборі сталей в залежності від їх структурно-

фазового складу.

Аналіз експериментальних даних, наведених в табл. 1-4, показує, що найбільш високі значення параметрів несучої здатності має удосконалена сталь 06Г2БА, яка економічно модифікована мікродобавкою ніобієм, який, в свою чергу, є дуже сильним карбидоутворюючим елементом. Крім того, нова сталь 06Г2БА в процесі виплавки пройшла прогресивну термообробку – 2-3 разове гартування, після чого високу відпуску з подальшим охолодженням із застосуванням системи спреєр. Це сприяло отриманню дрібнозернистої структури (11-12 бал зерна), а також отриманню дрібнодисперсних неметалевих включень глобулярної форми, що сприяє значному зниженню концентрації напружень в структурі. Причому нова сталь характеризується низьким вмістом газів (кисень, сірка, водень) і шкідливих елементів, зокрема фосфору ($\leq 0,008-0,011$).

На рис.7 у явному вигляді показані картини корозійно-в'язких (а) і корозійно-крихких (б) руйнувань зразків трубних сталей тривалого терміну експлуатації.

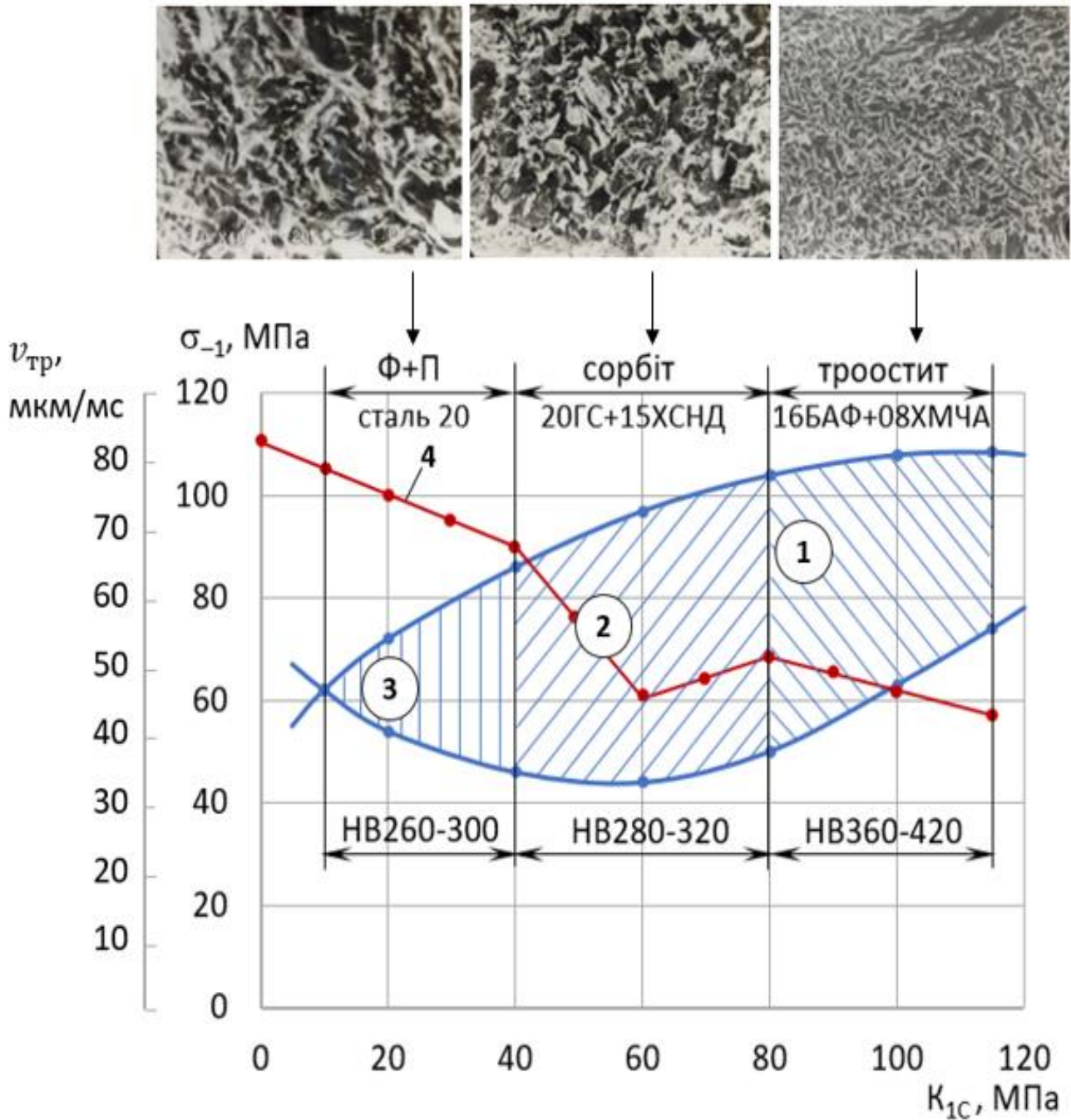


Рис. 6. Взаємозв'язок між корозійно-втомною міцністю, коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_{1C}) та кінетикою росту тріщин трубних сталей: 1 – область високої тріщиностійкості; 2 – область середньої тріщиностійкості; 3 – область низької тріщиностійкості арматурних сталей різного фазово-структурного стану; 4 – графік кінетики росту тріщин різних трубних сталей; *HB* – твердість по Брінелю

Fig. 6. Relationship between corrosion-fatigue strength, stress intensity factor (K_{1C}) and crack growth kinetics of pipe steels: 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

Табл. 3. Відсоток розпаду цементиту (Fe_3C , %) в металі труб
Table 3. Percentage 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 кристалової α -решітки і розподіл вуглецю в трубних сталях

Table 4. The value of the microstresses of the crystal α -lattice and the distribution of carbon in tubular steels

Сталь	Термін експлуатації, роки	σ_s , МПа	Кількість, %	
			ферит	перліт
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

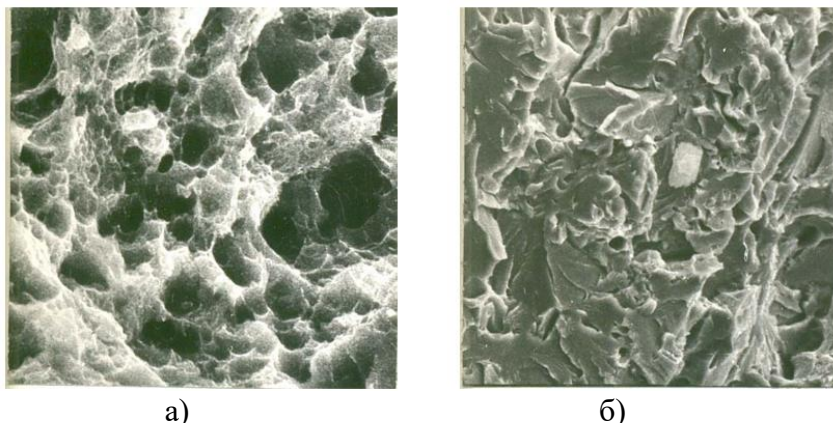


Рис. 7. Руйнування сталі після 20-річного терміну експлуатації каналізаційних трубопроводів: а) в'язке руйнування сталі марки 06Г2БА; б) крихке руйнування сталі марки ВСт3сп
Fig. 7. Destruction of steel after a 20-year service life of sewage pipelines: a) viscous failure of 06G2BA steel; b) brittle fracture of VSt3sp steel

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 високі в'язко-пластичні властивості і спротив крихкому руйнуванню має сталь марки 06Г2БА, яка економно модифікована карбідоутворюючим елементом (ніобієм), відрізняється дрібнозернистою структурою та має низький вміст шкідливих домішок.

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

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

5. Встановлено взаємозв'язок між втомною (циклічною) міцністю основним параметром тріщиностійкості (коефіцієнтом K_{1C} та кінетикою росту тріщин трубних сталей

тривалої експлуатації. Дано пояснення отриманим залежностям із залученням структурно-фазового складу зломів зразків та їх наводненням.

6. Для зниження металоємності трубопроводів розрахунки несучої здатності таких конструкцій потрібно виконувати за основним показником 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 слід 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-пластичної 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.

ЛІТЕРАТУРА

1. Курочкин В. В., Малюшин Н. А., Степанов О. А., Мороз А. А. Эксплуатационная долговечность нефтепроводов // Москва: ООО "Недра-Бизнесцентр". 2001. 231 с.
2. Гумеров А. Г., Ямалеев Н. М., Журавлев Г. В. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов // Москва: ООО "Недра-Бизнесцентр". 2001. 242 с.
3. Макаренко В. Д. Надежность нефгазопромысловых систем // Челябинск: ЦНТИ. 2006. 826 с.
4. Крюков Н. И., Шарафиев Р. Г., Ямулов Н. Р. Газопроводы и газовые сети: надежность, диагностика, перспективы // Челябинск: Уфа, ЦНТИ. 2006. 315 с.
5. Макаренко В. Д. Коррозионная стойкость сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов // Москва: ООО "Недра-Бизнесцентр". 2000. 500 с.
6. Макаренко В. Д., Палий Р. В., Галиченко Е. Н. Физико-механические основы сероводородного разрушения промысловых трубопроводов // Челябинск: ЦНТИ. 2002. 412 с.
7. Макаренко В. Д., Гачев С. И., Прохоров Н. Н. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири // Киев: Наукова думка. 1996. 549 с.
8. Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Билик С. І. Корозійні руйнування каналізаційних систем України // Київ: НУБіП України. 2021. 272 с.
9. Росетко В. Е. Защита трубопроводов от коррозии // Москва: ВНИИМП. 2000. 200 с.
10. Самойленко М. І. Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем // Харків: ХНАМП. 2009. 184 с.
11. Седак В. С., Нестеренко С. В. Анализ утечек газа и причин стресс коррозионного разрушения подземных трубопроводов // Коммунальное хозяйство міст. №10. 2013. С.182-188
12. Седак В. С., Супонев В. Н. Анализ аварийных рисков и прогноз отказов систем газоснабжения // Охрана труда. 2011. №6. С.44-47
13. Ориняк І. В., Різгонюк В. В. Ресурс довговічність і надійність трубопроводів Огляд сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні // Нафтова і газова промисловість. 2003. №4. С54-57
14. Петровский В. А., Макаренко В. Д., Чернов В. Ю. Научно-практические основы эксплуатационной надежности нефтепромыслового оборудования. Челябинск: ЦНТИ. 2003. 118 с.
15. Насонкіна Н. Г., Антоненко Є. Г.,

- Тряківа А. С. Аналіз пошкодженості водопроводів і каналізаційних мереж // Сучасне промислове та цивільне будівництво. 2019. Том15. №1. С.23-34
16. Макаренко В. Д., Палий Р. В., Прохоров Н. Н. Критерии оценки эксплуатационных свойств трубных сталей промысловых нефтепроводов // Нижневартовск: Приобье. 2001. 96 с.
 17. Мешков Ю. Я. О возможности устойчивого равновесия острых трещин при их зарождении в металлах // Металлофизика. 1989. Вып.23. С.5-12.
 18. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела // Киев: Наукова думка. 1986. 262 с.

REFERENCES

1. Kurochkin, V. V., Malyushin, N. A., Stepanov, O. A., & Moroz, A. A. (2001). *Operational durability of oil pipelines*. Moscow: ООО "Nedra-Business Center". [in Russian]
2. Gumerov, A. G., Yamaleev, N. M., & Zhuravlev, G. V. (2001). *Crack resistance of oil pipeline metal*. Moscow: ООО "Nedra-Business Center". [in Russian]
3. Makarenko, V. D. (2006). *Reliability of oil and gas production systems*. Chelyabinsk: CNTI. [in Russian]
4. Kryukov, N. I., Sharafiev, R. G., & Yamurov, N. R. (2006). *Gas pipelines and gas networks: reliability, diagnostics, prospects*. Chelyabinsk: Ufa, CNTI. [in Russian]
5. Makarenko, V. D. (2000). *Corrosion resistance of welded metal structures of oil and gas facilities*. Moscow: ООО "Nedra-Business Center". [in Russian]
6. Makarenko, V. D., Paliy, R. V., & Galichenko, E. N. (2002). *Physical and mechanical principles of hydrogen sulfide destruction of field pipelines*. Chelyabinsk: CNTI. [in Russian]
7. Makarenko, V. D., Gachev, S. I., & Prokhorov, N. N. (1996). *Welding and corrosion of oil and gas pipelines in Western Siberia*. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]
8. Makarenko, V. D., Maksimov, S. Yu., & Bilik, S. I. (2021). *Corrosion of sewerage systems in Ukraine*. Kiev: NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian]
9. Rosetko, V. E. (2000). *Protection of*

pipelines from corrosion. Moscow: VNIIMP. [in Russian]

10. **Samoilenko, M. I. (2009)**. *Functional reliability of pipeline transport systems*. Kharktsiv: KHNAMP. [in Ukrainian]

11. **Sedak, V. S., & Nesterenko, S. V. (2013)**. Analysis of gas leaks and the causes of stress corrosion destruction of underground pipelines. *Communal economy of the city*, 10. 182-188. [in Russian]

12. **Sedak, V. S., & Suponev, V. N. (2011)**. Analysis of emergency risks and forecast of failures of gas supply systems. *Labor protection*. 6. 44-47 [in Russian]

13. **Orynyak, I. V., & Rizgonyuk, V. V. (2003)**. Resource durability and reliability of pipelines Review of modern approaches and problems of regulatory support in Ukraine. *Oil and gas industry*. 4. 54-57 [in Ukrainian]

14. **Petrovsky, V. A., Makarenko, V. D., & Chernov, V. Yu. (2003)**. *Scientific and*

practical principles of operational reliability of oilfield equipment. Chelyabinsk: CNTI. [in Russian]

15. **Nasonkina, N. G., Antonenko, E. G., & Tryakiva, A. S. (2019)**. Damage analysis of water pipes and sewage networks. *Modern industrial and civil construction*. 15(1). 23-34. [in Ukrainian]

16. **Makarenko, V. D., Paliy, R. V., & Prokhorov, N. N. (2001)**. *Criteria for assessing the performance properties of pipe steels for oil field pipelines*. Nizhnevartovsk: Priobye. [in Russian]

17. **Meshkov, Yu. Ya. (1989)**. On the possibility of stable equilibrium of sharp cracks during their initiation in metals. *Metallophysics*. 23. 5-12. [in Russian]

18. **Pisarenko, G. S., & Strizhalo, V. A. (1986)**. *Experimental methods in mechanics of a deformable solid body*. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]

Experimental studies of bearing capacity of pipe steel of sewage systems

Valery Makarenko, Volodymyr Gots, Yuliya Makarenko, Tetiana Arhatenko

Annotation. The results of experimental studies on the kinetics of crack growth, its relationship with the parameters of crack resistance and long-term strength of pipe steels of different service life and their structural and phase composition are presented. It was found that the value of the critical stress SK for all test steels increases with the increase in the service life, and the impact viscosity decreases, which indicates the structural embrittlement of the pipe steels associated with their sudden flooding. It is shown that the new 06G2BA steel, 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), has the highest visco-plastic properties and resistance to brittle fracture. 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 structural methods. 06G2BA steel is recommended for use in the construction of pipelines and, for example, bridge structures, which are constantly under cyclic loads with simultaneous contact with a corrosive-aggressive environment. The influence of the service life of water pipes on the hydrogen content and microcracks in pipe steels was determined. A diagram of the relationship between long-term and static strength depending on the hydrogen content in steels is recommended, which can be used by designers to rationally choose the type of steels with high crack resistance in aggressive technological environments. In order to extend the service life of pipe structures, it is necessary to use economically modified steels.

Keywords: crack resistance, long-term strength, long-term operation of sewage pipes.

Стаття надійшла до редакції 07.06.2024