

**В.В. Ніколаєв**  
ІФНТУНГ

## Корозійно-механічні випробування трубної сталі для прогнозування ресурсу нафтопроводів

УДК 621.438:622

*У роботі приведено результати експериментальних досліджень корозійних і механічно-корозійних характеристик трубних сталей магістральних нафтопроводів у модельних агресивних середовищах, побудовано графічні залежності для аналізу корозійно-механічних процесів.*

*В работе приведены результаты экспериментальных исследований коррозионных и механически коррозионных характеристик трубных сталей магистральных нефтепроводов в модельных агрессивных средах, построены графические зависимости для анализа коррозионно-механических процессов.*

*The paper shows the results of experimental studies of corrosion and mechanical and corrosion characteristics of pipe steels of the pipelines in corrosive medium models, graphic dependences are constructed for the analysis of corrosion and mechanical processes.*

Під час аварій на нафтопроводах у навколишнє середовище потрапляє трьохфазна система, газова фаза якої забруднює повітряний басейн, а рідка і тверда фази – ґрунт, формуючи ареали забруднень, тому для трубопроводів, які експлуатуються 15–20 і більше років, вивчення характеристик корозійно-механічних процесів тіла труби є актуальною науковою задачею.

Об'єктом досліджень вибрано безшовні труби з товщиною стінки 15 мм, які використовують для будівництва трубопроводів.

Для дослідження корозійних процесів під напруженням нами використано розроблену комп'ютеризовану установку КН-1, створену на базі установки МВ-1К [1].

Випробовування зразків із матеріалу трубопроводів на повітрі та в рідких робочих середовищах проводили в режимі статичного навантаження чистим згином із автоматичною реєстрацією прогину зразка та зміни електродного потенціалу за допомогою ЕОМ, використовуючи 24-бітне аналого-цифрове перетворення кількості значень.

Використовували плоскі зразки з матеріалу різних ділянок лінійної частини трубопроводу. Така технологія забезпечує високу точність та задану шорсткість робочих поверхонь під час використання механообробки із запрограмованою зміною подачі.

У процесі статичного навантаження та повзучості постійно реєструється параметр, за яким можна визначити стрілу прогину зразка  $\delta$ . Параметри  $\delta$ , довжина робочої частини  $l_p$  та мінімальний радіус кривизни зразка  $\rho_{\min}$  зв'язані співвідношенням

$$\rho_{\min} = \frac{l_p^2}{8\delta} + \frac{\delta}{2}$$

Відносну деформацію крайнього волокна визначали за формулою

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{2\rho_{\min}}{b} + 1},$$

де  $b$  – товщина зразка.

Для прогнозування корозійної поведінки трубопроводів необхідний комплексний аналіз внутрішніх і зовнішніх факторів, що характеризують швидкість корозії матеріалу труб в експлуатаційному середовищі.

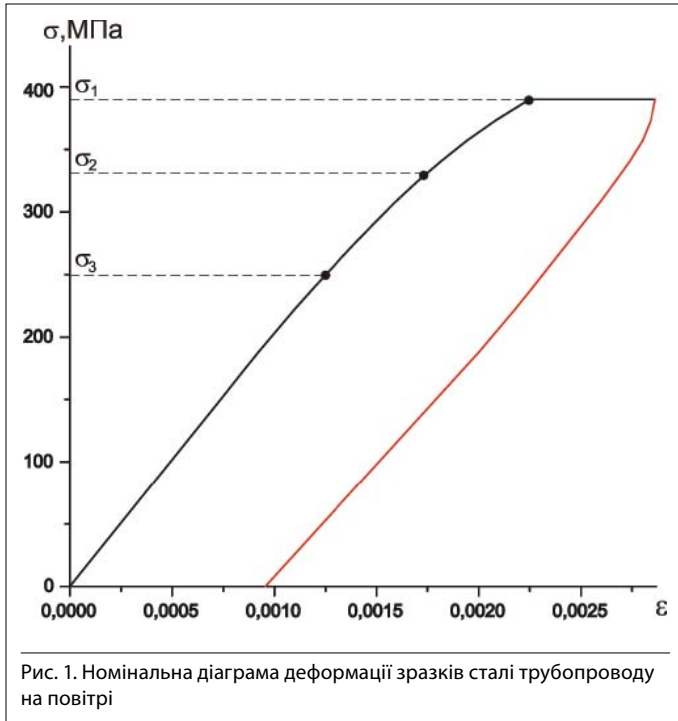
Основним показником швидкості корозійного руйнування (як у разі часткової, так і рівномірної корозії) є глибина проникнення. В обох випадках глибину корозійного руйнування незалежно від виду металу чи сплаву вимірюють у міліметрах за рік.

Швидкість корозії визначають за формулою

$$V_{\text{ВМ}} = \frac{n(m_1 - m_0)}{St} \text{ кг/м}^2 \text{ рік},$$

де  $m_0$  – початкова маса зразка, кг;  $m_1$  – маса зразка з продуктами корозії, кг;  $S$  – площа зразка, м<sup>2</sup>;  $t$  – час дослідження, роки;  $n$  – коефіцієнт, який залежить від складу продуктів корозії.

Попередня підготовка експериментальних зразків включає в себе їх механічне очищення за допомогою дрібнодисперсного абразиву, знежирення органічним розчинником (ацетон, толуол чи бензол) та зважування на аналітичних вагах. Зразки поміщають у склянки з розчинами, які моделюють агресивне середовище. Після закінчення дослідження зразки виймають із розчинів, швидко вимірюють розміри поверхні, що була занурена в агресивне середовище, вологою гумкою знімають із їх поверхні нерозчинні



продукти корозії. Після промивання дистильованою водою та ретельного висушування фільтрувальним папером зразки знову зважують на аналітичних вагах.

Під час вимірювання потенціалів використовували хлорсрібний електрод порівняння.

Із метою найточнішого моделювання стрес-корозійних процесів нами проведено аналіз пластових вод та піддонної води на різних стадіях транспортування сирої нафти. На його основі вибрано 3 модельні середовища, які відповідають пластовій воді свердловини, піддонній – на стадії транспортування і відбору на насосній станції [2].

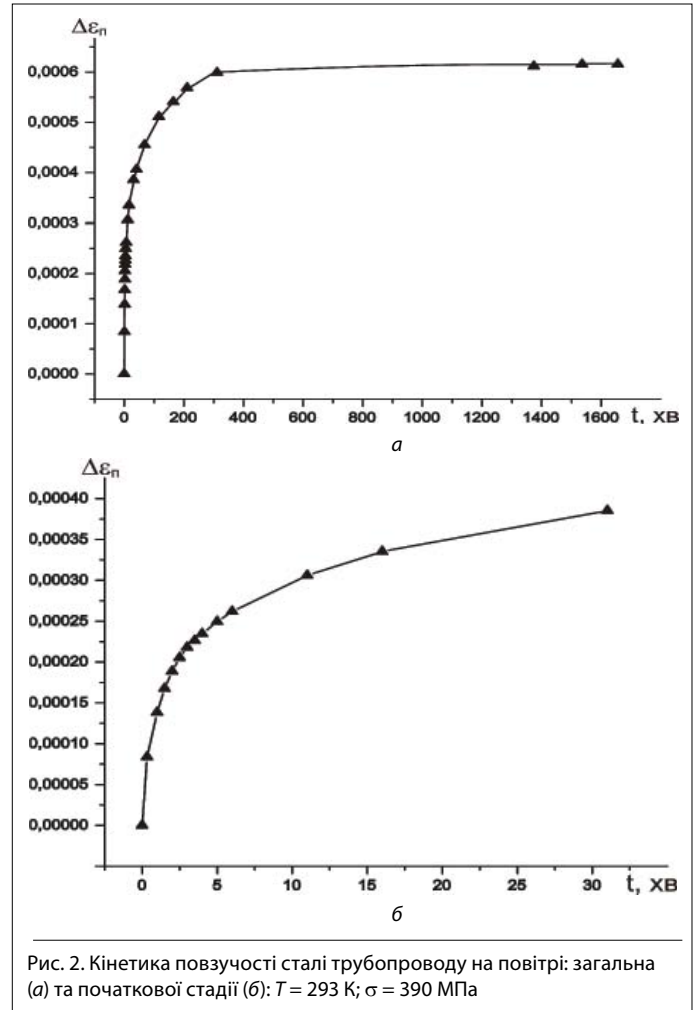
Таблиця

Склад модельних середовищ (МС)

| Модельне середовище | Походження проби | pH  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> |
|---------------------|------------------|-----|-------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 1                   | відбір на НС     | 6,2 | 2,8                           | 4,8                          | 4,0             |
| 2                   | пластова вода    | 6,0 | 3,6                           | 7,6                          | 5,1             |
| 3                   | піддонна вода    | 6,1 | 7,5                           | 5,3                          | 5,1             |

Тривала дія на метал трубопроводу навантажень та впливів у ґрунтовому масиві викликає різноманітні структурні зміни, у тому числі деформацію та релаксацію напружень. Тому вивчення закономірностей зміни фізико-механічних властивостей матеріалу трубопроводу в процесі тривалої експлуатації дасть змогу точніше прогнозувати залишковий ресурс роботи наявних трубопроводів. У сучасних умовах, коли значна частина трубопроводів експлуатується 15–20 років і близька, за попередніми даними, до вичерпання свого ресурсу роботи, вивчення їх корозійно-механічної поведінки є актуальною науковою задачею.

Для побудови номінальних діаграм деформації використовували безпосереднє ступінчасте навантаження



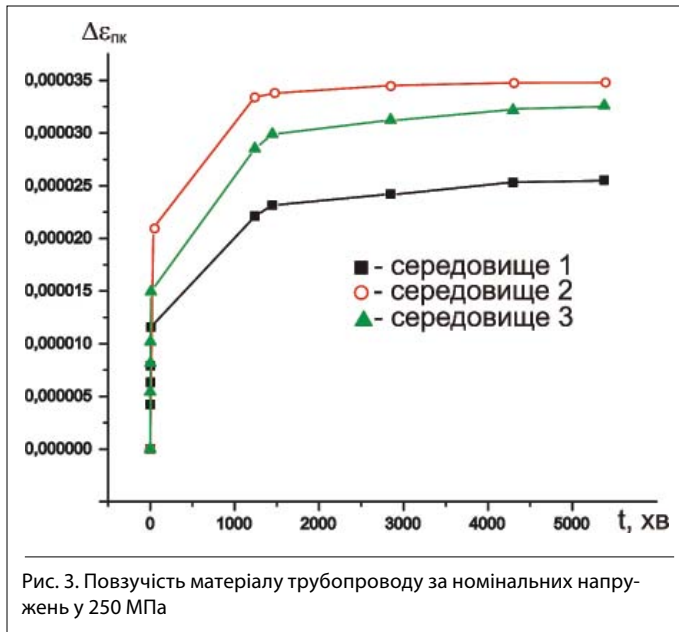
(розвантаження) зразка (рис. 1) чистим згином, коли зі зменшенням опірності зразка навантаження, що передається на нього, не зменшується.

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

Експериментальні дослідження явища повзучості, результати яких останнім часом усе частіше використовують в інженерних розрахунках та для оптимізації конструкцій трубопроводів, проводять переважно під час розтягу.

Повзучість часто розглядають як повільну текучість металу. Як відомо, в основі теорії пластичного течіння лежить уявлення про поверхню текучості. У процесі статичного згину відбувається закономірне переміщення поверхні текучості, тобто її еволюція.

Характерні криві повзучості в координатах приріст повзучості  $\Delta\varepsilon_n$ –час  $t$  зображено на рис. 2–4. Тривалість випробувань на повітрі визначали характер та кінетика процесу у кожному окремому випадку, що дало змогу



за відносно короткий час провести серію експериментів та обчислити параметри області низькотемпературної повзучості.

Загальний приріст деформації  $\Delta \varepsilon$  за час  $t$  для цього діапазону напружень можна визначити за формулою

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{\text{пр}} + \Delta \varepsilon_{\text{пл}} + \Delta \varepsilon_{\text{п}}$$

де  $\Delta \varepsilon_{\text{пр}}$  та  $\Delta \varepsilon_{\text{пл}}$  – відповідно прирости пружної та пластичної деформацій під час досягнення заданого рівня напружень,  $\Delta \varepsilon_{\text{п}}$  – приріст повзучості.

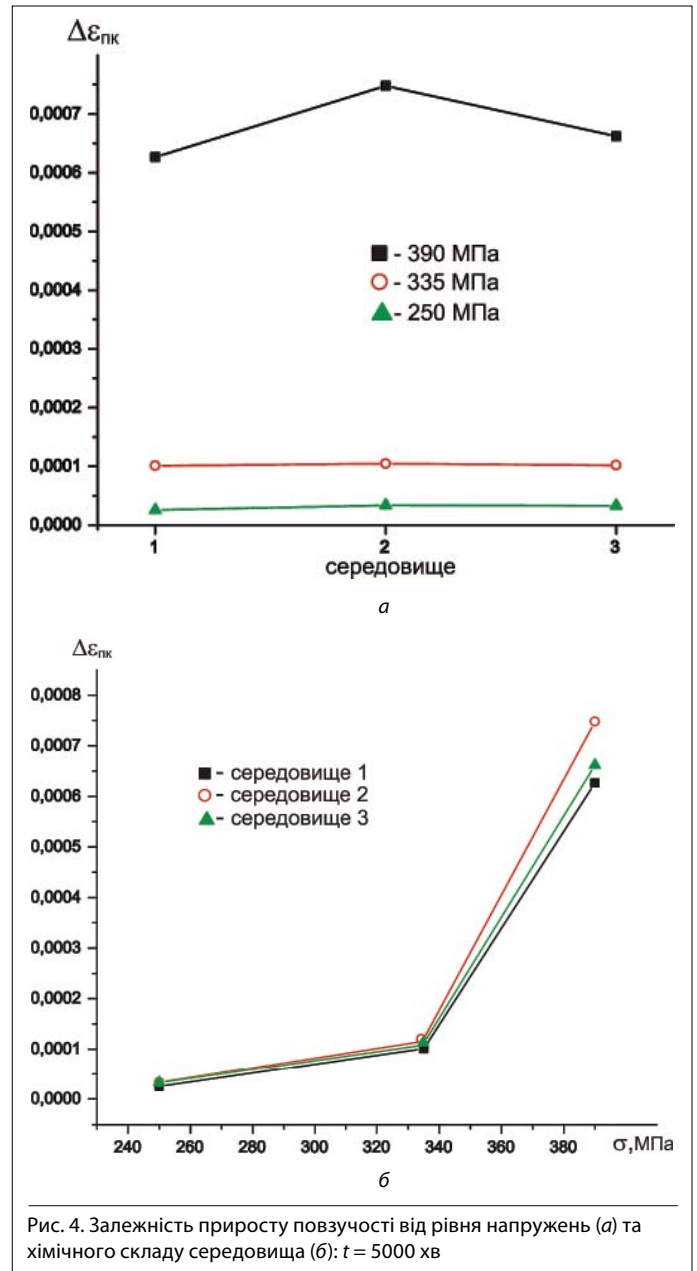
Установлено, що повзучість основного металу у корозійно-активному середовищі, як і на повітрі, носить стадійний характер. Вплив середовища відчутний на стадіях як неусталеної, так і усталеної повзучості. Як показали дослідження, сталь трубопроводу найбільшу схильність до низькотемпературної корозійної повзучості проявляє у МС2, найменшу – у МС3.

Тривалість першої стадії більше залежить від величини номінальних напружень та менше – від хімічного складу середовища. Вивчення залежностей приросту корозійної повзучості від величини номінальних напружень та хімічного складу середовища дає змогу зробити висновок, що найбільший їх синергійний вплив спостерігається у МС2, найменший – у МС1.

Для кращого вивчення хімізму процесу внутрішньої стрес-корозії сталі трубопроводу та визначення найбільш небезпечного з хімічної точки зору експлуатаційного середовища досліджено кінетику електродного потенціалу. Відомо, що чим нижчий потенціал металу та швидший процес розблагородження, тим більша ймовірність перебігу корозійних процесів і відповідно небезпека виникнення корозійних уражень.

Як видно з графіків, тут теж проявляється синергічна дія корозійно-активного середовища та прикладених механічних напружень.

Тепер вивчимо вплив на процес розблагородження механічного чинника. Порівняємо кінетику електродного



потенціалу при  $\sigma = 1,6 \sigma_{0,2}$ ,  $1,35 \sigma_{0,2}$  та  $1,05 \sigma_{0,2}$ . Результати досліджень свідчать, що зі зменшенням рівня номінальних напружень швидкість процесу розблагородження у МС2 практично незмінна, тоді як у МС3 та особливо в МС1 вона відчутно зменшується.

Отже, МС2 є найбільш небезпечним з хімічної точки зору середовищем, оскільки процес розблагородження у ньому контролюється корозійним чинником. Це значить, що навіть за умови мінімального рівня механічних напружень корозія буде проходити досить інтенсивно. У МС1 спостерігаємо змішаний контроль із акцентом на механічному чиннику. З хімічної точки зору це, умовно кажучи, найбезпечніше з наших середовищ. У МС3 ситуація практично аналогічна, але саме розблагородження менш

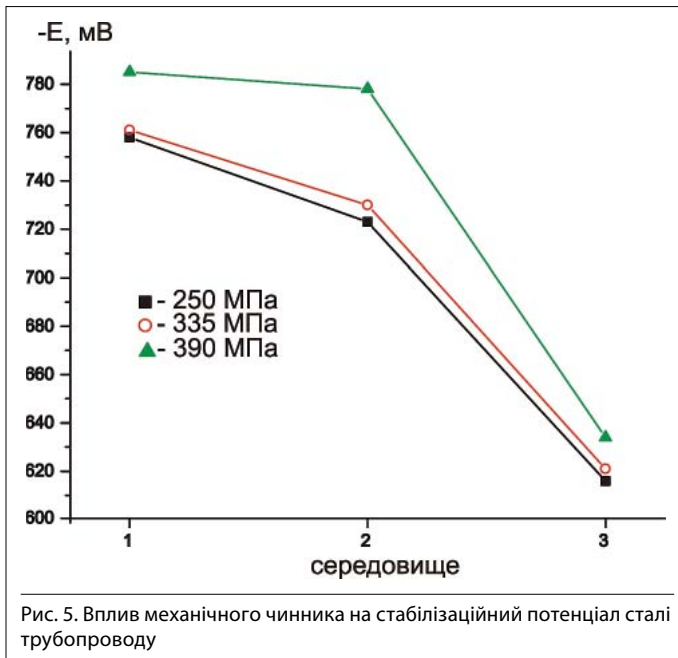


Рис. 5. Вплив механічного чинника на стабілізаційний потенціал сталі трубопроводу

інтенсивне. За корозійною активністю воно займає проміжне місце.

Залежність стабілізаційного потенціалу сталі трубопроводу від її напружено-деформованого стану ілюструє рис. 5.

Як бачимо, він є досить відчутним, особливо в МС1 та МС2.

Як ми і прогнозували, виходячи із кінетики потенціалу, найбільша швидкість корозії спостерігається у МС2, найменша – у МС1. Низька швидкість корозії у останньому випадку підтверджує наше припущення, що швидке зменшення електродного потенціалу у МС1, головним чином, пов'язане із процесами пластичного течіння у сталі трубопроводу, яке неминуче супроводжується утворенням ювенільних поверхонь та субмікротріщин, свіжоутворена поверхня яких має набагато нижчий потенціал, а також найбільшим відносним вмістом хлорид-іонів, які перешкоджають її швидкій пасивації.

Щодо зменшення товщини стінки трубопроводу, то тут бачимо, що навіть за мінімального рівня напружень воно може сягати від 0,125 до 1,25 мм/рік залежно від хімічного складу середовища та рівня номінальних напружень (рис. 6).

Установлено, що зі збільшенням величини номінальних напружень від  $1,05 \sigma_{0,2}$  до  $1,6 \sigma_{0,2}$  збільшення загальної швидкості корозії у модельних середовищах може сягати 25 %.

Отже, під час розрахунку залишкового ресурсу наявних трубопроводів та проектування нових ні в якому разі не можна нехтувати механічним чинником. Необхідно також урахувати постійний інтенсивний рух корозійного середовища, при якому:

відбувається постійне змивання нерозчинних продуктів корозії, тобто погіршується пасивація поверхні;

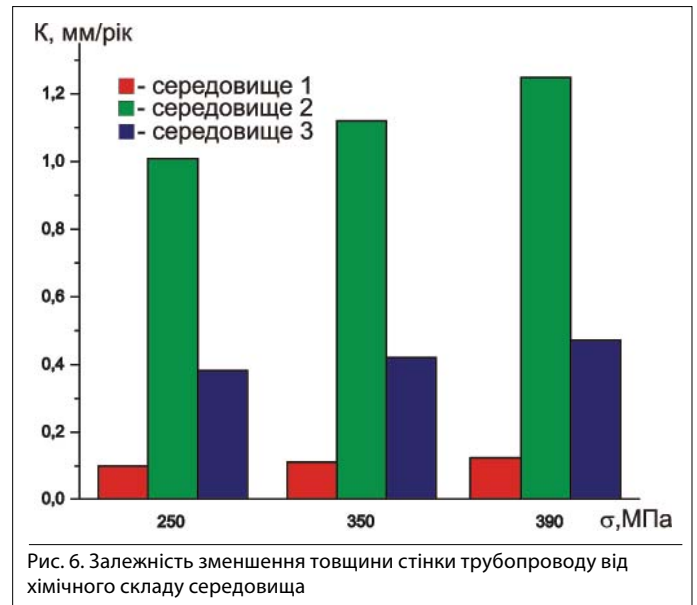


Рис. 6. Залежність зменшення товщини стінки трубопроводу від хімічного складу середовища

проявляється схильність до локалізації корозійних процесів через те, що початково уражене місце не може пасивуватися, а тому постійно має менший потенціал від сусідніх неуразених ділянок;

утворюється гальванічний елемент, у якому уражена ділянка стає анодом, а неуразена – катодом;

швидкість локальної корозії може в 2–8 разів перевищувати швидкість загальної.

Ураховуючи, що за несприятливих умов, якими не можна нехтувати, механічний чинник та чинник руху середовища будуть взаємно підсилювати корозійні процеси, не важко підрахувати, що швидкість локальної корозії і, відповідно, величина зменшення товщини стінки можуть збільшитися в 2,5–10 разів.

#### Список літератури

- Крижанівський Є.І.** Удосконалена автоматизована випробувальна система з ЕОМ для дослідження корозійно-механічного руйнування/ Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний, В.А. Ровінський // Вісн. Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 1 (12). – С. 292–294.
- Капцов І.І.** Аналіз загрязнений магістральних газопроводів / І.І. Капцов, Б.Н. Гончаров // Газовая промышленность. – 1979. – № 8. – С. 89–90.

#### Автор статті



#### Ніколаєв Віталій Вікторович

Аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Основний напрям наукових досліджень: вивчення процесів, які проходять з металами труб на трубопроводах під час їх тривалої експлуатації; розроблення та впровадження методів ремонту магістральних трубопроводів без зупинки перекачування продукту споживачу.