

РАНЖУВАННЯ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ ҐРУНТІВ ЗА НЕБЕЗПЕКОЮ РОЗВИТКУ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

А.І. Станецький, А.В. Грицанчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727141,
e-mail: lubomyrproberezhny@gmail.com

Дослідження деформаційної поведінки матеріалу трубопроводу в умовах навантажень та впливів, які імітують експлуатаційні умови, дають змогу краще оцінити залишковий ресурс безпечної експлуатації діючих та ресурс роботи нових трубопроводів, коректніше прогнозувати експлуатаційні ризики та оцінити рівень потенційних загроз довіллю, спричинених експлуатацією даних технічних об'єктів. Об'єктом наших досліджень вибрано магістральні газопроводи великого діаметру, виготовлені зі сталі 17ГС та 19Г, які експлуатувалися 41 рік. Проведено ранжування ґрунтових електролітів за характеристичними показниками та встановлено найнебезпечніші з них для деградованих трубопровідних сталей у кожній із груп. В подальшому необхідно накопичувати експериментальний матеріал з метою збільшення кількості характеристичних показників та побудови комплексної багатопараметричної системи корозійного моніторингу трубопроводів.

Ключові слова: деформаційна поведінка, ресурс безпечної експлуатації, корозійний моніторинг, деградація трубних сталей.

Исследование деформационного поведения материала трубопровода в условиях нагрузок и воздействий, которые имитируют эксплуатационные условия, позволит лучше оценить остаточный ресурс безопасной эксплуатации действующих и ресурс работы новых трубопроводов, корректно прогнозировать эксплуатационные риски и оценить уровень потенциальных угроз для окружающей среды, вызванных их эксплуатацией. Объектом наших исследований послужили магистральные газопроводы большого диаметра, изготовленные из стали 17ГС и 19Г, которые были в эксплуатации 41 год. Проведена ранжировка ґрунтовых электролитов по характеристическим показателям и установлены наиболее опасные из них для деградированных трубопроводных сталей в каждой из групп. В дальнейшем необходимо накапливать экспериментальный материал с целью увеличения количества характеристических показателей и построения комплексной многомерной системы коррозионного мониторинга трубопроводов.

Ключевые слова: деформационное поведение, ресурс безопасной эксплуатации, коррозионный мониторинг, деградация трубных сталей.

The deformation behavior of the pipeline material under conditions of loads and influences simulating the operation will allow to better estimate the residual life of the safe operation of the existing ones and the life of the new pipelines, to better predict the operational risks and to estimate the level of potential environmental threats caused by their operation. The object of our study is main gas pipelines of large diameter made of steel 17HS and 19H, which had been in operation for 41 years. The ranking of soil electrolytes according to their characteristic parameters has been conducted, and the most dangerous ones for pipe steel degradation in each of the groups have been established. It is necessary further to accumulate experimental material in order to increase the number of characteristic indicators and construct an integrated multi-parameter system of pipelines corrosion monitoring.

Key words: deformation behavior, safe operation life, corrosion monitoring, pipe steel degradation.

Вступ. Причинами виникнення аварійних ситуацій є, як правило, відмови внаслідок помилок в проектуванні, порушенні технології виготовлення, умов та режимів експлуатації, а також природні явища на зразок землетрусів, зсувів ґрунту тощо. Слід також виокремити невідповідність ряду базових розрахункових критеріїв реальним характеристикам матеріалу трубопроводу. При цьому реальні механічні характеристики на 10...25 % нижчі за наведені в довідниках для використання в розрахунках, внаслідок впливу текстури та механообробки. Стандартні випробовування на розтяг недостатні для визначення низки важливих розрахункових характеристик, оскільки поведінка матеріалу при неоднорідному напруженому стані (згин, згин + розтяг) істотно відрізняється від такої при розтягу. Характеристики, одержані при випробовуванні елементів конструкції в умовах, наближених до експлуатаційних, мо-

жуть відрізнятися на 20...100 % і більше від наведених в довідковій літературі при використанні стандартних зразків, внаслідок того, що в більшості випадків довговічність та несучу здатність матеріалу конструкції контролює не стільки навантаження, скільки фізико-хімічний вплив робочого середовища. Однією з найважливіших причин також є деградація властивостей матеріалу, граничні рівні накопичення пошкоджень, утворення та спонтанне поширення тріщин. Також негативний вплив чинить так зване уповільнене руйнування – накопичення пошкоджень та дефектів при статичному та квазістатичному навантаженні нижче границі плинності. Беручи до уваги вищесказане, можна зробити висновок, що правильний розрахунок металоконструкцій, а також прогнозування ресурсу їх роботи, неможливі без комплексних випробовувань матеріалу, який використовується безпосередньо при їх виготовленні.

Дослідження деформаційної поведінки матеріалу трубопроводу в умовах навантажень та впливів, які імітують експлуатаційні, дасть змогу краще оцінити залишковий ресурс безпечної експлуатації діючих, та ресурс роботи нових трубопроводів, коректніше прогнозувати експлуатаційні ризики та оцінити рівень потенційних загроз довкіллю, спричинених експлуатацією даних технічних об'єктів. Важливо вивчити кінетику деформації у корозійних середовищах, оскільки рівень пошкоджень у результаті синергічної дії механічного та корозійного чинників зростає нелінійно, відповідно так само збільшуються імовірності розгерметизації чи руйнування трубопроводу, а, отже, й пов'язані з цим експлуатаційні ризики.

Раніше проведено дослідження деформаційної поведінки неексплуатованої сталі трубопроводу 17ГС на повітрі та у 12 модельних середовищах, які імітують основні типи ґрунтових електродитів [16-19]. На пізній стадії експлуатації нафтогазопроводів (НГП) особливо актуальною науково-технічною проблемою стає належне забезпечення технічної надійності та безпечної експлуатації трубопроводів із застосуванням методів технічного діагностування, особливо, корозійних дефектів, а також розроблення ефективних методів оцінки працездатності експлуатованого матеріалу. В розв'язанні таких завдань важливу роль відіграє визначення величини зміни фізико-механічних і електрорімічних властивостей трубопровідних сталей, оскільки для обґрунтування подальшої безпечної роботи НГП необхідно враховувати вже не вихідні, а поточні характеристики експлуатованого металу. За сумісного тривалого впливу робочого середовища та механічних навантажень у матеріалі трубопроводів утворюються мікротріщини, які з часом зливаються і формують макротріщину. Слід відзначити особливу роль водню в процесах руйнування сталей нафто- і газопроводів.

Однак, вказані дослідження стосуються передусім останньої стадії руйнування – поширення та розвитку тріщин та тріщиноподібних дефектів. В той же час, проблема оцінки зміни величини деформації трубопровідних сталей під тривалим впливом експлуатаційних середовищ вивчена недостатньо.

Мета досліджень. Оцінка та прогнозування впливу терміну експлуатації та тривалої дії ґрунтових електродитів на деформаційну поведінку трубних сталей.

Матеріали і методики. Об'єктом наших досліджень були вибрані магістральні газопроводи великого діаметру виготовлені зі сталі 17ГС та 19Г, які були в експлуатації 41 рік. Саме такий матеріал труб широко використовувався при спорудженні магістральних трубопроводів в 70-х роках минулого сторіччя та експлуатуються по даний час.

Для проведення досліджень УМГ “Київтрансгаз” були надані фрагменти, вирізані з

нижньої частини труб з ділянок магістральних газопроводів:

Єфремівка-Диканька-Київ, діаметр 1020 мм, сталь 17ГС, роки експлуатації – 1967-2008;
Шебелинка-Полтава-Київ, діаметр 720 мм, сталь 19Г, роки експлуатації – 1963-2004.

Фрагменти труб в стані поставки були надані з аварійного резерву.

Для дослідження впливу тривалої експлуатації на деформаційну поведінку було виготовлено партію плоских зразків з кожної сталі, за розробленою в ІФНТУНГ технологією [11,12,14,15].

Для дослідження корозійних процесів під напруженням використовували розроблену раніше комп'ютеризовану установку КН-1 [14], створену на базі установки МВ-1К [15]. Випробовування зразків з матеріалу труб газопроводів на повітрі та в рідких робочих середовищах проводили в режимі статичного та повторно-статичного навантаження чистим згином з автоматичною реєстрацією прогину зразка та зміни електродного потенціалу за допомогою ЕОМ, використовуючи 24-бітне аналогоцифрове перетворення.

Базуючись на аналізі водних витяжок ґрунту вздовж трас трубопроводів вибрано модельні середовища для проведення корозійних випробувань (табл. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад модельних середовищ для корозійних випробувань

№ МС	Концентрація, моль/л	
	NaCl	Na ₂ SO ₄
1	0,01	-
2	0,05	-
3	0,1	-
4	0,005	0,005
5	0,025	0,025
6	0,05	0,05

Результати досліджень. На повітрі спостерігаємо зростаючу кінетику (рис. 1) із затуханням процесу на останній стадії та виходом на стабільну ділянку як для матеріалу в стані поставки, так і для експлуатованого. Приріст деформації знаходиться в межах 15...20 %. Такі тенденції не становлять небезпеки, з чого можна зробити висновок, що несуча здатність трубопроводу, який в процесі 40 років експлуатації не піддавався дії корозивного середовища зміниться незначно. Однак на практиці, беручи до уваги недосконалість протикорозійних покриттів, які використовувалися при будівництві магістральних трубопроводів наприкінці 60-х та в 70-х роках минулого століття, така ситуація є скоріше гіпотетичною. Випробовування на повітрі мало на меті стати, головним чином, відповідною точкою для виокремлення впливу корозивного середовища на кінетику деформації сталі трубопроводу на пізній стадії експлуатації [2-4, 16-19].

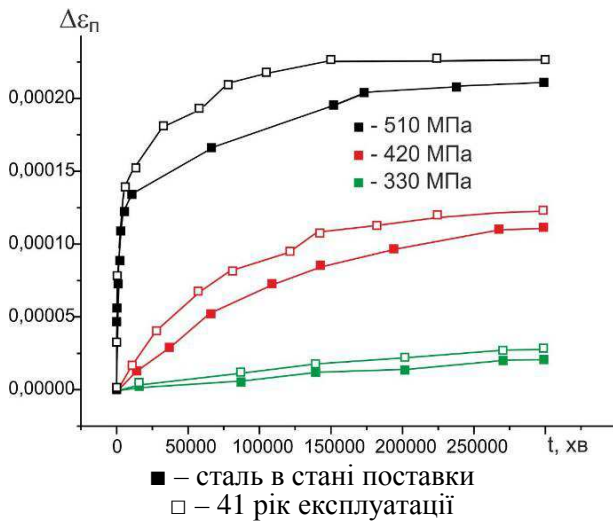


Рисунок 1 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу на повітрі

Зі збільшенням величини напружень процеси деформування проходять з більшою швидкістю. При найвищих рівнях напружень на кривій деформації спостерігаються циклічні прискорення. Причому характерно, що для деградованого матеріалу вони різкіші і починають появлятися при нижчих рівнях напружень. Така поведінка тривало експлуатованої сталі трубопроводу може бути пояснена розвитком мікротріщин та внутрішніх структурних дефектів, наслідком якого є прискорене деформування.

Оскільки в тривало експлуатованому матеріалі трубопроводу значно вищий інтегральний показник кількості пошкоджень, в тому числі і мікротріщин в зародковому стані, то величина прикладених напружень, необхідна для їх розвитку буде нижчою. Подібна поведінка тривало експлуатованих трубних сталей описана також у роботах [20, 21].

Окремо слід урахувати і структурну деградацію металу, утворення мікропорожнин та ймовірне наводнювання в результаті тривалої дії експлуатаційних середовищ. Сукупність цих чинників і призводить до зменшення здатності чинити опір деформаціям, а погіршення в процесі тривалої експлуатації характеристик тріщиностійкості несе в собі загрозу підвищеної чутливості до дії корозивних середовищ та розвитку процесів корозійного розтріскування.

Постає питання прогнозування розвитку виявлених деформаційних процесів під час довготривалої експлуатації трубопроводів. Одним із параметрів тут може слугувати кут нахилу завершальної ділянки деформаційної кривої. За його показником можна судити про рівень затухання процесу. Низькі показники відповідатимуть незначній небезпеці розвитку процесу, високі ж свідчатимуть про досить значні ризики виникнення позаштатних ситуацій.

Даний показник може бути використаний не тільки для випробовувань на повітрі, але і для корозійно-механічних досліджень. У цьому випадку даний показник додатково слугуватиме маркером чутливості матеріалу трубопроводу до тривалої дії експлуатаційного середовища.

Хлоридні електроліти. Характер розвитку деформаційних процесів у МС1-МС3 порівняно із повітрям значно не змінюється. Фіксуємо зростання приростів деформації із збільшенням рівня прикладених напружень. На відміну від повітря, у досліджуваних середовищах не спостерігається циклічних прискорень-сповільнень деформування, що може бути пояснено дією ефекту Ребіндера (рис. 2-4) для обох досліджуваних сталей.

Кути нахилу завершальних ділянок зростають, що свідчить про більшу прогнозовану тривалість розвитку деформаційних процесів в умовах впливу експлуатаційного середовища.

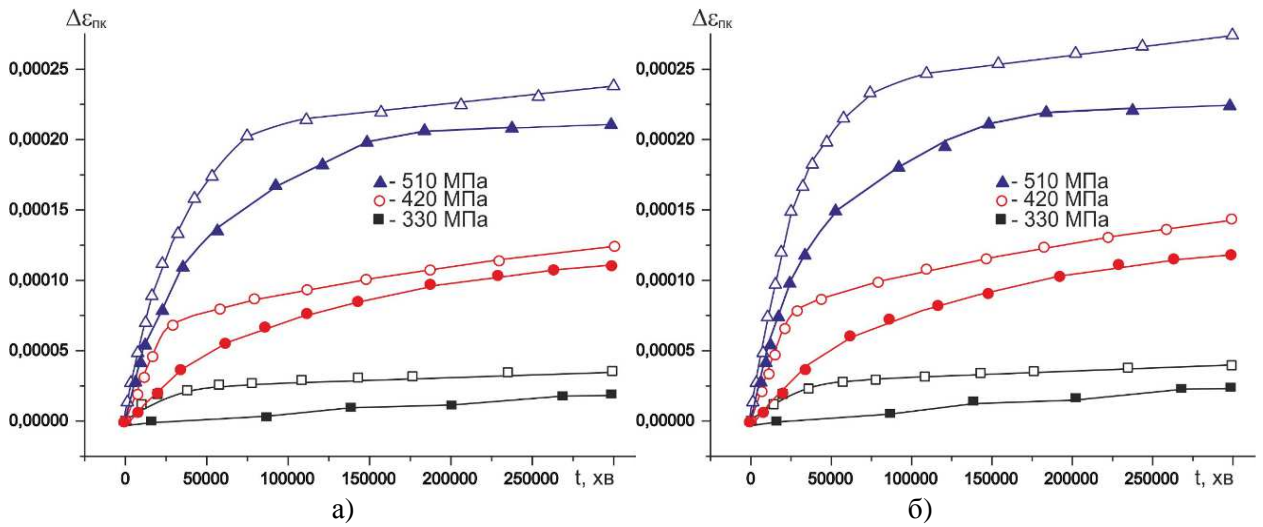
Такі зміни у характері деформаційних процесів можна пояснити спільною дією двох чинників – рівня прикладених механічних напружень та корозивної дії середовища [2-10, 16-19]. Причому роль корозивного середовища є визначальною, про що свідчить порівняння з кінетичними кривими на повітрі. Проаналізувавши показники приросту деформацій та кутів нахилу завершальних ділянок кривих можемо зробити висновок, що для трубної сталі 17ГС у стані поставки найнебезпечнішими у даній групі середовищ будуть МС2 та МС3.

Процеси тривалої дії ґрунтового електроліту на сталь трубопроводу полегшує розвиток поверхневих дефектів, отриманих на стадії виробництва та укладання. Також взаємодія з корозивним середовищем є причиною збільшення пошкодженості поверхні труби, що виражається в утворенні та розвитку корозійних уражень. Тому при оцінці працездатності трубопроводу та з метою її забезпечення при тривалій дії експлуатаційних середовищ необхідно враховувати вплив корозійного та механічного чинників на експлуатаційні характеристики труб, що тягне за собою необхідність проведення додаткових моніторингових заходів на ділянках, які проходять через високомінералізовані ґрунти.

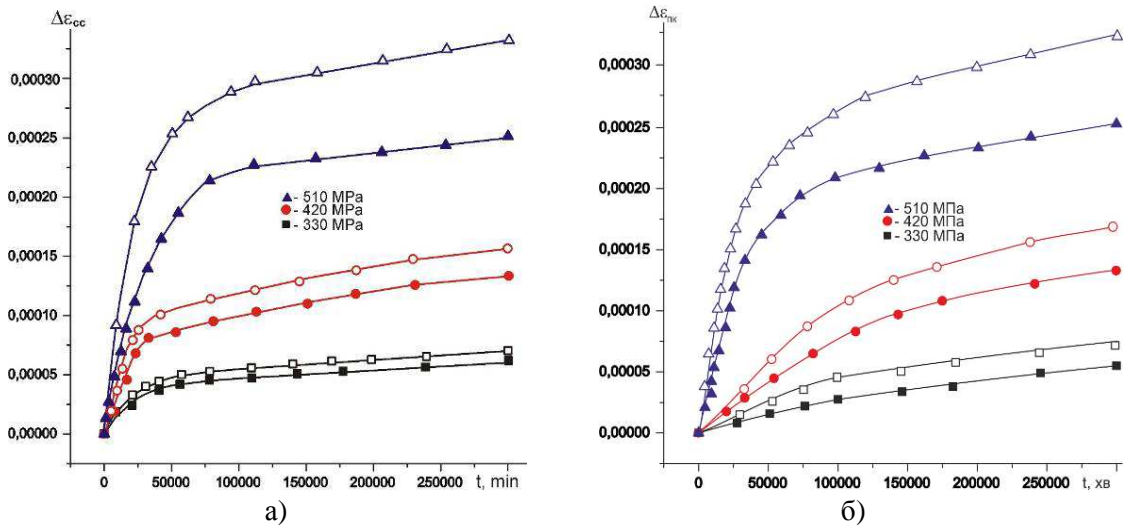
Якщо порівняти деформаційну поведінку експлуатованого та неексплуатованого матеріалу, неважко помітити збереження зафіксованої на повітрі тенденції приросту абсолютної величини деформації повзучості. Водночас у всіх модельних середовищах, на відміну від повітря, неозброєним оком фіксуємо тенденцію збільшення абсолютного приросту деформації повзучості із зростанням рівня номінальних напружень.

Збільшення концентрації корозивних компонентів у модельних середовищах викликає незначне зростання абсолютної величини деформації повзучості, більш небезпечним є зростання кута нахилу завершальної ділянки кривої повзучості при найнижчих рівнях напружень. Така тенденція особливо небезпечна з огляду на те, що трубопровід у такому режимі повинен експлуатуватися значний період часу, що може призвести до підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій.

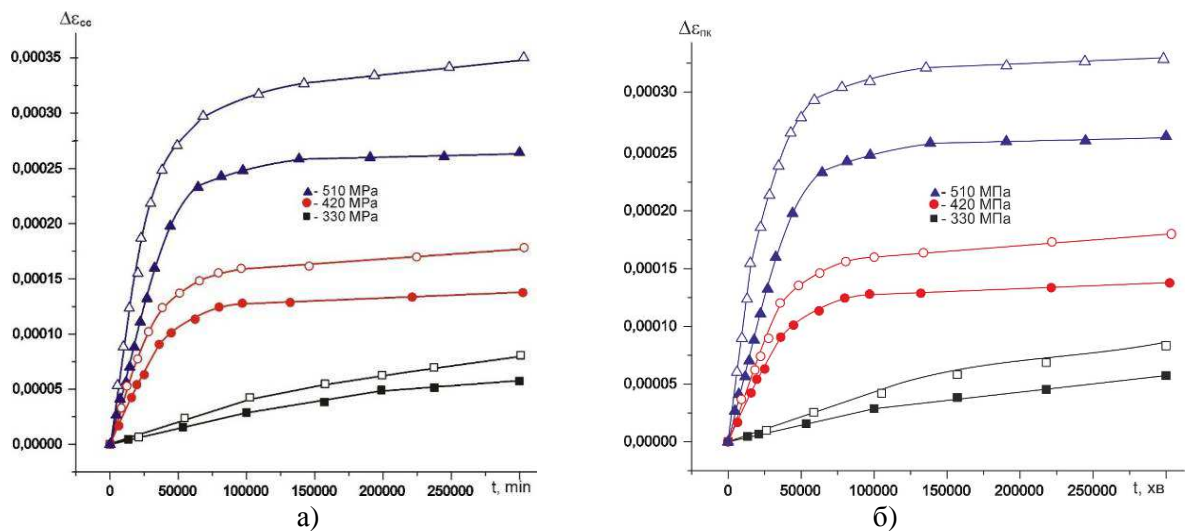
Занепокоєння викликає не тільки сам факт збільшення кута нахилу завершальних ділянок кривих для тривало експлуатованого металу трубопроводу, а й величина цього приросту,



■ – сталь в стані поставки, □ – 41 рік експлуатації, для сталей 17ГC (а) та 19Г (б)
Рисунок 2 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-1



■ – сталь в стані поставки, □ – 41 рік експлуатації, для сталей 17ГC (а) та 19Г (б)
Рисунок 3 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-2



■ – сталь в стані поставки, □ – 41 рік експлуатації, для сталей 17ГC (а) та 19Г (б)
Рисунок 4 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-3

яка за екстремальних навантажень може сягати 2,5-3,2 рази, що небезпечно зменшення показників живучості для тривало експлуатованої сталі. Навіть за найменших досліджуваних напружень показники приросту кута нахилу знаходяться у межах 28-41%, що свідчить про підвищену чутливість до тривалої дії експлуатаційних середовищ, і вимагає вживати запобіжних заходів для забезпечення працездатності трубопроводів у таких умовах. Потрібно постійно розширювати сортамент досліджуваних сталей для нагромадження масиву даних із метою розробки концепції корозійного моніторингу трубопроводів та комплексу заходів із забезпечення їх надійної роботи при тривалій дії експлуатаційних середовищ (грунтових електролітів, підтоварної води тощо).

Таким чином, в результаті проведених досліджень вивчено вплив тривалої експлуатації на деформаційну поведінку матеріалу трубопроводу у хлоридних модельних середовищах, і показано, що залежно від рівня номінальних напружень приріст деформації повзучості порівняно з неексплуатованою сталлю може скласти до 30%.

Водночас, загальний приріст деформації для експлуатованого протягом 40 років матеріалу трубопроводу лежить в межах 3...7% сам по собі не є достатньо небезпечним. Основні ризики полягають у кумулятивній дії кількох чинників (зменшення несучої здатності, погіршення характеристик тріщиностійкості, вплив наводнювання тощо), за якої будь-яке погіршення експлуатаційних характеристик може стати фатальним.

Наступним етапом досліджень було вивчення деформаційної поведінки сталі 19Г у нейтральних ґрунтових електролітах та її порівняння із сталлю 17ГС (рис. 2-4).

У хлоридних електролітах спостерігаємо характерну для обох досліджуваних сталей зростаючу кінетику деформації. Однак аналіз абсолютних та відносних приростів дав змогу виявити наступні особливості.

Трубні сталі у стані поставки характеризуються незначними відмінностями у деформаційній поведінці, однак порівнюючи абсолютні та відносні прирости деформацій, встановлено, що тривало експлуатована сталь 19Г більш чутлива до тривалої дії ґрунтового електроліту, про що свідчить інтенсифікація деформаційних процесів, зокрема на початковій стадії швидкість деформації зростає до 20-30% [2-6, 16-19].

Подальша кінетика не вирізняється якимисьь деформаційними особливостями, однак для всіх середовищ спостерігається вищий рівень величини приросту деформації. Особливо небезпечні тенденції у МС2 та МС3, де поряд із значними абсолютними приростами (МС3) спостерігаємо ще й підвищений ризик тривалого розвитку процесу (МС2), про що свідчать величини кутів нахилу завершальних ділянок кривих.

Таким чином, у нейтральних хлоридних середовищах прирости показників деформації для сталі 19Г на 7-15% вища, ніж для 17ГС.

Крім того, у МС2 зафіксовано значну нестационарність процесу деформування на останній стадії. Така поведінка свідчить про значні прогностичні прирости деформації в результаті дії корозивного середовища в умовах тривалої експлуатації, що, за умови невчасного реагування ремонтних служб, може спричинити до розгерметизації труби.

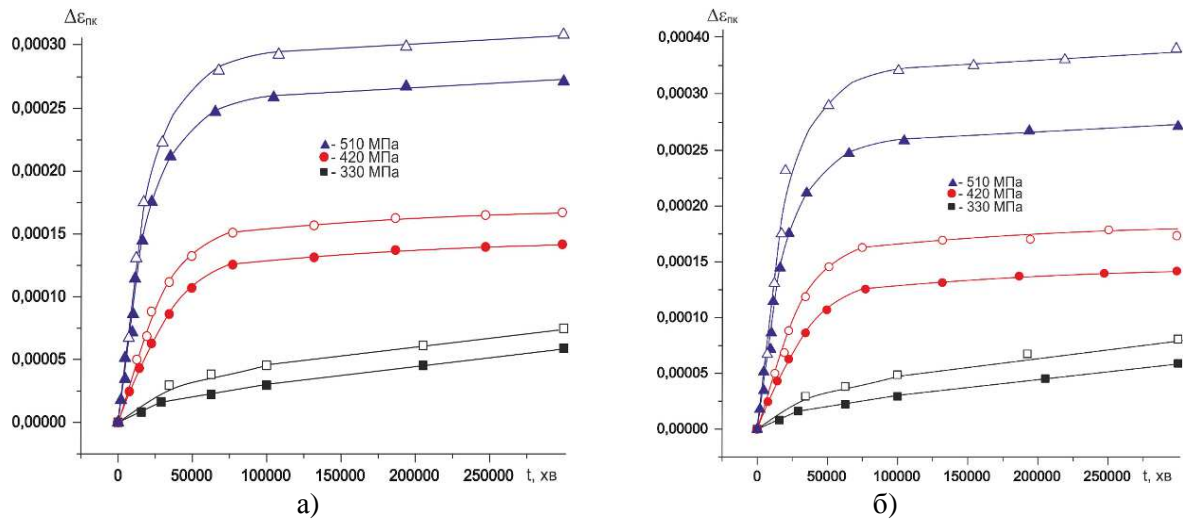
Хлоридно-сульфатні електроліти. У всіх модельних середовищах спостерігаємо значні абсолютні та відносні прирости деформації (рис. 5-7). Порівняно із випробовуваннями на повітрі фіксуємо інтенсифікацію деформування матеріалу трубопроводу, яка досягає максимуму в МС6, де, як показано раніше, маємо специфічне співвідношення концентрацій хлоридів та сульфатів з максимальної синергетикою (рис. 7).

Разом з тим, у всіх хлоридно-сульфатних середовищах спостерігається істотний приріст швидкості деформування при мінімальному рівні номінальних напружень. Скоріше за все, це пов'язано із підвищеним рівнем локалізації корозійних процесів. Тому можемо констатувати наявність підвищеної небезпеки розвитку корозійно-механічних процесів у цих середовищах навіть за штатних режимів експлуатації трубопроводу [1-10, 16-19].

У хлоридно-сульфатних електролітах фіксуємо підвищену чутливість трубної сталі до їх тривалої дії, що необхідно урахувати при оцінці ресурсу роботи. Особливо слід зазначити значні кути нахилу завершальної ділянки кривої в МС5 та МС6, що свідчить про нестационарність процесу і несе в собі ризики виникнення значних (аж до наскрізних) корозійних уражень в високомінералізованих ґрунтових електролітах за середніх та підвищених номінальних напружень. Найбільші експлуатаційні ризики прогнозуються для ділянок трубопроводів у складних умовах експлуатації.

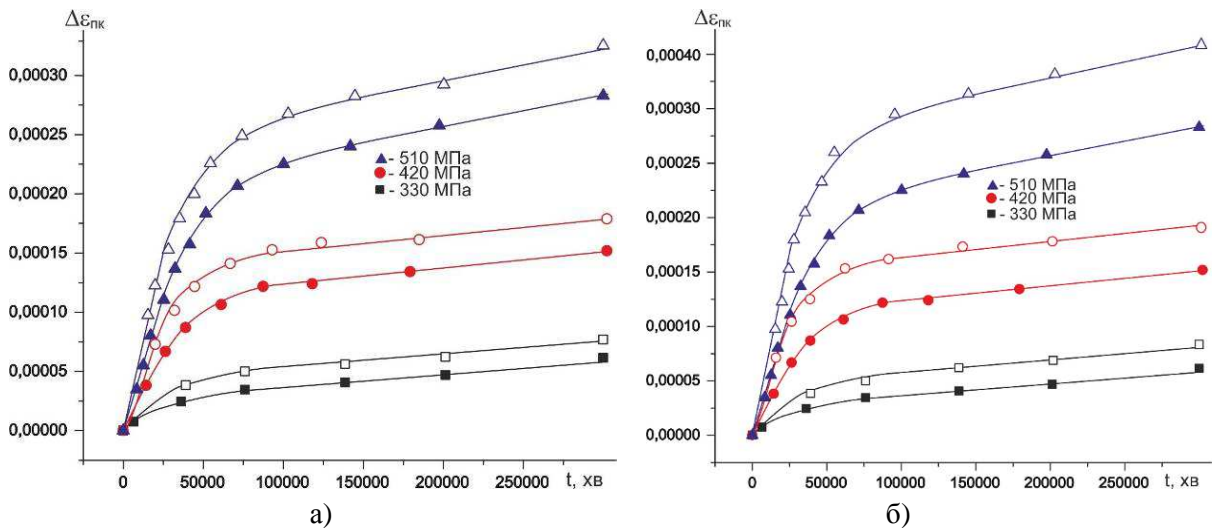
Окремо слід згадати підвищену небезпеку виникнення позаштатних ситуацій на трубопроводах низького тиску, де, як свідчать попередні дослідження [11,12] частота виникнення та розвитку наскрізних корозійних уражень є найвищою. Це зумовлено відсутністю активного протикорозійного захисту та недосконалістю нанесених понад 20 років тому ізоляційних покриттів. Потрібно також взяти до уваги те, що трубопроводи низького тиску виготовлені здебільшого із звичайних вуглецевих сталей (сталь 20, Ст3 тощо), показники корозійної стійкості яких є відчутно нижчими, ніж для низьколегованих (17ГС, 09Г2С, 19Г тощо). Дана проблема є досить актуальною, ураховуючи значне збільшення вартості газу як для населення, так і для промисловості, що вимагає розроблення заходів із мінімізації втрат газу в мережах, особливо в умовах економічної кризи.

Середні показники нестационарності процесу (кута нахилу завершальної ділянки деформаційної кривої) для тривало експлуатованої сталі вищі на 15-20%, що необхідно ураховувати при оцінці працездатності трубопроводу в умовах тривалого впливу корозивного середовища.



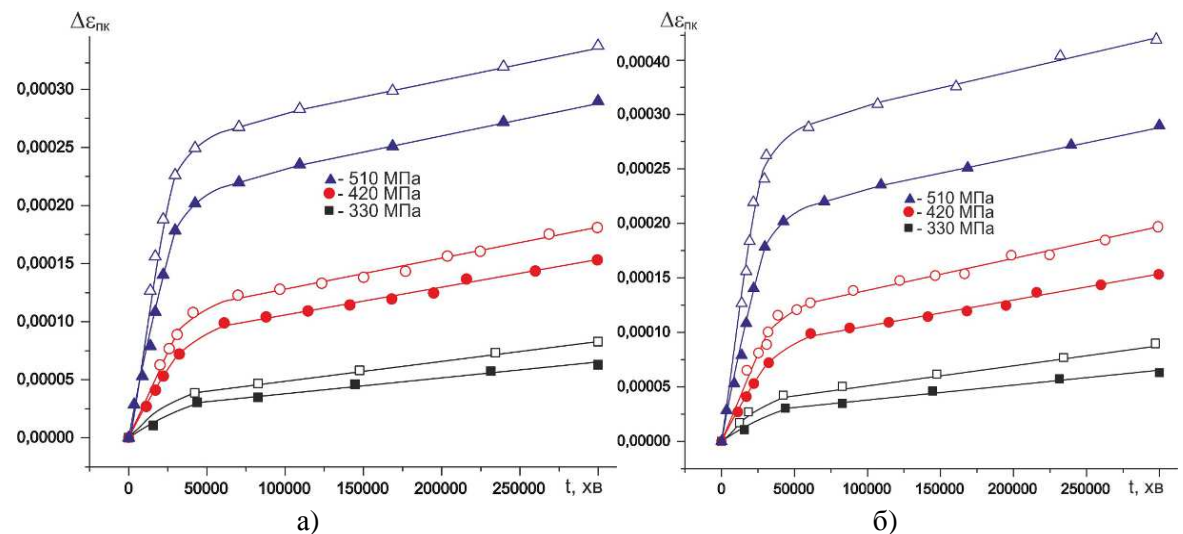
■ – сталь в стані поставки, □ – 41 рік експлуатації, для сталей 17ГС (а) та 19Г (б)

Рисунок 5 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-4



■ – сталь в стані поставки, □ – 41 рік експлуатації, для сталей 17ГС (а) та 19Г (б)

Рисунок 6 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-5



■ – сталь в стані поставки, □ – 41 рік експлуатації, для сталей 17ГС (а) та 19Г (б)

Рисунок 7 – Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-6

Таким чином, досліджено вплив терміну роботи та тривалої дії нейтральних ґрунтових електролітів на деформаційну поведінку трубно-сталі 17ГС, і показано, що залежно від рівня номінальних напружень приріст деформації повзучості порівняно з неексплуатованою сталлю може складати 25-30%.

У хлоридно-сульфатних ґрунтових електролітах поведінка сталі 19Г відрізняється, порівняно із 17ГС, збільшенням швидкості приросту деформації на першій стадії та збільшенням абсолютних величин деформацій та їх відносних приростів для всіх модельних середовищ.

Крім того, у МС5 та МС6 спостерігаємо значні величини кутів нахилу завершальних ділянок. Можемо зробити висновок, що у хлоридно-сульфатних електролітах для досліджуваних тривало експлуатованих сталей існує підвищена небезпека розвитку корозійно-механічних процесів у місцях пошкодження протикорозійного покриття.

Також необхідно звернути увагу на кут нахилу завершальних ділянок кривих деформації при мінімальному рівні номінальних напружень. Для усіх хлоридно-сульфатних середовищ фіксуємо зростаючу кінетику, яка вказує на підвищену небезпеку розвитку корозійних пошкоджень та розвитку корозійно-механічних процесів. Не слід забувати, що висока чутливість до тривалої дії експлуатаційних середовищ може стати причиною розгерметизації трубопроводів із невеликою товщиною стінки. Особливо варто виділити промислові трубопроводи, якими часто транспортується вологий газ, що зумовлює нагромадження підтоварної води у нижній частині труби. Остання діє як корозивне середовище і за відсутності активного протикорозійного захисту може стати причиною витоку транспортованого продукту та завдавати шкоди працівникам і довкіллю.

Отже, у нейтральних ґрунтових електролітах найбільші ризики виникнення позаштатних ситуацій для обох досліджуваних сталей спостерігаються у МС2, МС5 та МС6. Особливо небезпечними виявлені тенденції є для рівнів підвищених рівнів напружень, які можуть виникати при просіданнях ґрунту на ділянках зі складними умовами експлуатації.

За результатами проведених експериментів нами запропоновано ранжувати усі досліджувані середовища за таким характеристичними величинами:

- абсолютна величина приросту деформації;
- відносна величина приросту деформації;
- кут нахилу завершальної ділянки кривої деформації.

Значення відповідного характеристичного показника на повітрі приймаємо рівним одиниці та розраховуємо за ним відносні показники (бали) для інших випадків. Потім шляхом сумування балів за всіма характеристичними показниками отримуємо кінцевий ранг для кожної комбінації «сталь-середовище-напруження» та визначаємо найнебезпечніші. На першому етапі проводимо ранжування у групі нейтральних ґрунтових електролітів (МС1-МС6). Отримаємо

наступні значення балів для кожного характеристичного показника (табл. 2-4).

Порівняльний аналіз експериментальних даних у графічному вигляді показує більшу схильність тривало експлуатованої сталі 19Г до втрати показників опору деформаціям, особливо за рівнів номінальних напружень 420 та 510 МПа. Для подальшого порівняльного аналізу величини впливу хімічного складу ґрунтового електроліту та експлуатаційних напружень доцільно використовувати не лише абсолютні показники деформації, а й величини її приросту у відсотках (табл. 3).

Порівняльний аналіз величин приросту деформації вказує на дуже небезпечну тенденцію. У той час, як у сталі 17ГС виявлено невисокі показники, для сталі 19Г спостерігаємо значні відносні прирости, навіть за мінімального рівня номінальних напружень. Така тенденція свідчить про підвищені ризики виникнення ушкоджень та втрати цілісності труби, особливо в МС2 та МС6.

Для прогнозування показників деформації у часі важливим є визначення відносного рівня нестаціонарності процесу за кутом нахилу завершальної ділянки деформаційної кривої (табл. 4).

Аналіз відносних показників кутів нахилу кривих деформації дав змогу виявити спільну для обох тривало експлуатованих сталей тенденцію – при мінімальному рівні номінальних напружень у МС2, МС3 та МС4 високі показники нестаціонарності процесу, тобто є прихована розвитку корозійно-механічних процесів з невеликою швидкістю, що ускладнює їх виявлення при проведенні моніторингових заходів, оскільки дані сусідніх вимірювань відрізняються не значно.

Інша виявлена нами небезпека пов'язана із різкою активізацією небажаної деформації у МС5 та МС6 за високих рівнів напружень. А беручи до уваги підвищену локалізацію корозійних процесів у цих середовищах [13] виникають ризики втрати стійкості оболонки труби та спонтанного руйнування. Такий сценарій може бути зумовлений перевантаженням труби внаслідок локального зсуву ґрунту, що спричинило важку аварію трубопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» у 2008 році та, за попередніми даними, є однією із основних причин розгерметизації трубопроводу «Прогрес» у 2016 р. Додавши бали характеристичних показників, отримуємо дані для ранжування нейтральних ґрунтових електролітів за небезпекою розвитку корозійно-механічних процесів внаслідок тривалої дії експлуатаційних середовищ на експлуатовані трубно сталі (табл. 5).

Узагальнення показників дає змогу виділити найнебезпечніші серед нейтральних ґрунтових електролітів середовища: для обох досліджуваних марок сталей це будуть МС2, МС5 та МС6. Також спостерігаємо істотно більший вплив терміну експлуатації на чутливість до впливу корозивного середовища для сталі 19Г, особливо у області підвищених навантажень.

Таблиця 2 – Ранжування нейтральних ґрунтових електролітів за абсолютним значенням деформації

МС	Сталь 17ГС			Сталь 19Г		
	330 МПа	420 МПа	510 МПа	330 МПа	420 МПа	510 МПа
1	1,41	3,14	5,49	1,41	3,07	6,1
2	1,45	3,18	6,08	1,43	3,24	6,38
3	1,48	3,29	6,14	1,54	3,43	6,86
4	1,47	3,24	6,08	1,52	3,43	7,05
5	1,47	3,47	6,24	1,56	3,62	7,81
6	1,49	3,53	6,86	1,67	3,71	8

Таблиця 3 – Ранжування нейтральних ґрунтових електролітів за приростом деформації

МС	Сталь 17ГС			Сталь 19Г		
	330 МПа	420 МПа	510 МПа	330 МПа	420 МПа	510 МПа
1	2,7	3,71	1,94	3,53	4,56	5,69
2	2,04	2,61	2,44	4,91	4,67	7,67
3	2,05	2,78	2,56	3,36	5,12	7,32
4	2,2	3,13	2,37	3,44	6,33	8,06
5	2,04	3,08	2,23	3,77	5,92	10,38
6	1,89	3,22	3,77	4,68	5,92	10,37

Таблиця 4 – Ранжування нейтральних ґрунтових електролітів за показником кута нахилу завершальної ділянки кривої деформації

МС	Сталь 17ГС			Сталь 19Г		
	330 МПа	420 МПа	510 МПа	330 МПа	420 МПа	510 МПа
1	1,71	3,84	3,32	1,4	3,19	2,76
2	3,3	5,06	5,44	3,11	4,58	6,05
3	3,71	1,38	1,01	3,41	2,08	1
4	3,78	1	1,65	3,23	1,31	1,83
5	2,71	3,34	6,36	2,51	2,99	5,84
6	3,47	5,71	6,96	3,7	5,47	6,23

Таблиця 5 – Ранжування нейтральних ґрунтових електролітів за трьома характеристичними показниками

МС	Сталь 17ГС			Сталь 19Г		
	330 МПа	420 МПа	510 МПа	330 МПа	420 МПа	510 МПа
1	6,47	12,12	13,26	7,02	12,28	17,46
2	7,46	12,3	16,74	10,14	14,04	23,16
3	7,91	8,95	12,52	9,05	12,27	18,46
4	8,13	8,84	12,87	8,92	12,72	20,31
5	6,89	11,48	17,68	8,59	14,25	27,77
6	7,53	14,08	20,73	10,85	16,88	28,44

Однак, найбільш небезпечними для деградованих матеріалів є кислі середовища, ранжування яких за характеристичними показниками було наступним етапом нашого дослідження.

Висновки

У нейтральних ґрунтових електролітах найбільші ризики виникнення позаштатних ситуацій для обох досліджуваних сталей спостерігаються у МС2, МС5 та МС6. Особливо небезпечними виявлені тенденції є для рівнів підвищених рівнів напружень, які можуть виникати при просіданнях ґрунту на ділянках зі складними умовами експлуатації. Проведено ранжування ґрунтових електролітів за характеристичними показниками та встановлено найнебезпечніші для деградованих трубопровідних сталей у кожній із груп. Такі методичні підходи

дають змогу підвищити ефективність ремонтних заходів шляхом попередження важких відмов через регулярний моніторинг тривало експлуатованих ділянок, прокладених у ґрунтах із підвищеною корозійною активністю, та з подальшою оптимізацією робочих режимів. В подальшому необхідно нагромаджувати експериментальний матеріал з метою збільшення кількості характеристичних показників та побудови комплексної багатопараметричної системи корозійного моніторингу трубопроводів.

Література

1 Побережний Л.Я. Ранжування ґрунтів за безпекою втрати несучої здатності трубопроводами на пізній стадії експлуатації / Л.Я. Побережний, А.І. Станецький // Науковий вісник НЛТУ України. - 2016. - Вип. 26.1. - С. 280-286.

2 Побережний Л. Я. Корозійно-механічна деградація магістральних газопроводів / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – №1. – С. 36-38.

3 Побережний Л. Я. Полікритеріальна оцінка корозійної активності середовища як елемент підвищення надійності магістральних газопроводів / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – №2. – С. 38-40.

4 Побережний Л.Я. Вплив експлуатаційної деградації на несучу здатність матеріалу магістральних трубопроводів/ Л.Я. Побережний, П.О. Марущак, А.І. Станецький // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Т. 2, спец. вип. № 9. – С. 642-646.

5 Побережний Л. Я. Методика визначення областей підвищеної корозійної та біокорозійної активності як складова комплексного моніторингу нафтогазопроводів / Л.Я. Побережний, А.І. Станецький, М. С. Полутренко, П.О. Марущак // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2013. – С. 161-166.

6 Полутренко М.С. Оцінювання ризику біокорозійних руйнувань підземних газопроводів // М.С. Полутренко, Л. Я. Побережний, А. І. Станецький // Вісник ТНТУ. – 2015. – № 4 (80) – С. 71-77.

7 Побережний Л. Я. Вплив експлуатаційної деградації на несучу здатність матеріалу транзитних газопроводів / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, В. Б. Асатрян // Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012 р. / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ 2012. – С. 233-235.

8 Побережний Л.Я. Вплив терміну експлуатації на опір деформаціям матеріалу газопроводів / Л.Я. Побережний, А.І. Станецький, В.С. Мархалевич // Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії-2012: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, 5-7 листопада 2012 р. / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 211-214.

9 Побережний Л. Я. Зміна несучої здатності матеріалу магістральних газопроводів в результаті експлуатаційної деградації / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, П.О. Марущак // Нафтогазова енергетика 2013: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, Івано-Франківськ, 7-11 жовтня 2013 р. / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ 2013. – С. 451-253.

10 Полутренко М.С. Вплив терміну експлуатації та рН середовища на несучу здатність матеріалу трубопроводу // М.С. Полутренко, Л. Я. Побережний, А. І. Станецький // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика-2015» 21-24

квітня 2015 р. – Івано-Франківськ, 2015. – С. 298-302.

11 Гончарук М.І. Корозійно-механічна поведінка металу газопроводу / М.І. Гончарук, Є. І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Науковий вісник Івано-Франківського технічного університету нафти і газу. – 2003. – №1 (5). – С. 54-60.

12 Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація газопроводів / М.І. Гончарук / Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 2. – С. 56-57.

13 Никифорчин Г. Вплив експлуатаційної розсіяної пошкодженості на закономірності деградації властивостей конструкційних сталей / Г. Никифорчин, Е. Лунарьська, Д. Петрина [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т.14. – № 4. – С.38-45.

14 Крижанівський Є. І. Методологія дослідження деформації та руйнування трубопроводних систем / Є. І. Крижанівський, Л. Я. Побережний // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під. ред. В.В. Панасюка. – Львів, 2004. – С. 419-424.

15 Крижанівський Є. І. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів / Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. // Нафт. і газова пром-сть. – 2002. – №. 5. – С. 33-38.

16 Побережний Л. Я. Низькотемпературна корозійна повзучість сталі трубопроводів / Л. Я. Побережний // Машинознавство. – 2007. – № 9. – С. 24-28.

17 Побережний Л. Я. Вплив рН середовища на перебіг стрес-корозійних процесів / Л. Я. Побережний // Машинознавство. – 2007. – № 10. – С. 42-47.

18 Побережний Л. Я. Особливості корозії нафтогазопроводів у засолених ґрунтах / Л. Я. Побережний // Нафтова і газова пром-ть. – 2008. – № 3. – С. 47-49.

19 Побережний Л. Я. Корозійна деградація магістральних трубопроводів / Л. Я. Побережний // Нафтова і газова пром-ть. – 2008. – № 2. – С. 47-49.

20 Чорний І.Б. Географія ґрунтів з основами ґрунтознавства: навч. посібник. – К.: Вища школа, 1995. – 240 с.

21 Цирульник О. Т. Окрихчення сталі магістрального нафтопроводу / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, О. І. Звірко, Д. Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 125-126.

Стаття надійшла до редакційної колегії 31.08.17

Рекомендована до друку професором Кондратом О.Р. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором Марущаком П.О.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль)