

# РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМ МАКРОРОЗШАРУВАННЯМ\*

О.Т. Цирульник, Н.В. Крет, О.І. Звірко, Г.М. Никифорчин

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.  
E-mail: [otsyulnyk@gmail.com](mailto:otsyulnyk@gmail.com)

Проведено експертизу дефектності експлуатованих 40 років прямокутних колін/гинів труб компресорної станції газотранспортної системи та лінійної надземної ділянки 30 років експлуатованого магістрального газопроводу–перехід через водні перешкоди в гірській місцевості неруйнівним методом ультразвукового контролю товщини стінок труб з застосуванням товщиноміру з А/В сканом MVX (DakotaUltrasonics). Комплекс діагностичних ознак спричиненого воднем макророзшарування всередині стінки труби магістрального трубопроводу доповнено новою діагностичною електродіагностичною ознакою, а саме поляризаційним опором, за зниженням якого на величину > 30 % можна прогнозувати таке посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби, яке створює небезпеку виходу макродефекту на поверхню. Розроблено метод оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності труб системи магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням, який враховує роль водню в процесах розвитку такого типу макродефектів, експлуатаційну деградацію металу та використання неруйнівних методів контролю пошкодженості металу всередині труб. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* експлуатаційна деградація, сталі магістральних трубопроводів, діагностичні ознаки макророзшарування

Розшарування трубопровідних сталей є відомою проблемою. Цей тип дефектності може бути пов'язаний з металургійними особливостями отримання труб чи листового прокату, з якого виготовляють труби. Розшаруванню, зокрема, сприяють наявність частинок карбідів та інших неметалевих включень, мікротріщини на міжфазних межах зерен, текстура, смугастість структури, анізотропія пластичної деформації тощо [1, 2]. Важлива роль у їх розвитку належить атомарному водню, який дифундує до дефектів та накопичується у них, рекомбінуючи до молекулярного стану. Це створює надлишковий тиск у порожнині і, відповідно, напруження в її околі, які приводять до подальшого розшарування, змінюючи ступінь дефектності з мікро- на макрорівень. На стадії виготовлення труби це буде металургійний водень.

Макророзшарування може бути пов'язане не лише з металургійними особливостями отримання труб чи листового прокату, але і з умовами експлуатації трубопроводів. Водень, що утворюється у результаті корозійної чи біокорозійної взаємодії металу поверхні труби з ґрунтовим середовищем [3] чи транспортованим продуктом [4], дифундує до дефектів, молізується та накопичується у них, створюючи високий тиск та сприяючи утворенню розшарування та його поширенню. І що вища наводнювальна здатність середовища, то більший ризик прояву руйнування такого характеру.

Напруження, які виникають у металі в результаті інтенсивного наводнювання, можуть бути сумірні з його характеристиками міцності [5], тому руйнування можливе навіть за відсутності зовнішнього навантаження [6].

Посилюють утворення розшарування у трубах чинники, які сприяють декогезії на межі матриця–включення та інтенсифікують наводнювання металу. Це, зокрема, попереднє пластичне деформування, циклічне навантаження та підвищена температура експлуатації тощо.

**Діагностування лінійної ділянки магістрального газопроводу з макророзшаруванням.** Діагностування проводили ультразвуковим товщиноміром з А/В сканом MVX (Dakota Ultrasonics). Виявлені надзвичайно обширні розшарування на лінійній частині магістрального газопроводу в гірській місцевості. Зокрема, на двох ділянках лінійної надземної частини 30 років експлуатованого магістрального газопроводу – переходах через водні перешкоди у гірській місцевості. В одному випадку (рис. 1, а) макророзшарування виявили тільки у верхній частині труби, однак довжиною 4,5 м, а в іншому (рис. 1, б) – кільцеве розшарування по всьому тілу труби між двома сусідніми кільцевими зварними з'єднаннями, які й обмежили подальший розвиток дефекту. Розміри виявлених розшарувань в обох випадках виходять далеко за допустимі норми [7].

\* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

© О.Т. Цирульник, Н.В. Крет, О.І. Звірко, Г.М. Никифорчин, 2020

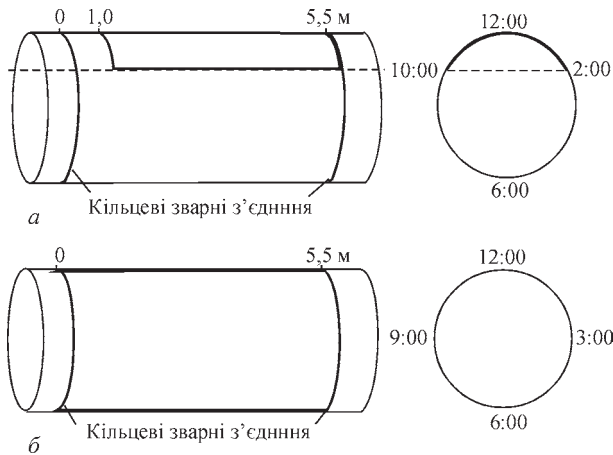


Рис. 1. Окреслені контуром розшарування всередині стінки труб магістрального газопроводу

**Діагностування дефектності гину труби відводу газу.** Дослідили гин експлуатованої 40 років відвідної від газокompресорної станції труби з зовнішнім діаметром 219 мм і номінальною товщиною стінки 18 мм (рис. 2). Гин розташований у надземній частині, максимальний робочий тиск в трубі 5,5 МПа, температура металу могла сягати 80 °С. Гин труби на 90° виконано холодним способом без термообробки. Матеріал труби – сталь 20.

Причиною діагностування стала поява на зовнішній поверхні труби в розтягнутій зоні гину про-

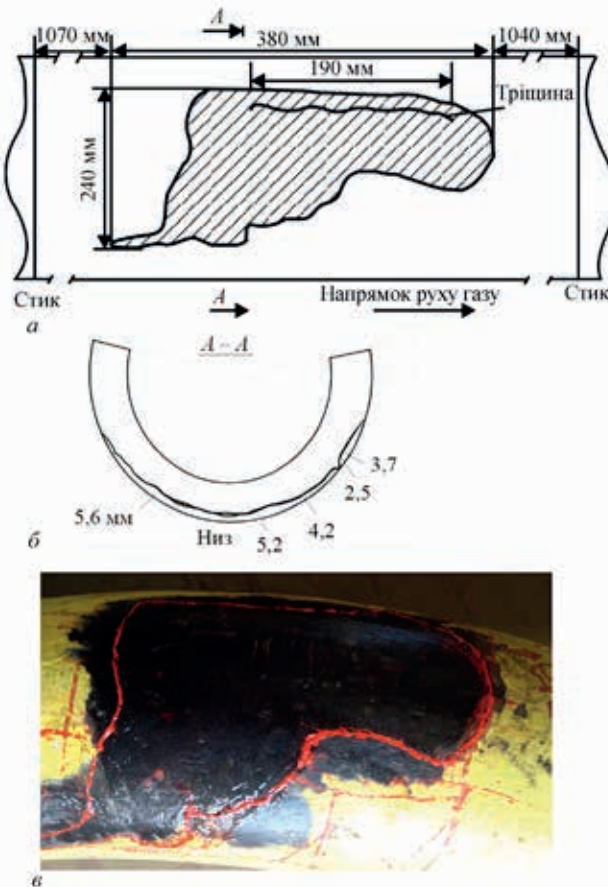


Рис. 2. Вигляд розшарування у стінці гину відвідної труби системи магістральних газопроводів (а), переріз труби з дефектом (б) та фото гину (в)

тяжної тріщини. Однак, це не спричинило розгерметизації трубопроводу, він надалі витримував у цій ділянці робоче навантаження, тому постало питання можливості подальшої безпечної експлуатації цього гину. Тріщина виходить на зовнішню поверхню гину не з контуру розшарування, тобто з вершини, а з середини поверхні розшарування, на значній віддалі від його контуру (приблизно 60 мм). Очевидно, що місце розриву вказує на максимальний напружено-деформований стан у стінці між поверхнею розшарування і зовнішньою поверхнею труби.

**Вплив експлуатаційних навантажень на поширення дефекту типу розшарування.** Методом гідроопресування проаналізували можливість поширення експлуатаційного розшарування на сусідні ділянки гину. Для цього гин експлуатованої 40 років відвідної від газокompресорної станції труби методом гідроопресування піддали внутрішньому тиску в півтора рази більшому за максимальний робочий, тобто при 8,25 МПа, що відповідає нормам на проведення опресування [8]. Повторний контроль виявив збільшення площі розшарування (рис. 3). Малоімовірно, щоб тріщина поширювалася під таким навантаженням за відсутності в порожнині розшарування тиску газу через вихід тріщини на зовнішню поверхню труби. Тому слід допустити, що у стінці труби сформувалося кілька внутрішніх сепаратних макропорожнин, а за гідроопресування здатні поширюватися лише ті, що закриті в об'ємі стінки гину.

**Діагностування дефектності гину труби вузлу заміру газу.** Діаметр труби - 426 мм, матеріал – сталь 20. Номінальна товщина труби 12,0 мм. І у цьому випадку виявили на великій площі її зовнішньої поверхні макророзшарування на розтягнутій частині гину (рис. 4). Розшарування розміром близько 800×450 мм охопило сегмент «7...12 год.», розташовується воно в основному ближче до внутрішньої поверхні труби. Однак на останніх стадіях розвитку розшарування з'явилася тенденція

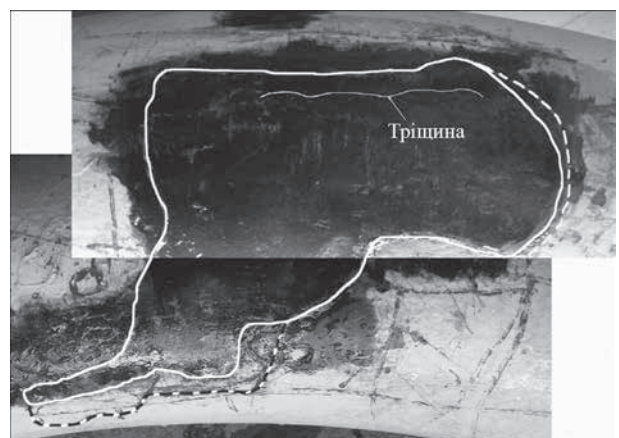


Рис. 3. Розшарування у стінці гину відвідної труби компресорної станції магістральних газопроводів (суцільна лінія) та його поширення після гідроопресування (штрихова лінія)

переміщення його контуру ближче до зовнішньої поверхні, де робочі напруження більші.

Дуже важливо, що повторним обстеженням цього об'єкту через 6 місяців виявили підростання дефекту (рис. 4, площа П). Адже відомо, що наявність дефектів типу розшарування цілком можлива ще на етапах виготовлення гинів труб, при виявленні яких дефектоскопією, за умови перевищення порогу чутливості методу діагностування, відбувається вибракування таких труб [7]. Однак, реальні умови тривалої експлуатації таких об'єктів спричиняють розвиток цих дефектів від мікро- до макророзмірів. Тому обов'язково потрібно встановити експлуатаційні чинники та механізм такого заповільненого підростання дефектів типу розшарування.

Поширення розшарування у стінці гину відвідної труби після гідропресування підтверджує висновок про ризик розвитку мікрodefektів типу розшарування до макророзмірів внаслідок дії експлуатаційних навантажень і актуалізує проблему діагностування

таких об'єктів системи транспорту вуглеводних продуктів з огляду на ризики їх аварійних відмов.

**Аналіз напруженого стану труби газопроводу з воднем, ініційованим макророзшаруванням.** Прийняли для подальших розрахунків наступні геометричні параметри труби та макрodefektу: зовнішній діаметр 440 мм, товщина стінки труби 18 мм, довжина дефекту уздовж осі труби 700 мм, кут його розхилу у поперечному перерізі «10...2 год.», тобто дефект знаходиться у верхній частині труби. Глибина залягання розшарування складає 4 мм від зовнішньої поверхні. Найбільше напруження на зовнішній поверхні труби буде в центрі відшарованої оболонки (над розшаруванням), тобто відповідати «12 год.» і середині вздовж осі труби, що склало задачу для розрахунку. Прийняли два значення тиску в трубі  $p$ , 3 та 7 МПа, враховуючи можливий діапазон робочих тисків у газопроводі. Розглядали різний тиск водню у порожнині  $p_H$ , обмеживши його значенням 7 МПа, зважаючи на те, що напруження, спричинені тиском молекулярного водню в дефектах (внутрішніх порожнинах), можуть бути співмірні та вищі за границю витривалості сталі згідно з теоретичними розрахунками та експериментальними даними [9]. В результаті визначали тангенціальні напруження  $\sigma_\theta$ , як найважливіші з огляду на порушення цілісності труби, а також еквівалентні напруження  $\sigma_{eq}$  за IV теорією міцності Губера-Мізеса. Характер впливу тиску водню у порожнині стінки труби на рівень тангенціальних та еквівалентних напружень у загальному однаковий. Напруження на зовнішній поверхні труби збільшуються зі зростанням  $p_H$  (рис. 5, 6), а на внутрішній – спадають.

Розраховані напруження є досить високими, зважаючи на можливість розриву верхнього шару металу (відшарування) над порожниною. Зокрема, за максимально прийнятого тиску водню 7 МПа вони близькі до границі плинності, для прикладу, ферито-перлітних сталей, що широко застосовуються у газотранспортній мережі. Якщо ж допустити у два рази менші напруження, то вони приблизно відповідатимуть границі втомної витривалості, що теж складає небезпеку руйнування. При цьому високі напруження у металі довкола дефекту обумовлюють об'єднання окремих тріщин та утворення розшарування значної площі. Існує небезпека порушення цілісності верхнього шару металу над макрodefektом за механізмом корозійно-механічного руйнування, коли тріщина розвивається перпендикулярно поверхні розшарування і виходить на зовнішню поверхню труби. Необхідні для цього напруження можуть бути ще меншими, оскільки тріщиностійкість експлуатованого металу може різко знизитися порівняно з вихідним станом, і, крім того, тріщина буде рости у наводненому матеріалі, що істотно впливає на швидкість її поширення [10].

**Електрохімічна оцінка деградації механічних властивостей експлуатованої трубної сталі.**

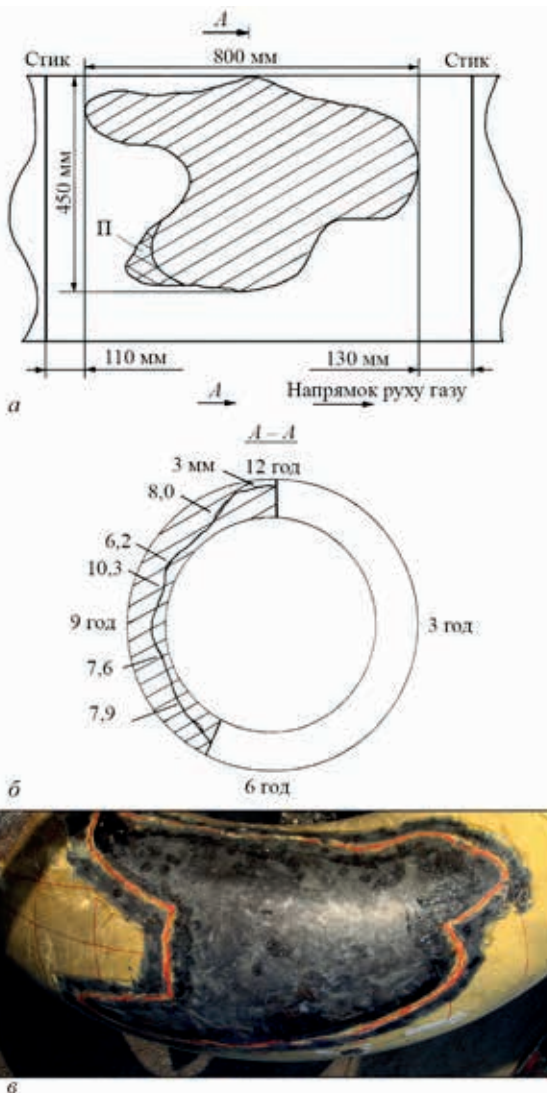


Рис. 4. Вигляд розшарування у стінці гину відвідної труби системи магістральних газопроводів (а) та його поширення впродовж експлуатації (П), а також переріз труби з дефектом (б) та фото гину (в)

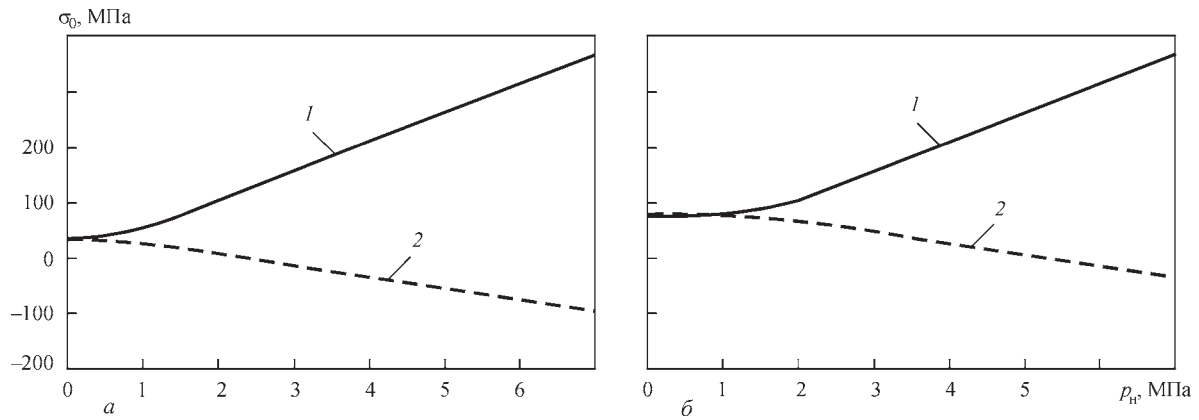


Рис. 5. Залежність тангенціальних  $\sigma_0$  напружень на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхні труби (точка «12 год.») від тиску водню  $p_H$  у порожнині; тиск в трубі  $p = 3$  (а) та 7 МПа (б)

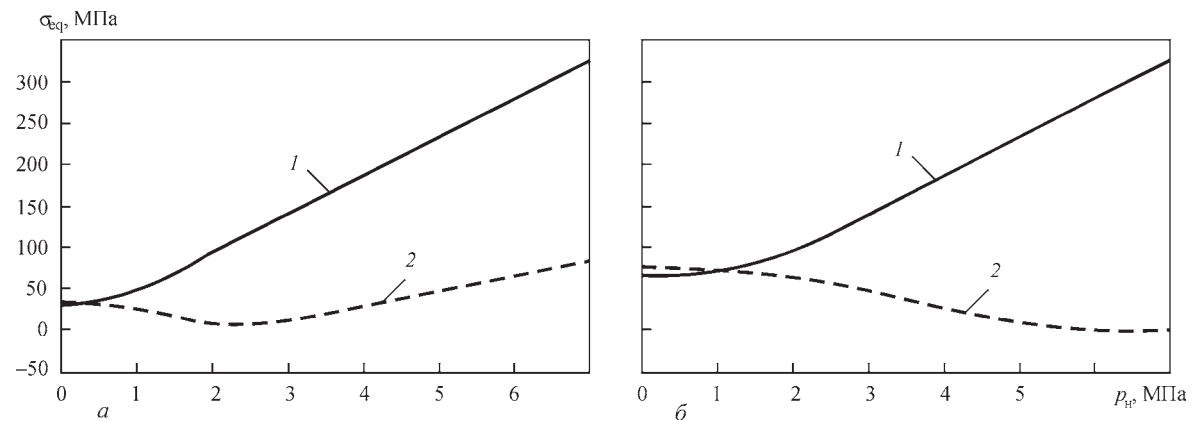


Рис. 6. Залежність еквівалентних  $\sigma_{eq}$  напружень на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхні труби (точка «12 год.») від тиску водню  $p_H$  у порожнині; тиск в трубі  $p = 3$  (а) та 7 МПа (б)

**Електрохімічні характеристики вуглецевої сталі 20 різних ділянок експлуатованого гину відвідної труби газотранспортної системи у 8,55-мілімольному водному розчині  $\text{NaHCO}_3$**

Ділянка гину труби	Потенціал корозії $E_{\text{корр}}$ , В	Густина струму корозії $i_{\text{корр}}$ , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Константи Тафеля, В		Поляризаційний опір $R_p$ , Ом $\times$ см $^2$
			$-b_c$	$b_a$	
Пряма	-0,686	2,84	0,100	0,057	5558
Стиснута	-0,690	3,36	0,100	0,057	4698
Розтягнута	-0,695	3,48	0,100	0,057	4536
Над розшаруванням	-0,697	4,30	0,100	0,057	3671

Проаналізували деградацію електрохімічних та механічних властивостей сталі гину відвідної труби газотранспортної системи стосовно можливості застосування неруйнівного електрохімічного методу для оцінювання опору крихкому руйнуванню.

Отримані результати досліджень вказують на корозійну деградацію металу експлуатованого гину труби. При цьому поляризаційний опір  $R_p$  металу розтягнутої ділянки на 15...20 %, а металу над розшаруванням біля розриву поверхні – на 30...35 % нижчий, ніж металу прямої ділянки (таблиця), що зумовлено зростанням напружено-деформованого стану.

Таким чином, комплекс діагностичних ознак спричиненого воднем макророзшарування всередині стінки труби магістрального трубопроводу доповнено новою діагностичною електрохімічною ознакою, а саме поляризаційним опором.

Звідси, застосовуючи неруйнівний електрохімічний метод контролю поляризаційного опору  $R_p$

зовнішньої поверхні труби у польових умовах, за його зниженням на величину > 30 % можна прогнозувати таке посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби, яке створює небезпеку виходу макродефекту на поверхню.

На основі проведених досліджень розроблено технологічний регламент, який включає проведення експертизи на наявність та розміри макророзшарування, вимірювання електрохімічного показника стану металу – поляризаційного опору, а також оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням. Проведено його апробацію на підприємстві «Прикарпаттрансгаз».

**Висновки**

Виявлено дефекти типу розшарування у стінці труби лінійної надземної ділянки 30 років експлуатованого магістрального газопроводу в гір-

ській місцевості, а також розшарування у колінах відвідної труби і труби вузлу заміру газу газокомпресорної станції. Повторним обстеженням (через 6 місяців) виявлено підростання дефекту. Це дає підстави зробити висновок, що саме реальні умови експлуатаційного навантаження таких об'єктів спричиняють розвиток цих дефектів від мікро- до макророзмірів. Цей висновок підтверджується підростанням дефекту під час гідропресування.

Методом граничних інтегральних рівнянь розраховано еквівалентні та тангенціальні напруження на зовнішній поверхні труби в центрі над макророзшаруванням залежно від робочого тиску природного газу та тиску водню у дефекті певної геометрії. Вони суттєві, що вказує на небезпеку руйнування верхнього над макродефектом шару металу за різними механізмами: пластичного розриву перетинки, втомного та корозійно-механічного руйнування.

Запропоновано нову діагностичну електрохімічну ознаку досягнення граничного технічного стану труби з розшаруванням, а саме поляризаційний опір, за зниженням якого на величину > 30 % можна прогнозувати таке посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби, яке створює небезпеку виходу макродефекту на поверхню. На її основі розроблено метод оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності труб системи магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням.

Розроблено технологічний регламент використання запропонованого методу оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням та проведено його апробацію на підприємстві «Прикарпаттрансгаз».

### Список літератури

1. Baldi, G., Buzzichell, G. (1978) Critical stress for delamination fracture in HSLA steels. *Metal Science*, **12**, 459–472.
2. Bourell, D.L., Sherby O.D. (1983) Texture induced cleavage delamination of warm-rolled low carbon steels. *Met. Trans. A.*, **14A**, **12**, 2563–2566.

3. Крыжанивский Е., Никифорчин Г., Полутренко М. (2013) Коррозионно-водородная деградация газотранспортных систем и способы ее предупреждения. *Сб. докл. Межд. научно-техн. конф. «Надежность и эффективность газотранспортных систем»*, Яремче, 2013, 117–128.
4. Цирульник О.Т., Слободян З.В., Звірко О.І. та ін. (2008) Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **44**(5), 29–37.
5. Андрейків О.Є., Гембара О.В. (2008) *Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах*. Київ, Наукова думка.
6. Turnbull, A. (1993) Modeling of environment assisted cracking. *Corrosion Science*, **34**(6), 921–960.
7. (2007) Specification for line pipe steel API5L, API.
8. СНиП 2.05.06-85. *Магістральні трубопроводи*.
9. Crolet J.L., Maisonneuve G. (2000) Construction of a universal scale of severity for hydrogen cracking. *CORROSION 2000* (26–31 March, Orlando, Florida). Houston TX: NACE International, 2000, Paper № 00127.
10. Андрейків О.Є., Гембара О.В., Цирульник О.Т., Ниркова Л.І. (2012) Оцінювання залишкової довговічності ділянки магістрального газопроводу «Уренгой–Помарі–Ужгород». *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **48**(2), 103–110.

### References

1. Baldi, G., Buzzichell, G. (1978) Critical stress for delamination fracture in HSLA steels. *Metal Sci.*, **12**, 459–472.
2. Bourell, D.L., Sherby O.D. (1983) Texture induced cleavage delamination of warm-rolled low carbon steels. *Met. Trans. A.*, **14A**, **12**, 2563–2566.
3. Kryzhanivskiy, E., Nikiforchin, G., Polutrenko, M. (2013) Corrosion-hydrogen degradation of gas transportation systems and methods of its prevention. *In: Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Reliability and Effectiveness of Gas Transportation Systems* (Yaremche, 2013), 117–128.
4. Tsyryulnyk, O.T., Slobodyan, Z.V., Zvirko, O.I. et al. (2008) Impact of service of X52 steel on corrosion process in a model solution of gas condensate. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **44**(5), 29–37 [in Ukrainian].
5. Andreikiv, O.E., Gembara, O.V. (2008) Fracture mechanics and fatigue life of metallic materials in hydrogen-containing environments. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
6. Turnbull, A. (1993) Modeling of environment assisted cracking. *Corrosion Sci.*, **34**(6), 921–960.
7. (2007) Specification for line pipe steel API5L, API.
8. SNiP 2.05.06-85. Main pipelines.
9. Crolet, J.L., Maisonneuve, G. (2000) Construction of a universal scale of severity for hydrogen cracking. *CORROSION 2000* (26–31 March, Orlando, Florida). Houston TX: NACE International, 2000, Paper 00127.
10. Andreikiv, O.E., Gembara, O.V., Tsyryulnyk, O.T., Nyrkova, L.I. (2012) Evaluation of residual life of a section of the main pipeline «Urengoi–Pomary–Uzhgorod». *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **48**(2), 103–110 [in Ukrainian].

## DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR ASSESSMENT OF SERVICEABILITY AND RESIDUAL LIFE OF THE MAIN PIPELINES WITH SERVICE MACRODELAMINATION

O.T. Tsyryulnik, N.V. Kret, O.I. Zvirko, G.M. Nikiforchin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: otsyryulnyk@gmail.com

Expert examination of defectiveness of rectangular elbows/bends of pipes in a compressor station of gas transportation system after 40 years of operation and of a linear above-ground section of the main gas pipeline-crossing over water obstacles in a mountain area after 30 years of operation was performed by nondestructive method of ultrasonic testing of pipe wall thickness with application of thickness meter with A/B scan MVX (DakotaUltrasonics). A set of diagnostic indications of hydrogen-induced macrodelaminations inside the pipe wall of a main pipeline was complemented by a new diagnostic electrochemical feature, namely polarization resistance. Its lowering by > 30 % allows prediction of such an enhancement of the stress-strain state on the pipe outer surface, which creates a risk of the macrodefect reaching the surface. A method was developed for evaluation of serviceability and residual life of pipes in a system of the main pipelines with service macrodelaminations, which allows for hydrogen role in the processes of development of such a type of macrodefects, service degradation of metal and application of nondestructive testing methods for controlling the level of metal damage inside the pipes. 10 Ref., 1 Table, 6 Fig.

*Keywords: service degradation, steels of the main pipelines, diagnostic features of macrodelamination*

Надійшла до редакції 09.07.2020