

*Людмила НИРКОВА, Сергій МЕЛЬНИЧУК, Анатолій РИБАКОВ,
Світлана ОСАДЧУК*

**ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ
НА КОРОЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ
В УМОВАХ КОМПЛЕКСНОГО ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ**

*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150. E-mail: lnyrkova@gmail.com*

Lyudmyla NYRKOVA, Sergiy MELNYCHUK, Anatoliy RYBAKOV, Svitlana OSADCHUK

**INFLUENCE OF INCREASING OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF PIPE
STEEL ON CORROSION PROPERTIES OF MAIN PIPELINES IN THE COMPLEX
ANTICORROSION PROTECTION CONDITIONS**

*Ye.O. Paton Electric-Welding Institute of the NAS of Ukraine
11, Kazimir Malevich Str., Kyiv, 03150, Ukraine. E-mail: lnyrkova@gmail.com*

ABSTRACT

Comparative researches of corrosion, electrochemical and corrosion-mechanical properties of steel with different strength grade, namely X70 and X80, with the aim of analyzing of prospects of its application for main pipelines under complex anticorrosion protection were carry out.

It was established, that in an environments with near neutral pH corrosion rate of X80 steel with increased strength grade a bit higher comparatively to X70 steel. Polarization promoted in some extent the increasing of anodic dissolution of steel with the higher strength grade, but a mechanism remained unchanging, and determined by the speed of oxygen delivery to the metal surface. The conformities of corrosion behavior indicate that during exploitation of pipeline with increased strength grade in soils with near neutral pH it is possible to expect the formation of deeper corrosion damages under the peeling coating. Under these conditions, it was marked the easing of hydrogen reduction on X80 steel, which is necessary take into account at the choice of maximum protective potentials of pipes maked of this steel, in order to avoid the hydrogen charging of pipe wall.

Under combined influence of static loading and cathodic polarization, for X80 steel with increased strength grade the intergranular corrosion is more typical that can be stipulated by penetration of atomic hydrogen to the crystalline grate of metal; for steel with the less strength grade X70 the subsurface corrosion is more typical. Propagation of intergranular corrosion in the pipe metal is more dangerous during exploitation, because can result in cracking under strain tension. Analyzing the corrosion-mechanical researching results received by the method of slow rate deformation a new criterion of comparative estimation of inclination to SCC of different high-strength grade steel was offered. A criterion based on the analyzing of time to the crack initiating to time to break-up the specimen. It was established, that with increasing of strength grade of the steel at different levels of cathodic polarization inclination to SCC was increased.

By the regularity of electrochemical destruction of epoxy coating at potential -1,5 V it is possible to assume that during exploitation on areas with the temperature cyclic changes, peeling of coating in the first month of exploitation will run with high speed on pipelines of X70 steel compared to X80. However, at less negative potentials and with time it will possible change in peeling mechanism.

KEY WORDS: *high-strength steel grades, main pipelines, potentiometry, polarization curve, stress corrosion cracking.*

ВСТУП

Одним з головних стратегічних шляхів розвитку трубного виробництва на сучасному етапі і, зокрема, трубопровідного транспорту, є вирішення проблем безпеки, надійності і зниження аварійності трубопровідних систем. Вирішення цих проблем можливе в умовах, що гарантують необхідний рівень споживчих властивостей трубної продукції. При цьому слід враховувати, що за останні роки значно зросла агресивність видобутої продукції газоконденсатних і нафтових родовищ, що пов'язано, насамперед, зі збільшенням у газі, що добувається, такого агресивного компонента, як сірководень. Наявність сірководню, вологи, хлорид-

іонів призводить до суттєвого прискорення корозійних процесів і перебігу таких специфічних видів корозії сталі, як водневе розшарування, сірководневе розтріскування, пітингова корозія, корозійне розтріскування від напруження (КРН) тощо.

Сталеві трубопроводи, у тому числі зі сталі підвищеної міцності, в реальних умовах експлуатації піддаються комплексному напружено-деформаційному впливу, причому не тільки під дією високих внутрішніх тисків, але й внаслідок додаткових напружень та деформацій, зумовлених зміщенням ґрунтів, що сприяє корозії стінки, і зокрема, КРН. КРН таких трубопроводів залежить від комбінації прикладеного напруження, присутності водню та анодного розчинення у вершині тріщини, причому наводнювання стінки прискорює процес розчинення.

Катодна поляризація, яка застосовується для електрохімічного захисту магістральних трубопроводів, у тому числі з трубної сталі підвищеної міцності, за потенціалу $-1,0$ В (с.к.е.) у середовищах з рН, близьким до нейтрального, викликає схильність до наводнювання, яка підвищується у разі прикладення розтягувальних напружень, та сприяє втраті пластичності сталі тим більше, чим більша її міцність [1-5]. Включення у сталі, збагачені оксидами алюмінію, титану, кремнію, карбід заліза й дислокації є пастками для атомів водню, можуть сприяти утворенню тріщин, навіть за відсутності зовнішнього розтягування і їх розташування, переважно, біля цих включень [6-7]. Крім того, за катодної поляризації існує критичний діапазон потенціалів (який може бути різним для сталі різних категорій міцності), в якому сталь знаходиться в нерівноважному електрохімічному стані, і анодне розчинення може перебігати навіть за катодного захисту [8]. Якщо наведений потенціал позитивніший, ніж у критичному діапазоні, КРН перебігає за механізмом анодного розчинення, якщо від'ємніший – за механізмом водневого окрихчення. За потенціалу критичного діапазону КРН перебігає за сумісного впливу обох механізмів, і анодне розчинення на трубопроводі може відбуватися за катодної поляризації. Як правило, при рН, близьких до нейтральних, механізм електрохімічної корозії зварних з'єднань зі сталі, у тому числі підвищеної міцності, суттєво не змінюється ні при наводнюванні, ні при напруженні, ні за сумісного впливу обох чинників: наводнювання лише змінює локальну активність розчинення зварного з'єднання, підвищення напруження і сприяє пришвидшенню анодного процесу у вершині тріщини [9].

Підвищення температури під час нанесення покриттів призводить до старіння сталі підвищеної міцності [10], про що свідчать збільшення міцності та зменшення пластичності. Зістарена сталь більш схильна до КРН за потенціалів катодного захисту внаслідок збільшення швидкості проникнення водню в кристалічну ґратку металу та його вмісту.

Незважаючи на інтенсивний розвиток виробництва нових видів трубної сталі підвищеної міцності, до цих пір недостатньо інформації щодо зв'язку характеристик міцності з корозійними властивостями, тому мета роботи полягала у встановленні, як впливає підвищення міцності трубної сталі на електрохімічні та корозійно-механічні властивості, у тому числі схильність до КРН, під час застосування комплексного протикорозійного захисту.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Слід відмітити, що труби зі сталі підвищеної міцності застосовуються і у видобувній промисловості, і в газотранспортній системі. Комплекс досліджень, представлений у цій роботі, спрямований на аналіз перспектив застосування високоміцної сталі саме для магістральних трубопроводів в умовах комплексного протикорозійного захисту. Для цього проведено порівняльні дослідження корозійних, електрохімічних та корозійно-механічних властивостей трубної сталі категорій X70 та X80, границі міцності яких дорівнювали 640 МПа – для X70 і 691 МПа – для X80.

Під час досліджень моделювали умови, наближені до умов експлуатації магістральних трубопроводів, які експлуатуються на території України. Для цього випробування виконували у середовищі з рН, близьким до нейтрального, а саме, модельному ґрунтовому електроліті (NS4 за європейськими стандартами складу, г/л: 0,037 KCl + 0,559 NaHCO₃ + 0,008 CaCl₂ + 0,089 MgSO₄, рН 8,2, електропровідність 0,087 См/см), далі – МГЕ.

Щоб отримати найбільш повне уявлення про їх поведінку, проведено такі дослідження:

- оцінено швидкість корозії методом масометрії впродовж тривалого часу (~ 1000 год);
- виміряні потенціали корозії та поляризаційні криві;

- досліджено стійкість в умовах статичного навантаження впродовж тривалого часу (~ 1 рік);
- досліджено стійкість проти КРН;
- досліджено особливості катодного відшарування за кімнатної та циклічної зміни температур.

Під час виконання роботи застосовували стандартні корозійні, електрохімічні, оптичні методи та методичні підходи, які запропоновані та відпрацьовані у цій роботі вперше.

Корозійні та електрохімічні дослідження. Після корозійних випробувань на зразках утворилися продукти корозії чорного кольору, які рівномірно вкривали поверхню. Шар продуктів корозії був пухким, неміцно прилягав до поверхні та досить легко видалявся. Після його видалення поверхня сталі обох категорій міцності залишалася гладкими, матовими, корозійні плями та виразки відсутні, характер корозії оцінено як суцільну рівномірну згідно з ГОСТ 9.908; швидкість суцільної корозії сталі X80 з підвищеними показниками міцності дещо більша проти сталі X70: 0,0227 мм/рік і 0,0216 мм/рік відповідно (табл. 1).

Таблиця 1. Корозійні та електрохімічні характеристики трубної сталі категорій X70 та X80 у МГЕ
Table 1. Corrosion and electrochemical characteristics of pipe steel of strength grade X70 and X80 in NS4 solution

Швидкість корозії, mm/year		Потенціал корозії, V		Тафелівський нахил, V		Потенціал початку виділення водню, V	
X70	X80	X70	X80	X70	X80	X70	X80
0,0216	0,0227	-0,687	-0,684	0,111	0,074	-0,950	-0,850

Для отримання початкової інформації щодо властивостей матеріалів застосовують електрохімічні методи, які є одними з найбільш поширених експрес-методів досліджень. У цій роботі при порівнянні особливостей корозійної та електрохімічної поведінки трубної сталі категорій X70 та X80 застосовували методи потенціометрії та поляризаційних кривих.

На рис. 1, *a* наведено зміну потенціалу корозії досліджуваних зразків з часом, з якого видно, що упродовж перших 10 хв значення потенціалу корозії швидко зміщувалися в негативний бік майже на 0,1 В, але на сталі X80 в перші 30 хв встановився позитивніший потенціал корозії, ніж на X70. Через 30 хв значення потенціалів вирівнялися, і далі криві залежності практично співпадали; значення потенціалів, які встановилися, дорівнювали -0,687 В для X70 та -0,684 В для X80.

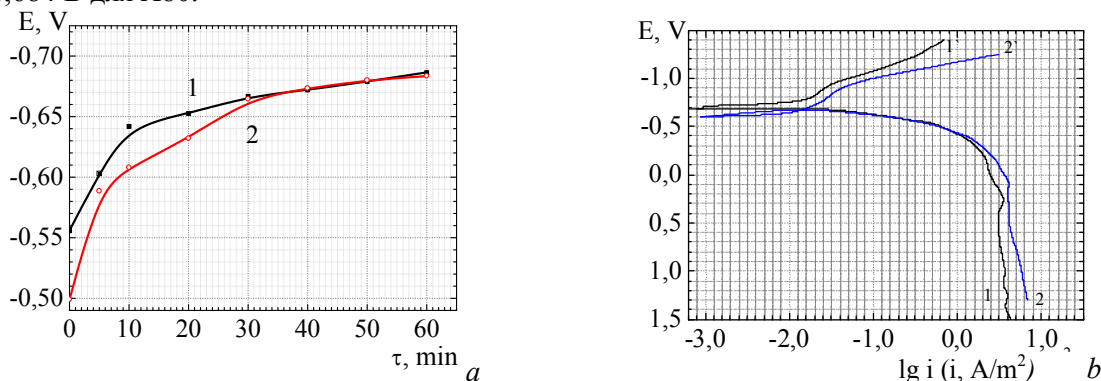


Рис. 1. Зміна потенціалу корозії в часі (*a*) та поляризаційні криві (*b*) трубної сталі категорій X70 (1) та X80 (2) у МГЕ в умовах вільного доступу кисню за кімнатної температури.

Fig. 1. Change of corrosion potential in time (*a*) and polarization curves (*b*) of pipe steel specimens of strength grade X70 (1) and X80 (2) in NS4 solution at a room temperature.

Аналізуючи характер анодних кривих у широкому діапазоні потенціалів, можна відмітити (рис. 1, *b*), що після області активного анодного розчинення, довжина якої становила близько 0,110 В (від потенціалу корозії до потенціалу ~ -0,570 В) для сталі X70 і 0,170 В (від потенціалу корозії до потенціалу ~ -0,500 В) – для X80, спостерігалася ділянка, на якій процес активного анодного розчинення уповільнювався внаслідок утворення та затримування на поверхні зразків продуктів корозії, після цього анодне розчинення протікало з меншою швидкістю. Обчислені значення Тафелівських нахилів обох сталей дещо вищі, ніж ті, що властиві для процесу, який перебігає з дифузійним контролем, імовірно, внаслідок утрудненого транспортування кисню до поверхні, що кородує, і становлять ~ 0,111 В для X70 і 0,074 В для

X80. Дещо завищені значення Тафелівського нахилу для сталі X70 можна пояснити утворенням більш щільного шару продуктів корозії, через який утруднюється потрапляння кисню до поверхні. Як видно із співставлення анодних кривих (рис. 1, *b*, криві 1 і 2), область активного розчинення сталі X70 дещо коротша, ніж X80, що також підтверджує висловлене припущення щодо можливого утворення щільнішого шару продуктів корозії та корелює з результатами, отриманими методом масометрії.

З аналізу катодних кривих (рис. 1, *b*, криві 1' і 2') можна зробити висновок про те, що:

- граничний струм відновлення кисню на сталі X80 дещо більший, ніж на сталі X70;
- потенціал початку виділення водню на сталі X80 ~ на 0,1 В позитивніший, ніж на X70, відповідно - 0,85 В та -0,95 В;
- швидкість активного виділення водню на сталі X80 також менша, ніж на сталі X70.

Корозійно-механічні дослідження (в умовах статичного навантаження і деформації з повільною швидкістю). Для отримання інформації щодо корозійної тривкості основного металу зразків сталі різного рівня міцності в умовах впливу статичного навантаження $0,95\sigma_T$ за наведеного захисного потенціалу -1,5 В (х.с.е.) проведено дослідження цих сталей упродовж тривалого часу (~ 1 рік). Після випробувань згідно з ГОСТ 9.908 оцінювали зовнішній вигляд поверхні зразків, ідентифікували та класифікували типи корозійних уражень за їх виглядом, в тому числі, за геометричними змінами в біляповерхневих шарах. За результатами проведених досліджень (рис. 2, *a*) встановлено, що на поверхні зразка сталі X70 виявлені окремі ділянки підповерхневої корозії довжиною від 0,116 мм до 0,281 мм і глибиною від 0,01 мм до 0,017 мм і локальні ділянки міжкристалітної корозії, яка розповсюджується на довжину 0,132 мм та глибину 0,43 мм. Такий вид корозії може бути пов'язаний із проникненням атомарного водню, що утворюється в електроліті під дією катодної поляризації, в кристалічну ґратку металу. Атомарний водень здатний проникати вглиб металу по границях зерен, накопичуватися, рекомбінувати та розширювати ці границі, по яких вглиб сталі починає проникати електроліт, що зумовлює такого виду корозійне ураження.

У приповерхневих шарах зразків зі сталі X80 виявлена достатньо рівномірна поверхнева корозія (рис. 2, *b*) глибиною від 0,005 мм до 0,007 мм, простежуються окремі ділянки міжкристалітної корозії довжиною від 0,132 мм до 0,495 мм та глибиною від 0,06 мм до 0,07 мм. Транскристалітних тріщин у біляповерхневих шарах сталі обох категорій не знайдено.

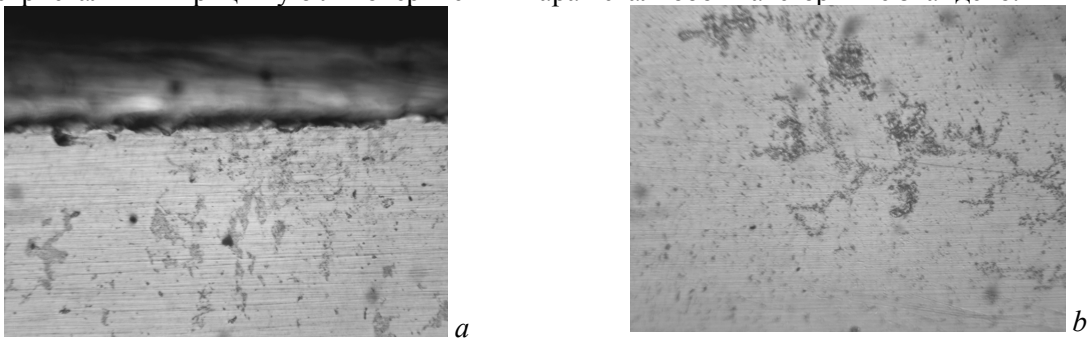


Рис. 2. Підповерхнева корозія в біляповерхневому шарі сталі X70 (*a*) і міжкристалітна корозія в біляповерхневому шарі сталі X80 (*b*) після випробувань в МГЕ. Травлення в пікралі, $\times 500$.

Fig. 2. Subsurface corrosion in the near surface layer of X70 steel (*a*) and intergranular corrosion in the near surface layer of X80 steel of X80 (*b*) after tests in NS4 solution. Etching in a picric acid, $\times 500$.

Порівняльні дослідження схильності трубної сталі різного рівня міцності до КРН проводили при змінному змочуванні [11-12] за різних потенціалів. Як було відмічено вище, сталь досліджуваних категорій міцності має різні механічні властивості, тому для порівняння їх схильності до КРН розроблено такий методичний підхід. По-перше, запропоновано початкове напруження задавати у пружній області на рівні 70 % від границі текучості для кожної сталі. По-друге, на основі аналізу наявних літературних даних і результатів проведених досліджень для порівняння схильності до КРН сталі з різним рівнем міцності запропоновано новий критерій, $T_{КРН}$, який ґрунтується на аналізі тривалості часу від зародження тріщини до руйнування у повітрі та у розчині.

Математично критерій обчислюється, як відношення різниці часу до руйнування та часу до зародження тріщини у повітрі до аналогічної різниці часів у розчині:

$$T_{KPH} = \frac{(\tau_{руйн} - \tau_{з.м.})_n}{(\tau_{руйн} - \tau_{з.м.})_p}$$

де $\tau_{руйн}$ – час до руйнування зразків, $\tau_{з.м.}$ – час до зародження тріщини.

Час до руйнування визначали фактично, час до зародження тріщини – графічно з усереднених кривих по точці перегину відповідно до діаграми руйнування [13].

Для підтвердження правомірності застосування запропонованого критерію під час порівняння схильності трубної сталі різної категорії міцності до КРН аналізували корозійно-механічні властивості, у тому числі значення критерію T_{KPH} , за різних потенціалів. Як додаткові критерії застосовували площу поперечного перерізу у місці руйнування S , відносне звужування Ψ та критерій K (відношення відносного звужування у повітрі до відносного звужування у розчині), запропонований у попередніх роботах [14].

Схожими рисами у поведінці сталі категорії X70 і X80 при зміні потенціалу від потенціалу корозії до максимального захисного (за абсолютним значенням) відмічені (рис. 3):

- зміна характеру руйнування від в'язкого за потенціалу корозії до крихкого з в'язким доломом за потенціалів катодного захисту (-0,750 В та -1,0 В), рис. 3 (1);
- збільшення значень критерію T_{KPH} для сталі X70 та X80.

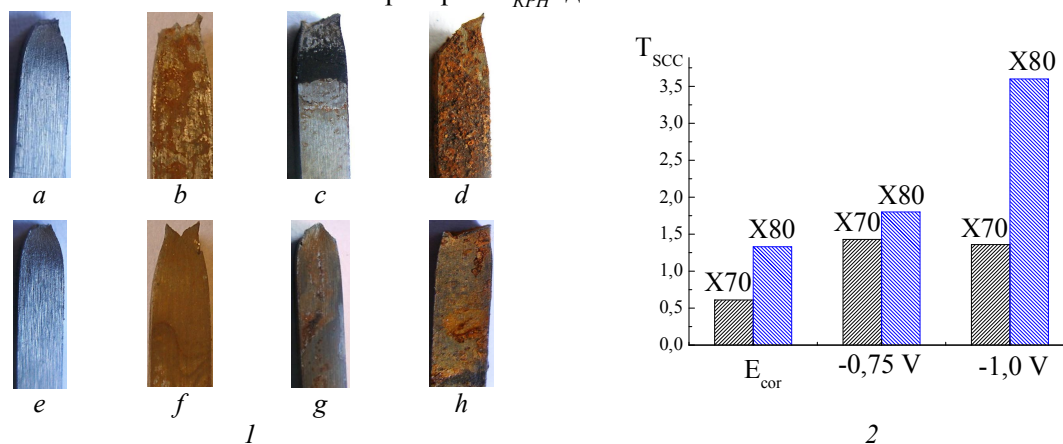


Рис. 3. Фотографії зламу зразків трубної сталі категорії X70 (a, b, c, d) та X80 (e, f, g, h) після корозійно-механічних випробувань у МГЕ при змінному змочуванні за різних потенціалів (1): у повітрі (a, e), за потенціалу корозії (b, f), -0,750 В (c, g) та -1,0 В (d, h) і порівняльна діаграма (2) оцінювання схильності до КРН за критерієм T_{KPH} .

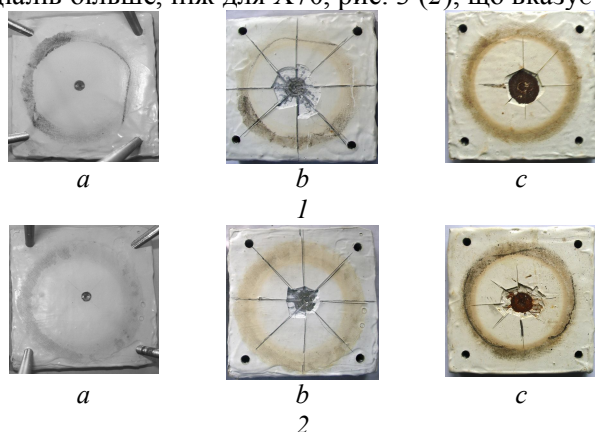
Fig. 3. Photos of fracture of pipe steel specimens of strength grade X70 (a, b, c, d) and X80 (e, f, g, h) after corrosion-mechanical tests in NS4 solution at variable wetting and at different potentials (1): in the air (a, e), at corrosion potential (b, f), at - 0,750 V (c, g), at - 1,0 V (d, h) and comparative diagram (2) of evaluation of inclination to SCC in agreement to criterion T_{SCC} .

З аналізу експериментальних результатів можна відмітити характерні особливості стрес-корозійної поведінки досліджуваних сталей за різних потенціалів, а саме:

- час від зародження тріщини до руйнування на сталі X70 більший, ніж на X80, незважаючи на схожий характер руйнування: в'язкий за потенціалу корозії та крихкий з в'язким доломом за потенціалів -0,75 В та -1,0 В;
- значення критерію T_{KPH} для сталі X80 більше, ніж для X70 за всіх досліджених потенціалів, що задовільно корелює із більшим значенням додаткового критерію K , для сталі X80 проти X70, рис. 3 (2).

З порівняльної діаграми оцінювання схильності сталей X70 та X80 до КРН за різних потенціалів, найбільша схильність сталі X70 до КРН, згідно з запропонованим критерієм T_{KPH} , відмічена за потенціалу -0,750 В та мало змінюється при збільшенні потенціалу за абсолютним значенням. Слід припустити, що за цих умов схильність сталі X70 до КРН, імовірно, макси-

мальна. Для сталі X80, на відміну від X70, властиве збільшення критерію T_{KPH} при збільшенні потенціалу катодного захисту. Відмічено, що значення цього критерію для X80 за різних потенціалів більше, ніж для X70, рис. 3 (2), що вказує на її більшу схильність до КРН за цих умов.



a – у вихідному стані,
b – після впливу катодної поляризації за кімнатної температури,
c – після впливу катодної поляризації за циклічної зміни температур.

Рис. 4. Результати дослідження катодного відшарування захисного полімерного покриття на епоксидній основі, нанесеного на зразки трубної сталі категорії міцності X70 (1) та X80 (2) за кімнатної температури та за циклічної зміни температур впродовж 30 діб. Діаметр штучного дефекту – 6 мм.

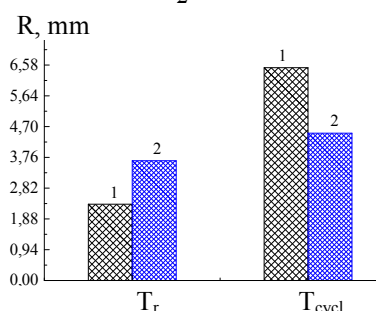


Fig. 4. Investigation results of the cathodic peeling of the polymer protective epoxy coating from the pipe steel specimens of strength grade X70 (1) and X80 (2) at a room temperature and at the cyclic temperature change during 30 days. Diameter of artificial defect is 6 mm.

Таким чином, особливості корозійної (збільшення швидкості суцільної корозії), електрохімічної (розширення області активного анодного розчинення, полегшення виділення водню) та корозійно-механічної (схильність до міжкристалітної корозії в умовах статичного навантаження за потенціалу катодного захисту -1,5 В (х.с.е.) та підвищення схильності до КРН за потенціалів E_k , -0,75 В і -1,0 В) поведінки сталі X80 порівняно зі сталлю X70 в слаболужних розчинах, що моделюють ґрунтовий електроліт, необхідно враховувати під час вибору умов захисту трубопроводів підвищеної міцності.

Особливості електрохімічної деструкції захисних полімерних покриттів на зразках трубної сталі X70 та X80. Оскільки магістральні трубопроводи експлуатуються в умовах комплексного захисту, проведено дослідження особливостей катодного відшарування полімерного захисного покриття на епоксидній основі, модифікованого смолою (як одного з перспективних покриттів завдяки його фізико-механічним, захисним та корозійним властивостям для застосування на ділянках схильних до КРН), нанесеного на зразки трубної сталі категорії X70 та X80, за потенціалу катодної поляризації -1,5 В у розчині 3 % натрію хлориду за методикою ДСТУ 4219 (додаток М) [15] за кімнатної температури та циклічної зміни температур від кімнатної до підвищеної до 50 °С упродовж 1 місяця. За результатами експериментальних досліджень встановлено:

- за кімнатної температури: відшарування має когезійно-адгезійний характер (рис. 4), практично не залежало від властивостей сталі, а тільки від фізико-механічних властивостей покриття, складу розчину та наведеного потенціалу;

- за циклічної зміни температур: встановлено зміну характеру відшарування до адгезійного, крім вищезазначених чинників, відмічено вплив технології виготовлення сталі на катодне відшарування, рис. 4;

Таким чином, на основі аналізу результатів досліджень електрохімічної деструкції поліуретанового та епоксидного покриттів можна припустити, що під час експлуатації на ділянках з підвищеними температурами транспортованого середовища, відшарування перебігатиме в перший місяць експлуатації з більшою швидкістю на трубопроводах зі сталі X70 порівняно з X80 за потенціалу -1,5 В (х.с.е.). Однак, за менш негативних потенціалів та з часом можлива зміна закономірностей відшарування.

ВИСНОВКИ

1. Швидкість суцільної корозії в модельному ґрунтовому електроліті упродовж тривалого часу (близько 1000 год), оцінена методом масометрії, сталі X80 з підвищеними показниками міцності дещо більша порівняно зі сталлю X70: 0,0227 мм/рік і 0,0216 мм/рік, відповідно.

2. У розчинах різної агресивності в умовах вільного доступу кисню за анодної поляризації зміцнення сталі сприяло в деякій мірі збільшенню швидкості розчинення, але механізм анодного розчинення залишався незмінним та визначався швидкістю транспортування кисню до поверхні металу. За катодної поляризації відмічено полегшення виділення водню на сталі X80, що треба брати до уваги під час вибору максимальних захисних потенціалів труб з цієї сталі.

3. Після впливу статичного навантаження впродовж тривалого часу (1 рік) для сталі X70 більш властива підповерхнева корозія, для сталі більшої міцності (X80) – міжкристалітна, що зумовлено проникненням атомарного водню під дією катодної поляризації в кристалічну ґратку металу. Розвиток міжкристалітної корозії в металі труби є більш небезпечний під час експлуатації, оскільки може призвести до розтріскування під дією розтягувальних напружень.

4. За результатами досліджень в умовах деформації з повільною швидкістю за різних потенціалів і змінному змочуванні встановлено, що, незважаючи на схожий характер зламу після руйнування зразків сталі X70 і X80, ділянки розвитку тріщини відрізняються: відмінна особливість руйнування сталі X80 полягає в тому, що за максимального (за абсолютним значенням) захисного потенціалу воно відбувалося майже за максимального напруження. Для сталі X80, на відміну від X70, властиве збільшення критерію T_{KPH} при збільшенні потенціалу катодного захисту.

ЛІТЕРАТУРА

1. D. Hardie, E. Charles, A. Lopez. Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels / Corrosion Science. – 2006. – V. 48, Issue 12. – P. 4378-4385.
2. Effect of microstructure on the sulphide stress cracking susceptibility of a high strength pipeline steel / E. Ramirez, J.G. Gonzalez-Rodriguez, A. Torres-Islas, S. Serna, B. Campillo, G. Dominguez-Patino, J.A. Juarez-Islas // Corrosion Science. – 2008. – V. 50, Issue 12. – P. 3534-3541.
3. Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments / N.E. Nanninga, Y.S. Levy, E.S. Drexler, R.T. Condon, A.E. Stevenson, A.J. Slifka // Corrosion Science. – V. 59. – 2012. – P. 1-9.
4. H.B. Xue, Y.F. Cheng. Characterization of inclusions of X80 pipeline steel and its correlation with hydrogen-induced cracking/ Corrosion Science. – V. 53, Issue 4. – 2011. – P. 1201–1208.
5. Capelle J., Dmytrakh I., Pluvinage G. Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength / Corrosion Science. – 2010. – V. 52, Issue 5. – P. 1554-1559.
6. Dong C.F., Liu Z.Y., Li X.G., Cheng Y.F. Effects of hydrogen-charging on the susceptibility of X100 pipeline steel to hydrogen-induced cracking / International Journal of Hydrogen Energy. – V. 34, Issue 24. – 2009. – P. 9879–9884.
7. Effect of microstructure and inclusions on hydrogen induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of X120 pipeline steel / F. Huang, J. Liu, Z.J. Deng, J.H. Cheng, Z.H. Lu, X.G. Li // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – V. 527, Issue 26. – P. 6997-7001.
8. Liu Z.Y., Li X.G., Cheng Y.F. Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization // Corrosion Science. – 2012. – V. 55. – P. 54-60.
9. Zhang G.A., Cheng Y.F. Micro-electrochemical characterization of corrosion of welded X70 pipeline steel in near-neutral pH solution // Corrosion Science. – 2009. – V. 51, Issue 8. – P. 1714-1724.
10. Strain Aging of X100 Steel in Service and the Enhanced Susceptibility of Pipelines to Stress Corrosion Cracking / G. Liang, X. Peng, E. S. Juan, Y. F. Cheng // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Volume 22, Issue 12. – P. 3778-3782.
11. Ниркова Л.І., Осадчук С.О. Рибаків А.О., Мельничук С.Л., Гапула Н.О. Пристрій для дослідження схильності трубних сталей до корозійного розтріскування від напруження Патент України № 107229, МПК G01N 17/00, G01N7/02. - № a201214719; заявл. 21.12.2012; опубл. 10.12.2014. – Бюл. № 23/2014.
12. Ниркова Л.І., Рибаків А.О., Осадчук С.О. та ін. Спосіб випробувань схильності трубних сталей до корозійного розтріскування від напруження за впливу змінного змочування Патент України № 107381, МПК G01N 17/00, G01N3/00, G01N3/08 (2006.01), G01N3/20 (2006.01). – № a201214721; заявл. 21.12.2012; опубл. 25.12.2014. – Бюл. № 24/2014.
13. <http://www.markmet.ru/kniga-po-metallurgii/novye-metody-otsenki-soprotivleniya-metallov-khrupkomu-razrusheniyu>
14. Вплив катодної поляризації на захисні властивості полімерних покриттів / Л. Ниркова, С. Осадчук, А. Рибаків та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. – № 10. – С. 459-464.
15. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії.