

Знайдемо лінію обмеженої довговічності для випадку випробувань сталі за постійного мінімального напруження $\tau_{\min}=50\text{МПа}$. Оскільки перерахунок здійснюється з 1-го методу до 2-го, необхідно користуватись формулами, розміщеними в першому рядку таблиці 1.

Рівняння лінії довговічності за $\tau_{\min}=50\text{МПа}$ має вигляд (рис. 2, пунктирна лінія 3):

$$\tau=180,7-5,54\lg N.$$

Для перевірки достовірності розрахункової кривої були проведені випробування на втому і побудована крива втоми сталі 20 за $\tau_{\min}=50\text{МПа}$ (лінія 4). Кореляційне рівняння експериментальної кривої має вигляд:

$$\tau_e=177,2-6,51\lg N_e.$$

Як бачимо із зображених на рис. 2 ліній, максимальне відхилення несучої здатності $\Delta\tau$

від розрахункового значення має місце за $N \cong 3 \cdot 10^6$ циклів і не перевищують 1%. Отже, запропонована методика може використовуватись для оцінки обмеженої довговічності трубопроводів за асиметричного циклу навантажень.

Література

1. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
3. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.

УДК 621.643

ОСОБЛИВОСТІ СТРЕС-КОРОЗІЇ СТАЛІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ У КИСЛИХ ЕЛЕКТРОЛІТАХ

Є.І.Крижанівський, Л.Я.Побережний

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42264,
e-mail: rector@nung.edu.ua, poberezhny@nung.edu.ua

Исследованы особенности стресс-коррозии стали магистральных газопроводов в растворах кислых электролитов. Показано, что механический фактор оказывает значительное влияние на скорость и характер протекания коррозионных процессов. Также необходимо отметить негативное влияние коррозионно-активной среды в условиях отсутствия или нецелостности пассивных оксидно-гидроксидных пленок.

Particularities of gasmain steel stress-corrosion in acidulous electrolyte solutions were investigated. It is revealed that mechanical factor plays important role in nature and velocities of the corrosion processes passing. Also important to consider influence of the acid environments at steel without passive oxide film.

Тривала дія на метал трубопроводу поля напружень у ґрунтовому масиві викликає в ньому різні структурні процеси, релаксацію внутрішніх напружень та деформацію загалом [1]. Тому дослідження закономірностей зміни фізико-механічних властивостей матеріалу труб у процесі експлуатації дозволять точніше визначити ресурс конструкцій трубопроводів, тим більше, що в сучасних умовах підвищується актуальність збереження довготривалого потенціалу діючих магістральних трубопроводів [2].

Проведені нами обстеження підземних трубопроводів показали, що їх термін експлуатації, головним чином, залежить від корозійної стійкості основного металу та зварного з'єднання труб, а також характеру руйнування поверхні металу в місцях з порушенням ізоляційним покриттям.

У практиці будівництва питання взаємодії трубопроводів з ґрунтом вивчені недостатньо [3]. Тому чітких і апробованих рішень щодо вибору чи визначення основних характеристик для розрахунку та аналізу роботи підземних

трубопроводів немає. Розрахунок труб, що прокладаються в ґрунті, проводиться методами механіки підземних споруд [4]. Труба та оточуючий ґрунтовий масив розглядаються як елементи єдиної деформівної системи, яка сприймає зовнішні навантаження та впливи.

Урахування корозійної активності ґрунту, яку прийнято оцінювати часом до появи на новому трубопроводі першої каверни, складу і фізико-механічних властивостей ґрунтів та їх динаміки значно ускладнює розрахункову схему, оскільки з'являється багато додаткових, змінних у часі параметрів, що беруться не лише з довідників, але й визначаються експериментально. Перелік одних лише істотних чинників, які визначають корозійну активність ґрунтів, якими є структура та гранулометричний склад, вологість, склад ґрунтового електроліту, загальна кислотність чи лужність ґрунту, концентрація водневих йонів, повітропроникність, окисно-відновний потенціал, електричний опір ґрунтів, вказує на складність математичного моделювання деформівної системи „труба –

грунтового масив” і, відповідно, прогнозування довговічності підземного трубопроводу.

Вважається, що поведінка сталі трубопроводу в ґрунтах у багатьох відношеннях аналогічна її поведінці під час повного занурення в розчин з відповідним рН. При цьому переважає електрохімічний механізм корозії з утворенням мікрогальванічних елементів. Проте на підземному трубопроводі, за рахунок неоднорідності металу труби та гетерогенності ґрунту як за фізичними властивостями, так і за хімічним складом, а також різної аерації, виникають ділянки, на яких електродний потенціал помітно відрізняється, що зумовлює утворення макрогоальванічних корозійних елементів. Ділянки труби з більш негативним потенціалом стають анодними, а ділянки з менш негативним потенціалом – катодними.

Можна констатувати, що особливістю підземної корозії металу трубопроводу є прояв її у вигляді пітів та каверн. Тому головною небезпекою становить не корозійна втрата металу, а місцева корозія, яка є основною причиною аварій на трубопроводах.

Мета роботи – вивчення особливостей стрес-корозії матеріалу лінійної частини підземних трубопроводів у кислих ґрунтах.

Об'єктом досліджень вибрано електрозварні прямошовні труби зі сталі 17Г1СУ, які широко використовуються для будівництва підземних трубопроводів. Для дослідження деформаційної поведінки сталі трубопроводу та особливостей перебігу процесів стрес-корозії нами розроблено комп'ютеризовану установку КН-1 [5]. Використовували плоскі зразки, виготовлені за розробленою в ІФНТУНГ технологією [6] з матеріалу лінійної частини трубопроводу.

Для побудови номінальних діаграм деформації використовували безпосереднє ступінчасте навантаження (розвантаження) зразка (рис. 1), яке відповідає абсолютній податливості машини, коли зі зменшенням опірності зразка навантаження, що передається на нього не зменшується.

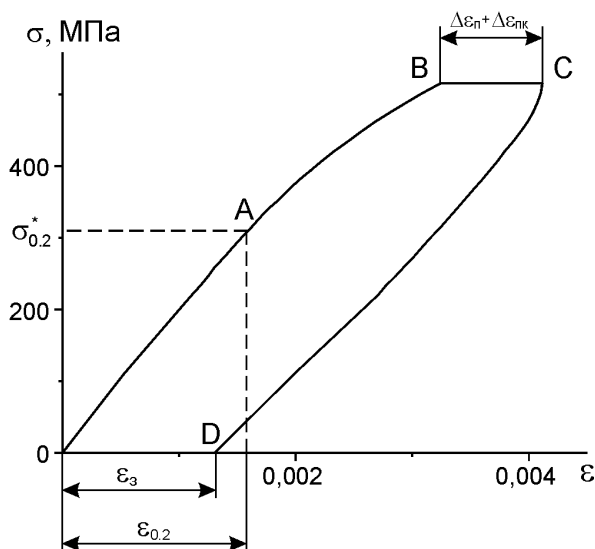


Рисунок 1 – Діаграма згину зразків-моделей

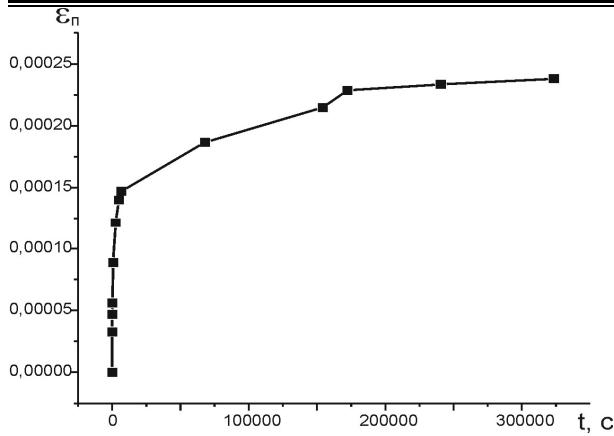
У разі збільшення чи зменшення навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину $\Delta\sigma = 20$ МПа за час $t_{н-р} = 1$ с. Час витримки на кожному ступені становив $t_b = 19$ с, а сумарний час $\Delta t = t_{н-р} + t_b = 20$ с. Такий режим навантаження дає змогу врахувати відставання деформації від напруження в часі і поглиблено вивчати процеси деформаційного зміцнення та повзучості.

Номінальні діаграми деформації для основного металу та зварного з'єднання труб складаються з таких характерних ділянок: OA – пружної деформації, AB – деформаційного зміцнення, BC – повзучості, CD – розвантаження. Відрізок OD відповідає залишковій деформації ϵ_3 , зафіксованій після ступінчастого розвантаження, величина $\Delta\epsilon_n + \Delta\epsilon_{nk}$ – суми деформацій повзучості на повітрі та в корозійному середовищі.

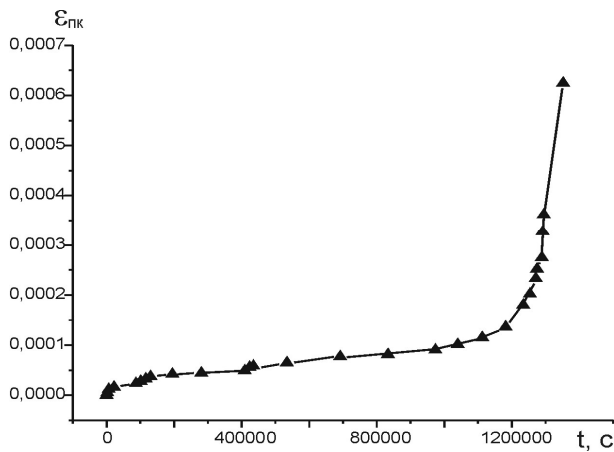
У процесі дослідження деформівної системи „труба – ґрунтовий масив” неможливо нехтувати корозійним чинником [7, 8]. Велика частина магістральних трубопроводів прокладена в зоні кислих і засолених ґрунтів, які володіють значною корозійною активністю. З метою вивчення корозійно-механічної поведінки сталі трубопроводу в таких експлуатаційних умовах нами проведено серію випробовувань зразків з матеріалу трубопроводу в кислому середовищі та рівні напружень $1,8 \sigma_{0,2}$, що становить 515 МПа.

Щоб коректно виявити вплив середовища, випробовування проводили в такій послідовності. Спочатку поміщали експериментальний зразок у знімну робочу камеру і, після досягнення ступінчастим навантаженням напруження $\sigma = 515$ МПа, реєстрували його повзучість на повітрі. Потім, на стадії усталеної повзучості, не зупиняючи експеримент, у робочу камеру заливали з визначеними інтервалами в часі розчину HCl концентрацією 0,0001M, 0,001M, 0,01M та 0,1M і продовжували випробовування. Це дозволило імітувати роботу трубопроводу в екстремальних умовах (просідання ґрунту, зсуви в гірській місцевості тощо із наступним пошкодженням захисного покриття) у діапазоні рН 1...4.

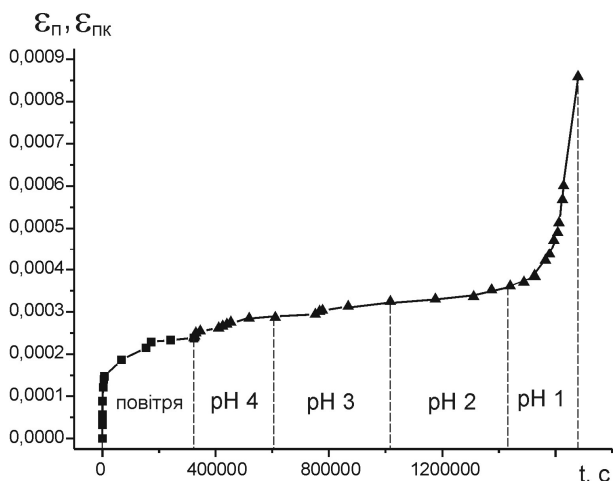
Дослідження показали значний вплив корозійного середовища на усталену повзучість сталі трубопроводу (рис. 2). Яскраво помітна зміна кінетики процесу зі зменшенням рН середовища. Якщо за рН 4 після первинного прискорення внаслідок дії ефекту Ребіндера, настає деяке затухання, пов'язане з пасивацією поверхні продуктами корозії, то із переходом до рН 3 бачимо зворотню картину. Спочатку швидкість повзучості залишається практично сталою, оскільки відбувається процес розчинення захисної окисно-гідроксидної плівки, після чого спостерігаємо монотонно зростаючу залежність. Можемо зробити висновок, що контакт кислих електролітів із чистим металом є одним із найбільш небезпечних корозійних чинників. Це підтверджує і кінетика повзучості за умови переходу до рН 2 та рН 1. Спостерігаємо вже не монотонне а екстремальне зростання із постійним збільшенням швидкості (рис. 2, в).



а



б



в

■ – повітря; ▲ – корозійне середовище
($\sigma = 515 \text{ МПа}$)

Рисунок 2 – Кінетика повзучості сталі трубопроводу на повітрі (а); після додавання розчину HCl (б) та об'єднана крива повзучості (в)

Про значний вплив механічного чинника на перебіг корозійних процесів свідчить вигляд корозійних уражень (рис. 3).

У зоні стиску ми спостерігаємо переважно рівномірну корозію. Місцевою корозією уражена незначна частина площі зразка (табл. 1), більшість пітів і виразок неглибокі (рис. 3, а).

Основні пошкодження припадають на центральну частину, причому домінують не округлі піти, а короткі виразки вздовж осі зразка. Частка глибоких уражень складає трохи більше 12%, а їх площа не перевищує 2,3% загальної.

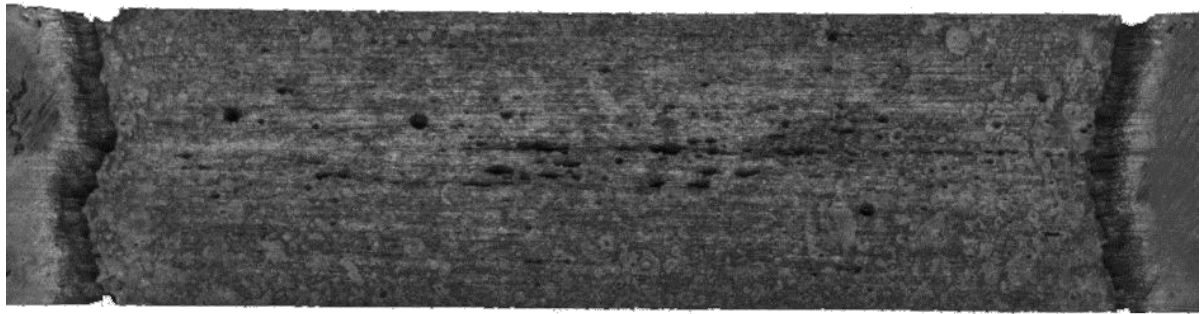
Натомість у зоні розтягу спостерігаємо яскраво виражену місцеву корозію з численними глибокими (0,4-0,5 мм) пітами, частка яких у загальній кількості складає близько 40%. Вони розташовані практично по всій поверхні і займають майже 10% її площі. Форма уражень округла або близька до такої. Швидкість корозії в уражених місцях у 53,4 разів більша за середню для даного зразка. Така значна різниця зумовлена тим, що розчинні продукти корозії не пасивують матеріал трубопроводу, а отже і не сприяють процесу затягування пітів. При цьому їх поглиблення додатково прискорюється дією концентраційних мікрогальванічних елементів „середовище на дні піта – зовнішнє середовище”.

Окремої уваги заслуговує інший прояв місцевої корозії – корозія на межі розділу фаз „занурений метал – незанурений метал”. Як показали дослідження, взаємодія компонентів даної системи помітно активує корозійні процеси, і, незалежно від знаку деформації, призводить до утворення глибоких виразок (рис. 3). Оскільки під час пошкодження зовнішньої ізоляції підземного трубопроводу одразу утворюється згадана вище межа розділу фаз, така ситуація є найближчою до експлуатаційної, а даний вид корозії – надзвичайно небезпечним, і, на нашу думку, найчастіше закінчується наскрізними ураженнями та, відповідно, розгерметизацією трубопроводу.

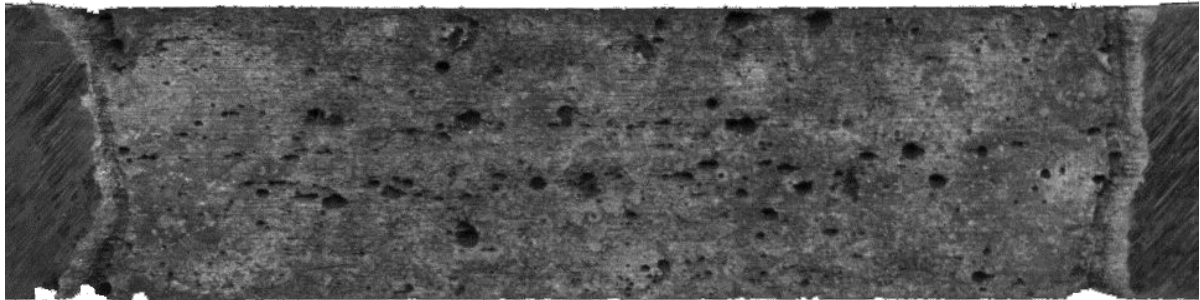
У процесі випробовувань виявлено також інший цікавий аспект корозійно-механічної поведінки матеріалу трубопроводу. Раніше було показано [5], що зі зменшенням рН характер корозії змінюється з локального на суцільний. Дослідження тоді проводили з окремими партіями зразків для кожного вибраного рН. У нашому досліді ми застосували метод поступового зменшення рН електроліту. Результати свідчать, що у такому випадку навіть за рН 1...2 локалізація корозійних уражень є досить значною (рис. 3). На основі одержаних даних можна припустити, що така зміна поведінки матеріалу газопроводу зумовлена саме поступовою зміною рН, внаслідок якої на початковому етапі (рН 4) зароджуються локальні корозійні ураження, а за подальшого його зменшення вступають у дію гальванічні елементи другого роду, через що термодинамічно найбільш вигідним стає процес поглиблення пітів та каверн. Така гіпотеза добре узгоджується із виглядом та глибиною корозійних уражень (рис. 3), однак для її підтвердження потрібно провести серію додаткових досліджень.

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- електрохімічна корозія у кислих середовищах, підсилена механічним чинником, особливо небезпечна для підземних трубопроводів і є однією з основних причин їх розгерметизації та виходу з ладу;



а)



б)

Рисунок 3 – Корозійні ураження в зоні стиску (а) та розтягу (б)

Таблиця 1 – Характеристики корозійного руйнування матеріалу підземних трубопроводів

Напружено-деформований стан	Загальна кількість уражень	Кількість глибоких уражень	Відсоток площі зразка, ураженої місцевою корозією, %
Стиск	98	12	2,3
Розтяг	168	64	9,7

- в умовах відсутності або нецільності пасивних окисно-гідроксидних плівок негативний вплив корозійно-активного середовища значно посилюється;

- на відміну від лабораторних випробувань, де катодна та анодна частини розміщені практично поряд, на практиці відстань між ними може становити сотні метрів, що значно ускладнює процеси перенесення йонів OH^- від катоду до аноду, а отже й пасивацію останнього, знижуючи $\text{pH}_{\text{пас}}$ до 5-5,5;

- характер перебігу корозійних процесів залежить не лише від величини pH , але й кінетики її зміни, що потребує подальших досліджень.

Література

1. Бородавкін П.П., Синюков А.М. Прочність магістральних трубопроводів. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
2. Ковалко М.П. Методи та засоби підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу. – К.: УЕЗ, 2001. – 288 с.
3. Бородавкін П.П. Механіка ґрунтів в трубопроводном строительстве. – М.: Недра, 1976. – 219 с.
4. Зарипов Р.М., Чичелов В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода, деформирующегося совместно с упруго-пластическим ґрунтом // Науч.-техн. сб. Сер.: Трансп. и подзем. хранение газа. ОАО „Газпром” – 2002. – № 3. – С. 3-19.
5. Гончарук М.І., Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Корозійно-механічна поведінка металу трубопроводу // Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу. – 2003. – № 1(5). – С. 54-59.
6. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Перспективи використання автоматизованих випробувальних систем з ЕОМ для оцінки корозійно-механічних властивостей матеріалів морських трубопроводів // Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды КГПУ. Вып. 1/2001 (10). – Кременчуг: КГПУ, 2001. – С. 21-23.
7. Логан Х.Л. Коррозия металлов под напряжением / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1970. – 340 с.

8. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. –
М.: Металлургия, 1985. – 88 с.