

УДК 669.14 : 620.191.33

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ ТРІЩИН ТА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ПІДЗЕМНИХ СИСТЕМ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

В.Д. Макаренко¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Гоц¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Савенко¹,

д-р техн. наук, професор

О.В. Владимиров¹,

аспірант

Ю.В. Макаренко²,

магістерка

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
Київ, Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680

²Університет Манітобо, м. Вінніпег, Канада

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.469-482

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 окрихнення трубних сталей, пов'язане з їх різким наводненням. Показано, що найбільш високими в'язко-пластичними властивостями і опором крихкому руйнуванню має нова сталь марки 20ФА, 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. Нова сталь марки 10ФА рекомендується для використання у будівництві нафтогазопроводів та, наприклад, мостових конструкцій, які постійно знаходяться під циклічними навантаженнями при одночасному контакті з корозійно-агресивним середовищем. Вперше визначено вплив терміну експлуатації нафтопроводів на вміст водню і мікровідкол в трубних сталях нафтопроводів.

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

Основні положення. Відомо [1-6, 8-13], 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 легуючими елементами є Mn, Si, Cr, Bi, Cu. В незначних кількостях присутні шкідливі домішки S, P, Ni ін. Також відомо [1-4], 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, особливо з точки зору зміни їх структури і параметрів тріщиностійкості в процесі тривалого терміну експлуатації зокрема впливу наводнення металу, яке відбувається на протязі тривалого терміну експлуатації.

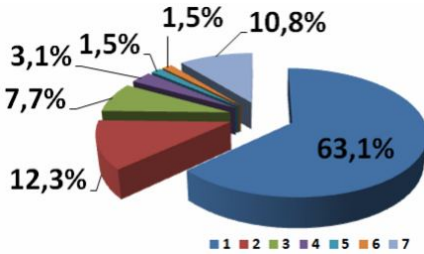


Рис. 1. Причини аварій трубопроводів водовідведення в період з 2000р. по 2022р.: 1 – крихке руйнування; 2 – корозійні ушкодження; 3 – зварювально-монтажні дефекти; 4 – корозійно-ерозійне зношення; 5 – просідання ґрунтової основи; 6 – заводські дефекти труб; 7 – експлуатаційні помилки

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

На рис. 2. наведені найбільш характерні корозійні ушкодження, які в процесі тривалої експлуатації трубопроводів в корозійно-агресивному середовищі служать осередками зародження мікротріщин, які приводять з часом до руйнувань водоводів та насосних перекачуючих воду станцій.



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

Ціль роботи – експериментальні дослідження впливу наводнення та терміну експлуатації трубопроводних конструкцій на тривалу і статичну міцність та кінетику росту тріщин трубних сталей, експлуатованих в корозійно-агресивних середовищах.

Методи дослідження і лабораторне устаткування.

Експериментальні дослідження ударної в'язкості в залежності від температури випробувань проводили на зразках, вирізаних з тіла стінки труб з різними термінами експлуатації.

Зразки з труб випробували на механічне руйнування за допомогою універсальної машини "Інстрон" (Великобританія). Похибка

експериментальних результатів, яка була визначена методом найменших квадратів, складала 2-5%.

Для дослідження кінетики росту тріщин в зразках трубних сталей різного тривалого терміну експлуатації використовували метод акустичної емісії разом з аналізатором нестационарних емісійних процесів (АНЕП). Дослідження проводили на зразках, наведених на рис. 3.

Метод акустичної емісії (АЕ) оснований на вловлюванні звукових сигналів, які випромінюються при пластичній деформації в локальних зонах металу труб і розвитку тріщин [10, 11]. Цей метод володіє перевагою, зокрема, в порівнянні, наприклад, з ультразвуковою внутрішньо

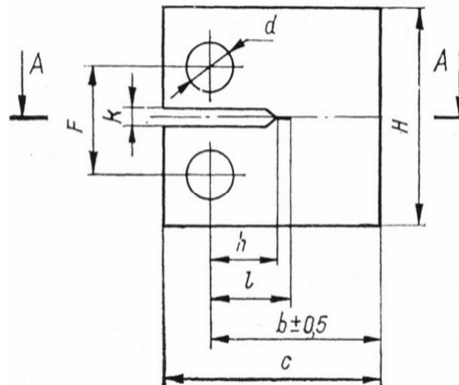


Рис. 3. Зразок для випробувань на тріщиностійкість (визначення параметрів K_{IC} і δ_C) досліджуваних сталей. Значення геометричних розмірів розраховані згідно співвідношень, наведених на сторінці 28 (рис. 15) в монографії [17], де $c = 70$ мм; $H = 60$ мм; $b = c/1.25 = 50/1.25 = 40$ мм; $t \approx 0.5$; $b = 0.5 \cdot 40 = 20$ мм; $d = 0.25 \cdot b = 0.25 \cdot 40 = 10$ мм; $l = 0.5 \cdot b = 0.5 \cdot 40 = 20$ мм; $h = 0.35 \cdot 40 = 14$ мм; $F = 0.55 \cdot b = 0.55 \cdot 40 = 22$ мм; $k = 1/16 \cdot b = 1/16 \cdot 40 = 2.5$ мм

трубною діагностикою, низькою вартістю (в 3-4 рази), можливістю контролю тріщино утворень в металі труб, дискретністю і можливістю переходу до неперервного контролю технічного стану трубопроводів, малою інерційністю. За допомогою методу АЕ можна досліджувати:

1) вплив зміни структури на тріщиностійкість трубних сталей при тривалій експлуатації трубопроводів; 2) закономірності руйнування металу труб з урахуванням втомленості і старіння; 3) спектральний аналіз акустично-емісійних сигналів; 4) кореляційні залежності між характеристиками сигналів і розвитком тріщин.

Довготривалу і безпечну роботу трубопроводів в умовах окрихнення (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 окрихнених областях металу труб, тривало експлуатованих трубопроводів, іншими словами метод АЕ дозволяє дослідити закономірності нестабільного розвитку тріщин на стандартних компакт-зразках (рис. 4), а також контролювати процеси розвитку втомних тріщин з невідомою К-тарифовкою (коефіцієнт інтенсивності напружень) в місцях, недоступних для інших методів [1, 13].

Акустичною емісією супроводжується практично усі процеси, які відбуваються в металі 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 до тих пір, поки не перевищений рівень напружень попередньої дії [1, 12]. Початкове навантаження, при якому в процесі повторного навантаження появляється акустична емісія називається коефіцієнтом накопичення.

Дослідженнями встановлено [1, 11-13], 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. 4).

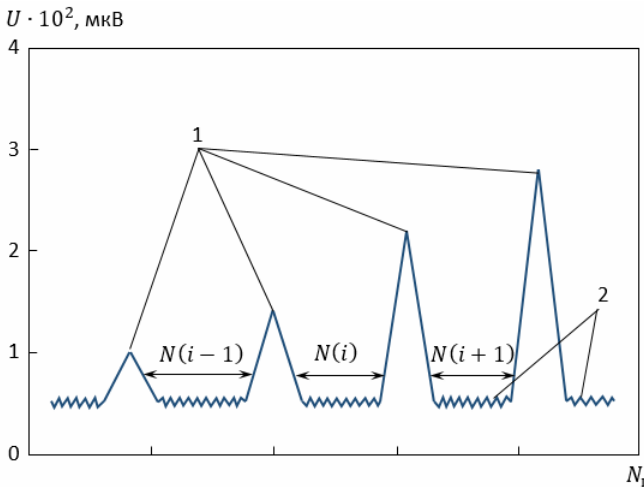


Рис. 4. Ділянка осцилограми отриманій пери циклічному навантаженні зразків:
1 – дискретна АЕ; 2 – неперервна АЕ

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 (рис. 2)

наносили механічним шляхом надріз. Втомні тріщини в зразках вирощували за допомогою гідро пульсатора моделі “ЦДМпу-10” (Німеччина) при частоті навантаження 10-15 Гц 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 [1, 12], 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. 4). 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 $t \leq 2.5 (K_{IC}/\sigma_{0.2})^2$, 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. 5). На рис. 5 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.

Для реєстрації статистичних результатів вимірювань та їх обробці використовували прилад АНЕП (рис. 6).

Для проведення досліджень з **ціллю вивчення** зміни механічних властивостей металу труб водопроводів були зібрані дані багаторічних досліджень авторів колективних монографій [1-3] для порівняння з результатами досліджень нових трубних сталей 06Г2БА (економно модифікована сильним карбідоутворюючим елементом – ніобієм в кількості 0.02-0.04%). Нові трубні сталі виплавляли на сталепрокатному комбінаті “Азовсталь” (м.Маріуполь). Там же на прокатному стані виготовляли труби діаметром 420-520 мм. Зразки для експериментальних випробувань вирізали з фрагментів труб (після аварій, демонтажу, реконструкції, з аварійного запасу). Для проведення порівняльного аналізу використовували зразки із сталей традиційних марок ВСтЗсп і Ст20, які широко використовуються в водно-господарській промисловості. Термін експлуатації труб складав 7-35 років, нових сталей від 0 до 20 років. В такому випадку використовували сталі, які в експлуатації не знаходилися (брали безпосередньо з аварійного запасу), тобто у вихідному стані. Були виготовлені зразки для випробувань на ударну в'язкість (з круглим і гострим надрізом) згідно ГОСТ 9454-78 і ГОСТ1497-84.

Дослідження кінетики росту тріщин та втомленої (циклічної міцності) здійснювали згідно нормативно-регламентних вимог міжнародних стандартів - рис. 7 [12-14].

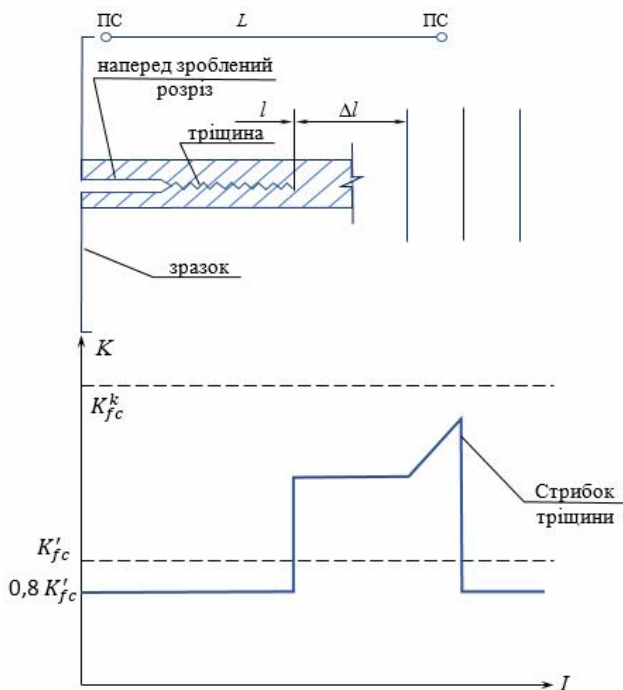


Рис. 5. Схематичне зображення режиму навантаження при дослідженні кінетики росту втомних тріщин

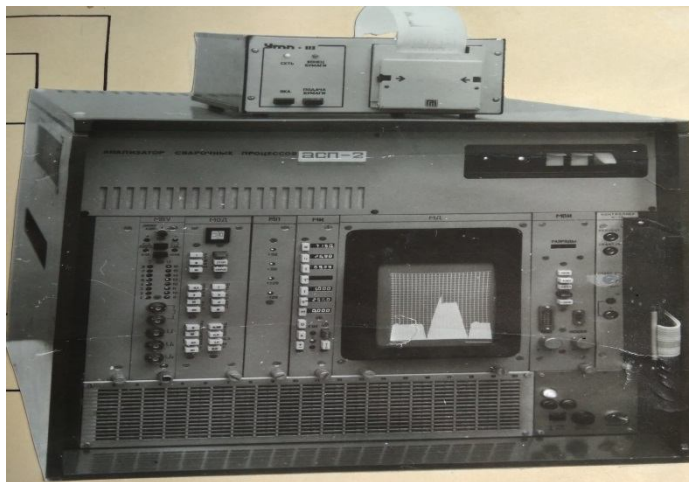


Рис. 6. Інформаційно-вимірювальна система АНЕП

Результати експериментів та їх обговорення. Результати експериментальних досліджень взаємозв'язку границі втомності і статичної межі міцності наведені на рис. 7. Звідки видно, що найбільша тріщиностійкість притаманна сталям із структурою сорбіт, частково тростит. Наявля, високоміцній сталі зі структурою мартенсит притаманна невисока тріщиностійкість з причини зниження в'язкопластичних характеристик, тобто окрихчення структури, яка при значних знакозмінних напруженнях схильна до утворення мікротріщин.

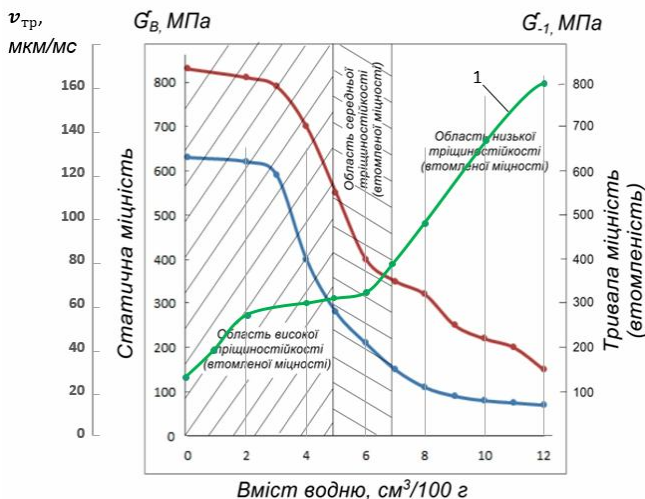


Рис. 7. Графіки залежності кінетики росту тріщин ,втомної міцності (σ_{-1}) і статичної міцності (σ_B) від вмісту водню в зразках трубної сталі марки 09Г2ФБ. База випробувань $N=10^7$ циклів. Позначення: Червона лінія відноситься до осі статичної міцності, а синя лінія відноситься до осі втомленої міцності (σ_{-1}); графік (1) відображає кінетику росту тріщин

Представлений на рис. 7 взаємозв'язок між статичною і тривалою міцністю в залежності від наводнення металу дозволяє вибирати обґрунтовано області, які характеризуються різним ступенем тріщиностійкості, що може слугувати конструктора і проєктантам трубчастих конструкцій при оптимальному виборі сталей в залежності від структурно-фазового складу.

Крім того видно, що найбільша тріщиностійкість притаманна сталям із структурою сорбіт, частково тростит. Нажаль, високоміцній сталі зі структурою мартенсит притаманна невисока тріщиностійкість з причини зниження в'язко-пластичних характеристик, тобто окрихчення структури, яка при значних знакозмінних напруженнях схильна до утворення мікротріщин.

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: KC_3 – робота зародження тріщини; KC_p – робота розповсюдження тріщини (здатність металу чинити опір розвитку тріщини).

Вважається, що великі значення KC_p 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 МДж/м^2 , що не відповідає вимогам ДНіП України. Вимогам Держстандарту щодо холодостійкості відповідає експериментальна сталь 06Г2БА (див. табл. 1).

Таблиця 1

Результати визначення ударної в'язкості трубних сталей тривалого терміну експлуатації

Марка сталі	Термін експлуатації, роки	$KCV, \text{ МДж/м}^2$	
		$+20^{\circ}\text{C}$	-40°C
ВСтЗсп	0	0.5-0.6	0.38
	10	0.42	0.20
	20	0.39	0.19
	30	0.30	0.12
Ст20	0	0.55	0.45
	10	0.52	0.40
	20	0.45	0.38
	30	0.40	0.28
06Г2БА	0	0.80	0.69
	10	0.66	0.55
	20	0.53	0.50
	30	0.52	0.46

Дані, наведені в табл. 1, стосовно сталей 20 і ВСтЗсп взяті з монографії [1].

Відомо [3-8, 10-14], що в процесі експлуатації під дією внутрішнього тиску сталева оболонка трубопроводів витримує напруження близькі до нормативних характеристик міцності металу труб. Це пов'язано зі складною схемою взаємодії трубопроводу з ґрунтом і з присутністю дефектів – металургійного, зварювального і транспортного походження та з порушеннями і помилками режимів з перекачування продукту. Крім того, не дивлячись на покращення в останні роки експлуатаційних показників відбувається процес старіння трубопроводів. В трубних сталях в умовах експлуатації водоводів, в основному, відбувається деформаційне старіння. Це пояснюється не тільки характером навантаження труб, але й тим, що трубні сталі містять в своєму складі шкідливі домішки – С, N, S, легуючі елементи. Наявність атомів водню в ґрунтових електролітах, H_2S у промислово-побутових відходах, регенерація водню при катодних реакціях приводить до окрихнення сталі труб при тривалих циклічних впливах. Сукупність цих процесів спричиняє зміну структури і фізико-механічних властивостей металу, тобто приводить до старіння металу. Сполучення усіх факторів створює випадковий характер відмов і аварій (див. рис. 1).

Розчинність кисню в органічній фазі побутових відходів складає порядку 0.006-0.007%, а у водній фазі всього 0.0008%. З часом кількість кисню зменшується до 0,4-0,7 мг/л. Як відомо, швидкість корозії сталі в нейтральному водному середовищі пропорційна концентрації кисню [2-4, 11-13]. Таким чином, утворюється двофазна система з різною аерацією – гальванічна пара. Корозійний процес проходить на границі розділу фаз. Анодна область – під водою, катодна – під водною сумішшю – рис. 8.

В підсумку, можна відмітити, що в металі труб магістральних трубопроводів має місце велика кількість мікрodefektів (вакансії, дислокації, мікропори, мікротріщини і ін.), які розвиваються в процесі експлуатації водоводів і в певний момент можуть стати концентраторами напружень. При тривалій експлуатації трубопроводів відбувається суттєве (до 20%) зниження пластичності металу труб, зниження (майже в 2 рази) значень ударної в'язкості. Усі ці зміни пов'язані з циклічним навантаженням, що спричинене зміною внутрішнього тиску води з-за планових і незапланованих зупинок водоводів та насосних станцій.

Вищевикладені матеріали надають можливість стверджувати, що одним з характерних і достовірних показників опору металу труб крихкому руйнуванню є ударна в'язкість, в зв'язку з чим нами були проведені додаткові системні дослідження з використанням цього показника.

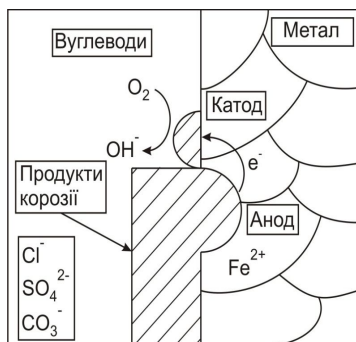


Рис. 8. Схема корозії вуглецевої сталі (катодні і анодні ділянки) у водному середовищі

Зразки на ударну в'язкість вирізали безпосередньо з труб.

Вміст водню в трубних сталях з різними термінами експлуатації трубопроводів оцінювали за допомогою установки "Негеус" (Німеччина).

Результати експериментальних досліджень ударної в'язкості викладені в табл. 1.

З літератури відомо [2-6], що наводнення металу, яке відбувається в процесі тривалого терміну експлуатації конструкцій, спричиняє окрихчення металу труб, яке, в свою чергу, різко знижує його в'язко-пластичні властивості, зокрема твердість. Крім того, наводнення, як правило, спричиняє утворення мікропор та інших дефектів в структурі (пасток), які стають додатковими концентратами напружень, знижуючи несучу здатність трубних конструкцій.

Використовуючи в своїх розрахунках атомний механізм руйнування сталевих конструкцій, Калачев Б.А. теоретично обґрунтував можливість зародження мікротріщин в присутності каталізатора водню [2, 3]. Він показав, що, наприклад, появі субмікротріщини в околі дислокації сприяють дотичні напруження, які на відстані 1 мкм від ядра дислокації дорівнюють 3.2 Н/мм^2 . Термодинамічними розрахунками показано, що навіть при малих концентраціях розчиненого в металі водню ($[H] \approx 2-3 \text{ ppm}$) знижується поверхнева енергія (приблизно на $6.0 - 7.5 \text{ Дж/см}^2$) [4]. Коли врахувати, що фактичні витрати енергії на руйнування чистого заліза рівні $\approx 10-20 \text{ Дж/см}^2$, з врахуванням коефіцієнта дифузії водню (рухомість атомів водню) в металі $D_H = 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ з реальним напруженим станом елементів трубопровідної конструкції, то цього достатньо для зародження мікротріщин, які можуть спровокувати їх подальший ріст з розповсюдженням в глибину стінки і вздовж труби [13].

Умови переходу зародкових мікротріщин до автокаталітичного розвитку і утворенню макротріщини детально вивчені і обґрунтовані в роботах [5, 6].

Аналіз експериментальних даних, наведених в табл. 1, показує, що найбільш високі параметри несучої здатності має 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" (2-3-х разове загартування, 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. 9 і 10 у явному вигляді показані картини корозійних ушкоджень з подальшим руйнуванням трубних сталей тривалого терміну експлуатації.

Висновки

1. Вперше за допомогою методу акустичної емісії із залученням аналізатора нестационарних емісійних процесів досліджено кінетику

росту тріщин. Побудована діаграма взаємозв'язку статичної і тривалої (циклічної) міцності і кінетики росту тріщин в залежності від наводнення трубної сталі марки 06Г2БА. Показано, що найбільш високими в'язко-пластичними властивостями і спротивом крихкому руйнуванню має нова сталь марки 06Г2БА, яка економно модифікована карбідоутворюючим елементом (ніобієм) і відрізняється дрібнозернистою структурою та має низький вміст шкідливих домішок (сірка, фосфор).



Рис. 9. Макроструктура сталі 06Г2БА з мікротріщинами (відмічені стрілками), які об'єдналися в магістральну тріщину

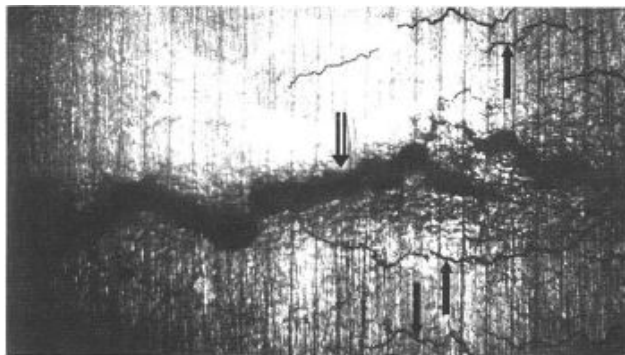


Рис. 10 [2]. Магістральна тріщина (відмічена двійною стрілкою) та мікротріщини (відмічені одинарними стрілками) в трубних сталях трубопроводів з водовідведення з 30-ти річним терміном експлуатації в підземному траншейному виконанні

2. Нова 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.

3. Рекомендовано діаграму взаємозв'язку тривалої і статичної міцності в залежності від вмісту водню в сталях, на якій одночасно приведений графік кінетики росту тріщин, 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.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гумеров А.Г., Ямалеев Н.М., Журавлев Г.В.* Трещиностойкость металла труб нефтепроводов // ООО "Недра-Бизнесцентр". -2001. - 242 с.
2. *Макаренко В.Д., Гачев С.И., Прохоров Н.Н.* Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири // Киев: Изд-во "Науковадумка". —1996. - 549 с.
3. *Макаренко В.Д., Максимов С.Ю., Билик С.І. і ін.* Корозійні руйнування каналізаційних систем України // Київ: НУБіП України. -2021. - 272 с.
4. *Rosetko V.E.* Защита трубопроводов от коррозии // М.: ВНИИМП. - 2000. – 200 с.
5. *Самойленко М.І.* Функціональна надійність трубопроводів них транспортних систем // Харків: ХНАМП. -2009.-184с
6. *Орняк І.В., Різгонюк В.В.* Ресурс довговічності і надійності трубопроводів Огляда сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні // Нафтова і газова промисловість. -2003.-№4.-С. 54-57.
7. *Атомный механизм разрушения* // М.: Мир.-1983. - 660 с.
8. *Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Меттус Г.С.* К вопросу о вязком и хрупком состоянии поликристаллических металлов // Металлофизика. -1990.-№6.-С.3-13
9. *Мешков Ю.Я.* Разрушение деформированной стали // Киев: Наукова думка. -1989.- 160 с.
10. *T.Kawakubo, M. Hishida.* 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...-pp. 240-245.
11. *Методика з визначення параметрів тріщиностійкості ASTM E399-78 (для компактних зразків і зразків з центральним надрізом) // Journal of Engineering Materials and Technology. - 2005. –Vol.107.-pp.107-116.*
12. *Ford F.P. and Silverman M.J.* Effect of Loading Rate on Environmentally Controlled Cracking of Sensitized 304 Stainless Steel in High Purity Water // Corrosion.-Vol.36.-1980, pp.597-603.
13. *Kawakubo T. and Hishida M.* Crack Initiation and Growth Analysis by Direct Optical Observation During SSRT in High Temperature Water // Corrosion.- Vol. 40, 1984.- pp. 120-126.

REFERENCES

1. *Gumerov A.G., Yamaleev N.M., Zhuravlev G.V.* Treshhy'nostojkost' metala trub nefteprovodov (Crack resistance of the metal of oil pipelines) // LLC "Nedra-By'znescentr". -2001. -242 s.
2. *Makarenko V.D., Gachev S.Y., Proxorov N.N.* Svarka y' korrozija naftogazoprovodov Zapadnoj Sy'by'ry' (Welding and corrosion of oil and gas pipelines in Western Siberia) // Ky'ev: Y'zd-vo "Naukovadumka". —1996.-549 s.
3. *Makarenko V.D., Maksymov S.Yu., Bilyk S.I. і in.* Korozijni rujnuvannya kanalizacijny'x sy'stem Ukrainy' (Corrosive destruction of sewage systems of Ukraine) // Ky'yiv: NUBIP Ukrainy'. -2021.-272 s.
4. *Rosetko V.E.* Zashhy'ta truboprovodov ot korrozijny'x (Protection of pipelines from corrosion) // М.: VNY Y'MP.-2000.-200 s.
5. *Samojlenko M.I.* Funkcional'na nadijnist' truboprovodiv ny'x transportny'x sy'stem (Functional reliability of pipelines of transport systems) // Xarkiv: XNAMP. -2009.-184 s.
6. *Ory'nyak I.V., Rizgonyuk V.V.* Resurs dovgoichnist' i nadijnist' truboprovodiv Oglyad suchasny'x pidxodiv i problemy' normaty'vnoho zabezpechennya v Ukraini (Resource durability and reliability of pipelines Review of modern approaches and problems of regulatory support in Ukraine) // Naftova i gazova promy'slovis't'. -2003.-#4.-S. 54-57.
7. *Atomnyj mexany'zm razrusheny'ya (Atomic destruction mechanism)* // М.: My'r.-1983.-660 s.
8. *Kotrachko S.A., Meshkov Yu.Ya., Mettus G.S.* K voprosu o v'язком y' xрупком sostoyany' y' poly'kry'stally'chesky'x metallo'v (To the question of the viscous and brittle state of polycrystalline metals) // Metallofy'zy'ka. -1990.-#6.-S. 3-13.

9. Meshkov Yu.Ya. Razrusheniye deformatsionnoy stali (Destruction of deformed steel) // Ky'ev: Naukova dumka. -1989.- 160 s.
10. T.Kawakubo, M. Hishida. 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.-pp.240-245.
11. Metody ka z vy'znachennya parametriv trishhy'nostijkosti ASTM E399-78 (dlya kompaktny'x zrazkiv i zrazkiv z central'ny'm nadrizom) (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. –Vol.107.-pp.107-116.
12. Ford F.P. and Silverman M.J. Effect of Loading Rate on Environmentally Controlled Cracking of Sensitized 304 Stainless Steel in High Purity Water//Cottosion.-Vol.36.-1980, pp. 597-603.
13. Kawakubo T. and Hishida M. Crack Initiation and Growth Analysis by Direct Optical Observation During SSRT in High Temperature Water// Corrosion.-Vol.40,1984.-pp. 120-126.

Стаття надійшла 23.03.2023

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ ТРІЩИН ТА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ПІДЗЕМНИХ СИСТЕМ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

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 окрихнення 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 нафтогазопроводів та, наприклад, мостових конструкцій, які постійно знаходяться під циклічними навантаженнями при одночасному контакті з корозійно-агресивним середовищем. Вперше визначено вплив терміну експлуатації нафтопроводів на вміст водню і мікротріщин в трубних сталях нафтопроводів.

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

Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Makarenko Y.V.

EXPERIMENTAL STUDIES OF CRACK GROWTH KINETICS AND BEARING CAPACITY OF STEEL PIPES OF UNDERGROUND WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

It was established that the value of the critical stress S_K for all experimental 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 20 FA 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 crystallattice, as well as the quantitative decay of cementite and here distribution of carbon between ferrite and pearlite, were estimated by X-ray diffraction methods. The new steel grade 10FA is recommended for use in the construction of oil and gas pipelines 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 oil pipelines on the hydrogen content and microcracks in pipe steels of oil pipelines was determined.

Keywords: oil pipeline, corrosion, destruction, bearing capacity, alloying, viscosity.

УДК 669.14 : 620.191.33

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 469-482.

Табл. 1. Іл. 10. Бібліогр. 13 назв.

UDC 669.14 : 620.191.33

Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Makarenko Y.V. Experimental studies of crack growth kinetics and bearing capacity of steel pipes of underground water distribution systems // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: KNUBA, 2023. – Issue 110. – P. 469-482.

Table 1. Fig. 10. Ref. 13.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор Київського національного університету будівництва і архітектури **МАКАРЕНКО** Валерій Дмитрович
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
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): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури **ГОЦ** Володимир Іванович
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Тел.: +38(044) 248-30-16
E-mail: gots.vi@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

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): аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури **ВЛАДИМИРОВ** Олексій Володимирович
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Тел.: +38(044) 245 48 51
E-mail: savenkoknuba@gmail.com

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): магістерка університету Манітобо (м. Вінніпег, Канада) **МАКАРЕНКО** Юлія Валеріївна
Тел.: +38(066) 747-67-90
E-mail: green555tree@gmail.com