

*Роман ГРАБОВСЬКИЙ, Мирослава ПОЛУТРЕНКО, Ігор ФЕДОРОВИЧ,
Ярослав ФЕДОРОВИЧ*

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ГАЗОПРОВОДІВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019. E-mail: hrabovskyy.r@gmail.com*

*Roman HRABOVSKYY, Miroslava POLUTRENKO, Igor FEDOROVYCH,
Yaroslav FEDOROVYCH*

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECT OF OPERATIONAL FACTORS ON THE LONG EXPLOITED GAS PIPELINES WORKABILITY

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine. E-mail: hrabovskyy.r@gmail.com*

ABSTRACT. The influence of operational factors (surface defects, corrosive environment, durability of operation), surface hardening and anticorrosion surface treatment of metal of the gas pipeline on fatigue strength is investigated and on this basis we propose a way of repairing gas pipelines that complicate the formation of fatigue and corrosion-fatigue cracks on the surface of the pipes being processed.

KEY WORDS: *gas pipes, corrosive environment, crack-like defects, number of load cycles, corrosion-fatigue crack.*

ВСТУП

Досвід експлуатації та аналіз аварійних ситуацій на магістральних і місцевих газопроводах передбачає виконання комплексу організаційно-технічних заходів із діагностування та експертної оцінки технічного стану обстежуваних ділянок. Першочерговим завданням є визначення потенційно небезпечних ділянок, які вимагають особливої уваги. Для цього використовують засоби технічної діагностики, в основі яких є неруйнівний контроль [1, 2]. Його застосування надає інформацію про наявність дефектів та їх характеристику. Внутрішньо-трубна дефектоскопія дає можливість виявити як експлуатаційні, так і заводські дефекти, встановити їх форму та розміри, а також місцезнаходження на трасі газопроводу, однак, вона не надає інформації про стан ізоляції та електрохімічного захисту [3]. На цьому етапі важливим є також обстеження трубопроводів контактними електрометричними та електромагнітними методами, які забезпечують перевірку цілісності, крихкості та відшарування ізоляційних покривів із зовнішніми поверхнями труб та їх зварних з'єднань, тобто визначення їх довговічності [3]. Необхідно зазначити, що при достатньо хороших протикорозійних властивостях ізоляційних покривів під час тривалої експлуатації у них виявляють дефекти, пов'язані як із технологічними (особливостями приготування та транспортування, укладання та засипання трубопроводу), так і експлуатаційними (відхиленнями від режиму електрохімічного захисту, деградаційними змінами у структурі матеріалу покривів, впливом ґрунтових вод, а також впливом низькочастотних змін внутрішнього тиску в газопроводах) факторами.

На другому етапі на основі результатів попередніх оглядів ремонтних робіт важливим є встановлення найбільш ймовірних причин, які впливають на технічний стан газопроводів, а також оцінити виявлені корозійні та корозійно-втомні дефекти [4–9].

На третьому етапі за результатами технічного діагностування та аналізу їх за ступенем небезпеки і втрати працездатності визначають безпечні режими експлуатації газопроводів, а також характер, обсяги та черговість ремонтних робіт [3, 4].

Під час виконання роботи здійснено дослідження впливу експлуатаційних факторів (поверхневих дефектів, корозивного середовища, тривалості експлуатації тощо), поверхневого зміцнення та протикорозійної поверхневої обробки металу газопровідної труби на втомну міцність, і на цій основі запропоновано спосіб ремонту газопроводів, який утруднює утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні труб.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом розгляду є фрагмент труби з досліджуваної ділянки між КС „Красилів” та КС „Тернопіль” магістрального газопроводу „Київ–Західна Україна I нитка” ($D = 1020 \text{ mm}$, $t = 12 \text{ mm}$), який після 41 року експлуатації був вирізаний із повністю заміненого дефектного переходу та прилеглої ділянки загальною довжиною 127 метрів через автомобільну дорогу Тернопіль–Скалат [10]. Котушка, вирізана з труби, розрахованої для проектних напружень $\sigma_{\text{exp}} = 230 \text{ MPa}$, які відповідають проектному робочому тиску $p_{\text{exp}} = 5,4 \text{ MPa}$. Матеріал тривало експлуатованої газопровідної труби – сталь 17Г1С ($\sigma_U = 588,6 \text{ MPa}$, $\sigma_Y = 403,2 \text{ MPa}$, $\delta = 22,8 \%$, $\psi = 65,0 \%$), а також труба запасу – сталь 17Г1С ($\sigma_U = 560 \text{ MPa}$, $\sigma_Y = 375 \text{ MPa}$, $\delta = 26,5 \%$, $\psi = 68,3 \%$).

Для дослідження на втомну міцність металу газопровідних труб використовували переобладнану установку УКИ-6І [11], принципова схема якої зображена на рис. 1 а. Зразки вирізали із котушки труби згідно з розмірами, поданими на рис. 1 б.

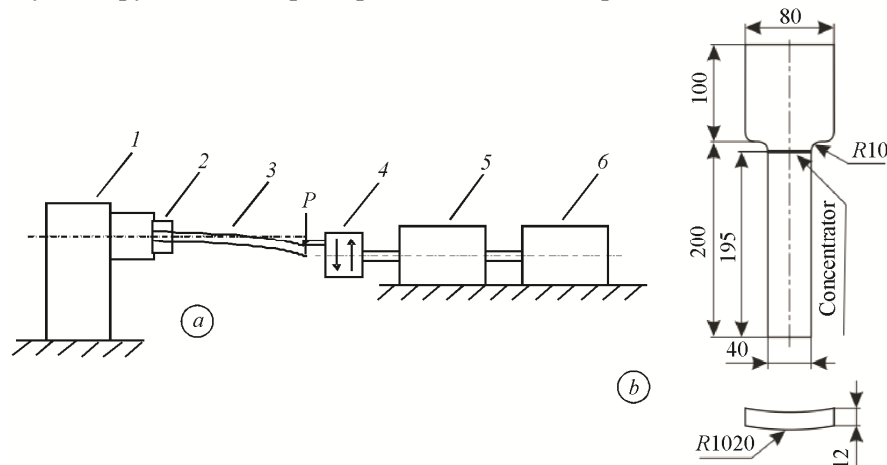


Рис. 1. Принципова схема установки УКИ-6І для випробування фрагментів труб на втомну міцність (а) та зразок для досліджень (б): 1 – нерухома опора; 2 – нерухомий затиск; 3 – фрагмент труби (зразок); 4 – навантажувальний пристрій; 5 – коробка швидкостей; 6 – електродвигун.

Fig. 1. Principal scheme of the device UKI-6I for the fragments of pipes for fatigue strength testing (a) and the sample for research (b): 1 – fixed support; 2 – fixed clamp; 3 – fragment of the pipe (sample); 4 – loading device; 5 – gearbox; 6 – electric motor.

Досліджувані фрагменти труб мали нарізаний на віддалі 10 mm від опори консольного защемлення V-подібний концентратор напружень глибиною 1 mm з кутом при вершині 60° і радіусом у його вершині не більше 0,1 mm.

Установка УКИ-6І (рис. 1 а) працює наступним чином. Коробка швидкостей 5, що жорстко з'єднана з електродвигуном 6, забезпечує через проміжний вал обертання навантажувального пристрою 4, який забезпечує віднульову синусоїдальну форму циклу втомного навантаження для досліджуваного фрагменту труби 3, закріпленого у затиску 2, який розміщений в нерухомій опорі 1. У такий спосіб забезпечується навантаження консольним згином досліджуваного фрагменту труби. Установка дозволяє виконання експериментальних досліджень за частоти $f = 3,0 \text{ Hz}$ причому у досліджуваних поперечних перерізах фрагментів труб забезпечує рівень нормальних напружень у діапазоні від їх робочих до екстремальних значень (σ_Y – границя текучості), а також дозволяє вивчати вплив експлуатаційних корозійних середовищ.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Досліджено вплив і причини усунення впливу експлуатаційних дефектів та корозивного середовища (рН = 6,7) NS4 (0,483 NaHCO₃ g/l; 0,120 KCl; 0,137 CaCl₂; 0,131 MgCl₂·H₂O), яке слугувало імітатором ґрунтового електроліту [12] на робоздатність тривало експлуатованих газопроводів. Температура досліджуваних середовищ була постійною $T = 20$ °С. Експериментально досліджували накопичення втомних пошкоджень під час циклічного пружно-пластичного деформування матеріалу газопровідних труб за жорсткою схемою навантажування консольним згином з амплітудами деформації $a = 3,5 \dots 4,8$ mm. Дослідження неексплуатованих та тривало експлуатованих зразків зі сталі 17Г1С здійснювали за циклічної частоти $f = 3,0$ Hz та максимально допустимого рівня навантаженості газопроводу $\sigma_2^* = 368$ МПа згідно з міркуваннями, наведеними на рис. 2.

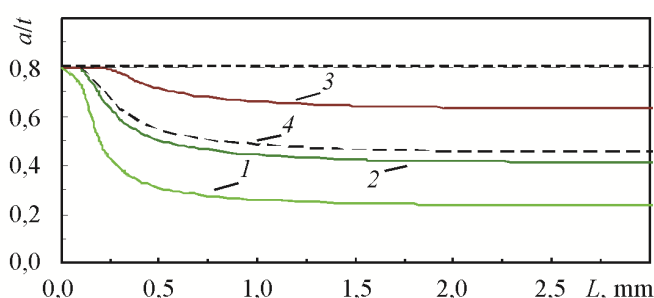


Рис. 2. Залежності глибини корозійно-механічних дефектів магістрального газопроводу „Київ – Західна Україна І нитка” з робочим тиском $p_{\text{exp}} = 5,4$ МПа від їх довжини:

1 – розраховано згідно з процедурою *SINTAP* ($S_r = 0,5$) [9]; 2 – розраховано за умови [6] $\sigma_2^* = 1,6 \cdot \sigma_{\text{exp}}$;
3 – розраховано згідно з процедурою *SINTAP* ($S_r = 1,0$); 4 – розраховано за умови $\sigma_{\gamma} = 403,2$ МПа.

Fig. 2. The dependences of the corrosive-mechanical defect depth on the length of the main gas pipeline „Kyiv-West Ukraine I thread” with working pressure $p_{\text{exp}} = 5,4$ МПа:

1 – calculated according to the procedure *SINTAP* ($S_r = 0,5$) [9]; 2 – calculated on condition [6] $\sigma_2^* = 1,6 \cdot \sigma_{\text{exp}}$;
3 – calculated according to the procedure *SINTAP* ($S_r = 1,0$); 4 – calculated on condition $\sigma_{\gamma} = 403,2$ МПа.

За результатами експериментів визначено кількість циклів до руйнування досліджуваного фрагмента труби. Результати експериментальних досліджень представлені у табл. 1.

Таблиця 1. Результати експерименту на втомну міцність фрагментів із труб експлуатованих та запасу без концентраторів та з нанесеними концентраторами на повітрі і середовищі NS4

Table 1. The results of the experiment on the fatigue strength of the exploited and stock pipes fragments without concentrators with applied concentrators in the air and in the environment NS4

Стан експлуатації	Умови експерименту	Середовище	N , cycles	σ^* , МПа	Результат експерименту
нова	без концентратора	повітря	10001395	371	без руйнування
експлуатована	без концентратора	повітря	10004358	368	без руйнування
нова	з концентратором	повітря	758667	369	руйнування
експлуатована	з концентратором	повітря	707954	366	руйнування
нова	з концентратором	NS4	325648	369	руйнування
експлуатована	з концентратором	NS4	297034	367	руйнування

Здійснено серію експериментів по зміцненню поверхні фрагментів труб, вирізаних із нового та експлуатованого газопроводу (рис. 3, табл. 2) згідно з методикою, розробленою у ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України [13, 14]. Очищені і знежирені фрагменти труб піддавали піскоструменевій обробці на спеціальному комплексі термоабразивної очистки КТО-1. Під час обробки поверхні труб запасу вибирали такі часові режими: 15, 40, 70, 100 s. Для обробки поверхні експлуатованих труб вибирали дещо більші часові режими: 25, 55, 90, 150 s. Зміцнення поверхні трубопроводу здійснювали шляхом її обробки кварцовим піском через

сопло піскоструменевого апарата діаметром 10 mm, розташованого на віддалі 70...150 mm вз кутом нахилу струменя піску до поверхні в межах 70...90°. Вихід піску через сопло відбувався під тиском $p \approx 0,5...0,55$ МПа.

Таким чином, виконані дослідження показали, що стабільність розподілу залишкових напружень у приповерхневих шарах труб запасу досягається при оптимальній тривалості режиму обробки, яка становить 40 s, тоді як для експлуатованих труб час обробки збільшується до 55 s.

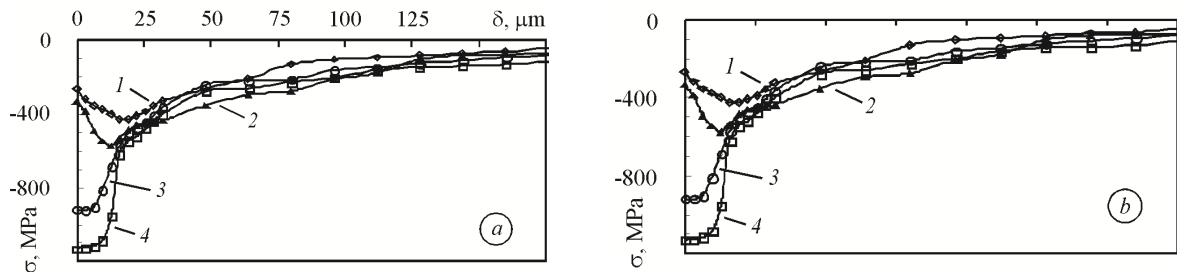


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень в поверхневих шарах фрагментів нових (а) та експлуатованих (б) труб: а) 1 – 15 s; 2 – 40 s; 3 – 70 s; 4 – 100 s; б) 1 – 25 s; 2 – 55 s; 3 – 120 s; 4 – 150 s.

Fig. 3. Distribution of the residual stresses in the surface layers of a new (a) and exploited (b) pipe fragments: a) 1 – 15 s; 2 – 40 s; 3 – 70 s; 4 – 100 s; б) 1 – 25 s; 2 – 55 s; 3 – 120 s; 4 – 150 s.

Таблиця 2. Результати експерименту на втомну міцність зміцнених за оптимальних режимів оброблення фрагментів труб із нанесеними концентраторами

Table 2. The results of the fatigue strength test of the pipes fragments with applied concentrators strengthened under the optimal regimes

Стан експлуатації	Умови експерименту	Середовище	N , cycles	σ^* , МПа	Результат експерименту
нова	з концентратором та піскоструменева обробка 40 s	NS4	2261847	366	руйнування
експлуатована	з концентратором та піскоструменева обробка 55 s	NS4	1981714	370	руйнування
нова	з концентратором, піскоструменева обробка 40 s, модифіковане покриття	NS4	5657412	364	руйнування
експлуатована	з концентратором, піскоструменева обробка 55 s, модифіковане покриття	NS4	5311374	367	руйнування

Також були підготовлені зразки труб із нанесенням розробленого інноваційного біостійкого протикорозійного покриття на бітумно-полімерній основі. На очищену і поверхнево зміцнену поверхню фрагментів досліджуваних труб, що містили концентратор напружень, наносили праймер, модифіковану біоцидом бітумно-полімерну мастику. Для зміцнення поверхні металу зверху модифікованої мастики додатково наклеювали ізоляційну стрічку. Завдяки запропонованому способу [15] покриття стало структурно-однорідним із високими показниками механічних властивостей. У результаті втомних випробувань у корозивному середовищі NS4 підготовлених таким чином фрагментів як із труб запасу, так і експлуатованих труб, що містили концентратори напружень, зміцнених піскоструменевою обробкою поверхонь, мало місце руйнування в обох випадках. Однак кількість циклів до руйнування поверхнево зміцнених та оброблених протикорозійно фрагментів досліджуваних труб більше у 2,5 рази від протикорозійно не оброблених (табл. 2). Одержані результати засвідчують, що запропонований спосіб

ремонт з використанням інноваційного біостійкого протикорозійного покриття сталевих трубопроводів суттєво утруднює утворення втомних і корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні газопровідних труб.

ВИСНОВКИ

За однакових умов виконання експерименту кількість циклів до руйнування відповідно поверхнево зміцнених фрагментів труб запасу майже у 7 разів більша порівняно з незміцненими фрагментами експлуатованих труб.

Поверхнєве зміцнення та протикорозійне оброблення фрагментів труб підвищує кількість циклів до їх руйнування більше, ніж у 2,5 рази.

Запропоновано спосіб ремонту сталевих трубопроводів із використанням інноваційного біостійкого протикорозійного покриття, яке включає праймер, модифіковану біоцидом бітумно-полімерну мастику та ізоляційну стрічку, що істотно утруднює утворення втомних і корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні газопровідних труб.

ЛІТЕРАТУРА

1. Комплекс технічних засобів для електромагнітного неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації / З.Т. Назарчук, А.Я. Тетерко, В.Г. Рибачук та ін. // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / наук. кер. Б.Є. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 39–42.
2. Методологія і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу / А.Я. Красовський, І.В. Ориняк, В.М. Тороп та ін. // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей / наук. кер. Б.Є. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 309–314.
3. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст]: наук.-техн. посіб.: у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; за ред. В.В. Панасюка. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – 457 с.
4. ДСТУ–НБ В.2.3.–21:2008. Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68 с.
5. Методика оцінки технічного стану труб газопроводу з тривалим строком експлуатації та його залишкового ресурсу (Затверджено ДК „Укртрансгаз” 15.07.2002), 72 с.
6. Методика продления срока безопасной эксплуатации магистральных газопроводов ОАО „Газпром” СТО Газпром 2-3.5-252-2008. Введ. 2009-04-15. – М.: ООО „ИРЦ Газпром”. – 60 с.
7. ANSI/B31G. Manual of determining the remaining strength of corroded pipelines - a supplement to ANSI/ASME B31G code for pressure piping. – New York: American Society of Mechanical Engineers, 1991.
8. DNV. Recommend Practic, RP-F101. Corroded pipelines. – Det Norske Veritas (Norway), 2000.
9. SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, Final Proc. Brite-Euram Project No BE95-1426. – Rotherham: British Steel, 1999. – 238 p.
10. Ільницький Ю.В. Аналіз відмов та аварій на магістральних газопроводах УМГ „Львівтрансгаз” і заходи для запобігання їх виникнення // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2012. – №2 (32). – С. 210–214.
11. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв’язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – №5. – С. 33–38.
12. Sensitivity of pipelines with steel API X52 hydrogen embrittlement / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – 33, № 24. – P. 7630–7641.
13. Бабей Ю.И., Бережницкая М.Ф. Метод определения остаточных напряжений первого рода. – Львов, 1980. – 66 с. (Препр./ АН УССР. Физ.-мех. ин-т; №30).
14. Бережницка М. Визначення залишкових макронапружень у призматичних і циліндричних стержнях // НТШ. Матеріалознавство та механіка матеріалів. – Т. 9. – Львів, 2003. – С. 80–86.
15. Патент України № 84769 на корисну модель МПК (2006): F16L 58/02. B08B 9/032. Спосіб ремонту сталевих трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Я.Т. Федорович, М.С. Полутренко, В.В. Рудко, І.Я. Федорович; заявник і власник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Реєстраційний номер заявки: а200613389; заявл. 25.03.2008; опубл. 25.11.2008, бюл. № 22.