Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, А. В. Грицанчук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

КОРОЗІЯ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ У СЕРЕДОВИЩАХ ХЛОРИДНОГО ТИПУ

Значна частина розгалуженої мережі магістральних трубопроводів України перебуває в експлуатації понад 30 років. Зі збільшенням термінів їх експлуатації дедалі актуальнішою стає проблема ефективної та безперервної роботи трубопроводів транспорту, яка забезпечується організацією періодичної технічної діагностики стану елементів трубопроводів та ремонту в місцях виявлених недопустимих дефектів. На пізній стадії експлуатації нафтогазопроводів 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 оцінювання працездатності експлуатованого матеріалу. Експериментальні дослідження виконано з використанням методів тензометрії та потенціометрії за розробленою методикою на базі раніше створеної в ІФНТУНГ автоматизованої випробувальної системи з ЕОМ, що дає змогу отримати високу точність та достовірність результатів експерименту. Досліджено вплив терміну напруження на деформаційну поведінку трубної сталі у ґрунтах хлоридного типу. Встановлено, що приріст деформації становить до 30 %. Визначено найнебезпечніші з корозійної точки зору хлоридні середовища – MC_2 та MC_3 . Вивчено вплив величини механічних напружень та хімічного складу середовища на корозійну деградацію тривало експлуатованих трубопроводів у ґрунтах хлоридного типу.

Ключові слова: корозійно-механічна деградація; термін напруження; хлоридні середовища; деформаційна поведінка; локальна корозія.

Вступ. 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 цих технічних об'єктів. Важливо вивчити кінетику деформації у корозійних середовищах, оскільки рівень пошкоджень внаслідок 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 (Poberezhnyi, Stanetskyi, & Rudko, 2011; Poberezhnyi & Stanetskyi, 2011; Karpash, Zinchak & Karpash, 2007; Metodyka otsinky, 2002).

Матеріали і методи дослідження. Об'єктом наших досліджень вибрано магістральні газопроводи великого діаметра, виготовлені зі сталі 17ГС, які були в експлуатації 41 рік. Саме такий матеріал труб широко використовували під час спорудження магістральних трубопроводів у 70-х роках ХХ ст. та експлуатуються дотепер.

Термін експлуатації вибрано на основі досліджень професорів Є. І. Крижанівського та Г. М. Никифорчина (Kryzhanivskiy & Nykyforchyn, 2011; Kryzhanivskiy, Hrabovskyi & Mandryk, 2013), в яких зазначено, що трубопровідні сталі, експлуатовані менше 20 років, не мають деградації фізико-механічних властивостей, а з терміном експлуатації 20-30 років – деградація є незначною.

Для проведення досліджень УМГ "Київтрансгаз" надав фрагменти, вирізані з нижньої частини труб з ділянок магістрального газопроводу Єфремівка-Диканька-Київ, діаметр 1020 мм, сталь 17ГС, роки експлуатації – 1967-2008. Фрагменти труб у стані поставки надано з аварійного резерву.

Для дослідження корозійних процесів під напруженням використовували розроблену раніше комп'ютеризовану установку КН-1, створену на базі установки МВ-1К. 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.

Інформація про авторів:

Побережний Любомир Ярославович, д-р техн. наук, професор, ІФНТУНГ кафедра хімії, тел. +380342727173.

Email: lubomyrpoberezhnyy@gmail.com

Станецький Андрій Ігорович, канд. техн. наук, підполковник ЗСУ, заступник завідувача кафедри військової підготовки ІФНТУНГ, тел. +380342502506. Email: ais110876@ukr.net

Грицанчук Андрій Валентинович, аспірант, ІФНТУНГ кафедра хімії, тел. +380342727173. Email: kindix@i.ua

Цитування за ДСТУ: Побережний Л. Я., Станецький А. І., Грицанчук А. В. Корозія тривало експлуатованих трубних сталей у середовищах хлоридного типу. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(5). С. 114–118.

Citation APA: Poberezhny, L. Ya., Stanetsky, A. I., & Hrytsanchuk, A. V. (2017). Corrosion of long operated pipe steels in the chloride environments. Scientific Bulletin of UNFU, 27(5), 114–118. <https://doi.org/10.15421/40270523>

Для оцінки швидкості корозії використовували ваговий (гравіметричний) метод, який базується на порівнянні результатів зважування зразків до і після експерименту з урахуванням площі зразка, який занурювали в агресивне середовище, та часу експозиції. Вимірювання втрати ваги – найпростіший спосіб, що характеризує швидкість корозії. Однак цей спосіб потребує деякого часу експозиції.

Гравіметричний метод забезпечує пряме і беззастережне визначення втрати маси металу, що дає змогу реалізовувати широке коло дослідницьких задач, що ґрунтуються на зважуванні. Параметр, що визначається – маса зразка, що не вимагає додаткового калібрування, а результати зважування не потребують складних розрахунків та інтерпретації. Метод гравіметрії є універсальним, з його допомогою можна досліджувати будь-які металічні та неметалічні матеріали. До переваг методу варто віднести можливість максимального наближення умов досліджень до реальних умов експлуатації обладнання: за складом агресивного середовища, станом поверхні металу, за механічними навантаженнями тощо.

Показником для визначення швидкості корозії ваговим методом є показник швидкості K , що визначають за відношенням різниці між вагою металу до досліджень на корозію (m_0) і після досліджень (m_1) до досліджуваної поверхні S і часу досліджень τ :

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S\tau}, \quad (1)$$

де: K – ваговий показник корозії; ρ – густина металу; 8,76 – перевідний коефіцієнт від $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$ до мм/рік .

Ваговий показник швидкості корозії не враховує густину металу. Тому його перераховували на глибинний показник, який характеризує утонення стінки трубопроводу.

Результати досліджень та їх обговорення. 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 становить 15–20 %. Такі тенденції не становлять небезпеки, з чого можна зробити висновок, що несна здатність трубопроводу, який у процесі 40 років експлуатації не піддавався дії корозивного середовища, зміниться незначно. Однак на практиці, беручи до уваги недосконалість протикорозійних покриттів, які використовували у будівництві магістральних трубопроводів наприкінці 60-х та в 70-х роках ХХ ст., така ситуація є скоріше гіпотетичною. Випробовування на повітрі мало на меті стати головним чином відправною точкою для виокремлення впливу корозивного середовища на кінетику деформації сталі трубопроводу на пізній стадії експлуатації.

Зі збільшенням величини напружень процеси деформування проходять з більшою швидкістю. За найвищих рівнів напружень на кривій деформації спостерігаються циклічні прискорення. Причому характерно, що для деградованого матеріалу вони різкіші і починають появлятися за нижчих рівнів напружень. Таку поведінку тривало експлуатованої сталі трубопроводу можна пояснити розвитком мікротріщин та внутрішніх структурних дефектів, наслідком якого є прискорене деформування.

Оскільки в тривалоексплуатованому матеріалі трубопроводу значно вищий інтегральний показник кіль-

кості пошкодження, зокрема і мікротріщин у зародковому стані, то величина прикладених напружень, потрібна для їх розвитку, буде нижчою. Подібну поведінку тривало експлуатованих трубних сталей описано також у роботах (Krasowsky, Dolgiy & Torop, 2001; Nykyforchyn et al., 2009).

Рис. 1. Кінетика деформації матеріалу трубопроводу на повітрі: ■ – сталь у стані поставки; □ – 41 рік експлуатації

Окремо варто враховувати і структурну деградацію металу, утворення мікропорожнин та ймовірне наводнювання внаслідок тривалої дії експлуатаційних середовищ. Сукупність цих чинників і призводить до зменшення здатності чинити опір деформаціям, а погіршення у 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 свідчитимуть про досить значні ризики виникнення пошкоджувальних ситуацій.

Цей показник можна використати не тільки для випробовувань на повітрі, але і для корозійно-механічних досліджень. Тоді цей показник додатково слугуватиме маркером чутливості матеріалу трубопроводу до тривалої дії експлуатаційного середовища.

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

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. 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 трубоної сталі 17ГС у стані поставки найнебезпечнішими у цій групі середовищ будуть МС₂ та МС₃.

Рис. 2. Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-1: ■ – сталь у стані поставки; □ – 41 рік експлуатації

Рис. 3. Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-2: ■ – сталь у стані поставки; □ – 41 рік експлуатації

Рис. 4. Кінетика деформації матеріалу трубопроводу у МС-3: ■ – сталь у стані поставки; □ – 41 рік експлуатації

Процеси тривалої дії ґрунтового електроліту на сталь трубопроводу полегшує розвиток поверхневих дефектів, отриманих на стадії виробництва та укладан-

ня. Також взаємодія з корозивним середовищем є причиною збільшення пошкодженості поверхні труби, що виражається в утворенні та розвитку корозійних уражень. Тому під час оцінювання працездатності трубопроводу та з метою її забезпечення за тривалої дії експлуатаційних середовищ потрібно враховувати вплив корозійного та механічного чинників на експлуатаційні характеристики труб, що потребує проведення додаткових моніторингових заходів на ділянках, які проходять через високомінералізовані ґрунти.

Якщо порівняти деформаційну поведінку експлуатованого та не експлуатованого 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 зі зростанням рівня номінальних напружень.

Збільшення концентрації корозивних компонентів у модельних середовищах зумовлює незначне зростання абсолютної величини деформації повзучості, небезпечнішим є зростання кута нахилу завершальної ділянки кривої повзучості за найнижчих рівнів напружень (табл.). 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.

Табл. Кути нахилу завершальних ділянок кривих деформації сталі 17ГС у МС

МС	Неексплуатована труба			41 рік експлуатації		
	330 МПа	420 МПа	510 МПа	330 МПа	420 МПа	510 МПа
1	2,95	6,6	5,74	4,15	7,8	7,05
2	5,7	8,75	9,4	7,32	10,09	10,5
3	6,4	4,2	1,45	8,85	6,2	4,6

Занепокоєння викликає не тільки сам факт збільшення кута нахилу завершальних ділянок кривих для тривало експлуатованого металу трубопроводу, а й величина цього приросту, яка за екстремальних навантажень може сягати 2,5-3,2 раза, що зумовлює 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 асортимент досліджуваних сталей для нагромадження масиву даних із метою розроблення концепції корозійного моніторингу трубопроводів та комплексу заходів із забезпечення їх надійної роботи за тривалої дії експлуатаційних середовищ (ґрунтових електролітів, підтоварної води тощо).

Отже, за результатами 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 становити до 30 %.

Водночас, загальний приріст деформації для експлуатованого протягом 40 років матеріалу трубопроводу

знаходиться в межах 3...7 % сам по собі не є достатньо небезпечним. Основні ризики полягають у кумулятивній дії кількох чинників (зменшення несної здатності, погіршення характеристик тріщиностійкості, вплив наводнювання тощо), за якої будь-яке погіршення експлуатаційних характеристик може стати фатальним.

Дослідження у хлоридних середовищах показали (рис. 5) відчутне збільшення швидкості загальної корозії зі зростанням концентрації хлорид-іонів при переході від МС₁ до МС₂, і дещо менше при переході від МС₂ до МС₃. Порівнявши швидкості загальної та локальної корозії, можемо констатувати яскраву інтенсифікацію локальних корозійних процесів, причому вона зростає зі збільшенням концентрації хлорид-іонів. Зі збільшенням концентрації хлорид-іонів дія механічного чинника теж істотно зростає як у разі загальної корозійної деградації, так і для локальної корозії.

При локальній корозії зі збільшенням рівня механічних напружень спостерігаємо значну інтенсифікацію корозійних процесів, особливо на ділянці пружно-пластичної деформації (діапазон $1,35 \sigma_{0,2}^* - 1,65 \sigma_{0,2}^*$). Зафіксовано активне зростання швидкостей загальної та локальної корозії, хоча у випадку МС₁ зростання швидкості локальної корозії незначне, що пов'язано із відносно невеликою локалізацією корозійних процесів.

Для коректної оцінки експлуатаційних ризиків, ресурсу та залишкового ресурсу безпечної експлуатації надзвичайно важливо знати швидкість утонення стінки трубопроводу (див. рис. 5; б, г) у процесі експлуатації для вчасного запобігання можливим позаштатним ситуаціям. Спостерігаємо подібні до відповідних залежностей у масових втратах закономірності.

Можемо зазначити, що за умови пошкодження ізоляції та відсутності чи неналежної якості активного протикорозійного захисту утонення у хлоридних середовищах в області експлуатаційних навантажень може сягати 0,45-0,55 мм, а з урахуванням локалізації процесу у випадку МС₃ перевищувати 6 мм/рік, що свідчить про значну небезпеку розгерметизації трубопроводів, особливо тих, які експлуатуються понад 15...25 років із застарілим та недовговічним бітумним протикорозійним покриттям (Gu, Luo & Mao, 1999; Gan et al., 1994).

Особливо важливо провести аналіз ґрунтових вод вздовж трас пролягання трубопроводів, щоб своєчасно оцінити ризики корозійної деградації сталі трубопроводу, попередити та недопустити розгерметизацію чи складніші відмови та аварійні ситуації.

Висновки

- Досліджено вплив терміну напруження на деформаційну поведінку трубної сталі у ґрунтах хлоридного типу. Встановлено, що приріст деформації становить до 30 %.
- Визначено найнебезпечніші з корозійної точки зору хлоридні середовища – МС₂ та МС₃.
- Вивчено вплив величини механічних напружень та хімічного складу середовища на корозійну деградацію тривало експлуатованих трубопроводів у ґрунтах хлоридного типу.

Рис. 5. Залежність швидкості корозії (а, в) та утонення стінки труби (б, г) у хлоридних електролітах: рівномірна корозія (а, б), локальна корозія (в, г)

Перелік використаних джерел

- Gan, F., Sun, Z. W., Sabde, G., & Chin, D. T. (1994). Cathodic Protection to Mitigate External Corrosion of Underground Steel Pipe Beneath Disbonded Coating. *Corrosion*, 50(10), 804–816. <https://doi.org/10.5006/1.3293470>
- Gu, B., Luo, J., & Mao, X. (1999). Hydrogen-Facilitated Anodic Dissolution-Type Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in Near-Neutral pH Solution. *Corrosion*, 55(1), 96–106. <https://doi.org/10.5006/1.3283971>
- Karpash, O. M., Zinchak, Ia. M., & Karpash, M. O. (2007). Tekhnologhiia tazasoby neruivnogo kontroliu i tekhnichnoi diahnostyky naf-tohazovohoobladdannia promyslovosti. *Naftova i hazovapromyslovist*, 6, 8–11. [in Ukrainian].
- Krasowsky, A. Y., Dolgiy, A. A., & Torop, V. M. (2001). Charpytesting to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation. In Proc. "CharpyCentaryConference", Poitiers (Vol. 1, pp. 489–495).
- Kryzhanivskiy, E. I., & Nykyforchyn, H. M. (2011). Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steel sof gas and oil pipelines and oil storagere servoirs. *Materials Science*, 47(2), 127–136.
- Kryzhanivskiy, E. I., Hrabovskiy, R. S., & Mandryk, O. M. (2013). Estimation of the service ability of oil and gas pipelines after long-termoperation according to the parameters of their defectiveness. *Materials Science*, 49(1), 117–123.
- Metodyka otsinky (2002). *Metodyka otsinky tekhnichnoho stanutrub-hazoprovodu z tryvalym strokom ekspluatatsii ta yoho zalyshkovoho resursu* (2nd ed.) Kyiv: DK "Ukrtranshaz". 72 p. [in Ukrainian].
- Nykyforchyn, H. M. et al. (2009). Degradation of steels used in gas main pipelines during their 40-year operation. *Strength of materials*, 41(5), 501–505.
- Poberezhnyi, L. Ya., & Stanetskiy, A. I. (2011). Koroziiino-mekhanichna dehradatsiia mahistralny khazoprovodiv. *Naftova i hazovapromyslovist*, 1, 36–38. [in Ukrainian].
- Poberezhnyi, L. Ya., Stanetskiy, A. I., & Rudko, V. V. (2011). Koroziiinyi monitorynh tranzitnykh hazoprovodiv. *Visnyk TNTU*, 3, 20–26. [in Ukrainian].

Л. Я. Побережный, А. И. Станецкий, А. В. Грицанчук

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

КОРРОЗИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В СРЕДАХ ХЛОРИДНОГО ТИПА

Значительная часть разветвленной сети магистральных трубопроводов Украины находится в эксплуатации более 30 лет. С увеличением срока их эксплуатации все актуальнее становится проблема эффективной и непрерывной работы трубопроводного транспорта, которая обеспечивается организацией периодической технической диагностики состояния элементов трубопроводов и ремонта в местах выявленных недопустимых дефектов. На поздней стадии эксплуатации нефтегазопроводов особенно актуальной научно-технической проблемой становится надлежащее обеспечение технической надежности и безопасной эксплуатации трубопроводов с применением методов технического диагностирования, особенно, коррозионных дефектов, а также разработка эффективных методов оценки работоспособности эксплуатируемого материала. Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов тензометрии и потенциометрии по разработанной методике на основе созданной в ИФНТУНГ автоматизированной испытательной системы с ЭВМ, что позволяет получить высокую точность и достоверность результатов эксперимента. Исследовано влияние срока наработки на деформационное поведение трубной стали в почвах хлоридного типа. Установлено, что прирост деформации составляет до 30 %. Определены самые опасные с коррозионной точки зрения хлоридные среды – MS_2 и MS_3 . Изучено влияние величины механических напряжений и химического состава среды на коррозионную деградацию длительно эксплуатируемых трубопроводов в грунтах хлоридного типа.

Ключевые слова: коррозионно-механическая деградация; срок наработки; хлоридные среды; деформационное поведение; локальная коррозия.

L. Ya. Poberezhny, A. I. Stanetsky, A. V. Hrytsanchuk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

CORROSION OF LONG OPERATED PIPE STEELS IN THE CHLORIDE ENVIRONMENTS

Most of oil and gas main pipelines in Ukraine has been in operation for more than 30 years. With the increase in the terms of their operation, the problem of efficient and continuous operation of pipeline transport becomes more urgent, which is ensured by the organization of periodical technical diagnostics of the state of pipeline elements and repair in places of detected inadmissible defects. At the later stage of exploitation of oil and gas pipelines the proper technical and technical problem is to ensure the technical reliability and safe operation of pipelines with the use of methods of technical diagnostics, especially corrosion defects, as well as the development of effective methods for assessing the working capacity of the exploited material. Experimental studies were carried out using strain gauge and potentiometry methods based on the previously developed computer-aided testing system with computers on the IFNTUNG, which allows obtaining high accuracy and reliability of the results of the experiment. The object of our researches were selected major gas pipelines of large diameter made of steel 17GS, which were in operation for 41 years. It is precisely this material of pipes that was widely used in the construction of main pipelines in the 70 s of the last century and is being exploited at present. The nature of the development of deformation processes in MS_1 - MS_3 compared with air does not change significantly. We fix growth of deformation increments with increase of applied stresses. Unlike air, in the studied media there are no cyclical acceleration-decay deformations, which can be explained by the effect of the Rebinder effect. The angles of inclination of the final sections are increasing, which indicates a greater predicted duration of development of deformation processes under conditions of influence of the operating environment. If we compare the deformation behavior of the exploited and non-extruded material, it is easy to see the preservation of the air-creep tendency of the absolute magnitude of the creep deformation. At the same time, in all model environments, unlike the air, with the naked eye we fix the tendency to increase the absolute increase in the creep deformation and with the increase in the level of nominal stresses. The influence of the term of work on the deformation behavior of tubular steel in soils of chloride type is investigated. It has been established that the deformation gain is up to 30 %. The most dangerous from the corrosive point of view chloride environments – MS_2 and MC_3 . Even for the smallest stresses studied, the indicators of the slope gain are in the range of 28–41 %, which indicates an increased sensitivity to the prolonged use of operating environments, and requires taking precautionary measures to ensure the operability of pipelines in such conditions.

Keywords: corrosion-mechanical degradation; term of production; chloride medium; deformation behavior; local corrosion.