

УДК 620.
194.22

¹НИРКОВА Л. І.¹, ¹ЛІСОВИЙ П. Е., ¹ГОНЧАРЕНКО Л. В.,
¹ОСАДЧУК С. О., ¹КЛИМЕНКО А. В., ²БОРИСЕНКО Ю. В.,
²БРАТОЧКИН О. В.

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

²Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ У МОДЕЛЬНОМУ ГРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗА КАТОДНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Мета. Дослідити закономірності корозійного розтріскування сталі трубного сортаменту 10Г2ФБ в умовах катодного захисту.

Методика. Застосовували такі методи: деформації з малою швидкістю, вольтамперометрії, метод растрової електронної мікроскопії, електролітичного наводнювання, масометрії.

Результати. Вивчено закономірності корозійного розтріскування трубної сталі 10Г2ФБ у модельному ґрунтовому середовищі NS4 в діапазоні потенціалів від потенціалу корозії до $-1,2$ В. За результатами комплексу корозійно-механічних, електрохімічних та фізичних досліджень встановлено, що при зміщенні потенціалу катодної поляризації в ряду $-0,75$ В $\rightarrow -0,95$ В $\rightarrow -1,05$ В $\rightarrow -1,2$ В коефіцієнт схильності цієї сталі до корозійного розтріскування K_S зростає $1,09 \rightarrow 1,11 \rightarrow 1,13 \rightarrow 1,26$. Концентрація водню, що проникає в сталь за цих потенціалів, змінюється немономонно: $0 \rightarrow 0 \rightarrow 0,057 \rightarrow 0,018$ моль/дм³. Швидкість залишкової корозії при зсуві потенціалу в ряду $E_{кор} \rightarrow -0,75$ В $\rightarrow -0,95$ В $\rightarrow -1,05$ В зменшується спочатку різко, потім повільно: $0,035$ мм/рік $\rightarrow 0,005$ мм/рік $\rightarrow 0,0009$ мм/рік $\rightarrow 0,0004$ мм/рік, тобто за високих катодних потенціалів прикладена поляризація витрачається на розклад водного електроліту з виділенням водню, який проникає в сталь та викликає крихке розтріскування, що підтверджено зростанням частки крихкого руйнування в морфології зламів зразків.

Наукова новизна. Отримані нові дані фундаментальних досліджень щодо закономірностей корозійного розтріскування сталі феритно-перлітного класу трубного сортаменту 10Г2ФБ в умовах катодного захисту в діапазоні потенціалів від потенціалу корозії до $-1,2$ В. Виявлено, що особливостями впливу катодної поляризації в зазначеному діапазоні потенціалів при оцінюванні за коефіцієнтом схильності до корозійного розтріскування K_S є збільшення відносного звуження та зменшення відносного видовження, що в цілому вказує на окрхчення металу під дією корозивного середовища та потенціалу. Міцнісні характеристики залишаються майже на тому самому рівні. Найбільша схильність до корозійного розтріскування спостерігається за потенціалу поляризації $-1,0$ В та від'ємніше.

Практична значимість. Застосовано розроблену методологію комплексного дослідження закономірностей корозійного розтріскування на прикладі дослідження сталі трубного сортаменту 10Г2ФБ в модельному ґрунтовому середовищі NS4 в умовах, що моделюють умови експлуатації. Отримані нові дані закономірностей корозійного розтріскування цієї сталі будуть корисними для попередження корозійного розтріскування магістральних газопроводів під час експлуатації.

Ключові слова: сталь трубного сортаменту 10Г2ФБ; вольтамперометрія; метод деформації з малою швидкістю; катодний потенціал; електрохімічна корозія; корозійне розтріскування.

Вступ. Найнебезпечнішим явищем, яке призводить до аварій на підземних магістральних газопроводах, є корозійне розтріскування (КР) [1, 2]. Це питання є актуальним для всіх, без виключення країн, в яких експлуатуються підземні газопроводи [3]. Робота є частиною досліджень, проведених з метою накопичення даних щодо схильності сталей, з яких побудовані магістральні газопроводи України, до КР при катодному захисті.

При контакті з нейтральним корозивним середовищем на поверхні стінки труби за катодної поляризації утворюється водень [4–10]. Механізм перебігу корозійних процесів в

умовах катодного захисту має особливості. На сьогодні дослідники світу дотримуються думки про те, що КР у розчинах з рН, близьких до нейтральних перебігає за сумісної дії анодного розчинення та водневого окрихчення сталі, і залежно від рівня катодної поляризації, превалює той чи інший механізм [11–15]. Також відомо, що залежно від корозивності середовища та складу сталі розрізняється діапазон потенціалів, в яких діють механізми анодного розчинення та водневого окрихчення. Проведення комплексу фундаментальних досліджень, за результатами яких можна встановити закономірності корозійного розтріскування сталей трубного сортаменту, наприклад 10Г2ФБ, є актуальною задачею.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання корозійного розтріскування магістральних газопроводів, зокрема на території України, мета роботи полягала у дослідженні закономірностей корозійного розтріскування трубної сталі 10Г2ФБ при катодному захисті та встановленні діапазону потенціалів крихкого руйнування.

Методи та матеріали. Зразки для досліджень вирізали з листів сталі трубного сортаменту 10Г2ФБ товщиною 16,5 мм поперек прокату. Хімічний склад є типовим для такої сталі, ваг. %: 0,096 С; 1,71 Мн; 0,208 Si; 0,009 S; 0,07 Р; 0,035 Al; 0,03 Ni; 0,03 Мо; 0,015 Ti; 0,06V; 0,052 Nb; 0,002 В. Механічні властивості сталі 10Г2ФБ: межа плинності $\sigma_{0,2}$ – (400–430) МПа; межа міцності σ_B – (560–580) МПа; відносне видовження δ – 20 %.

Для корозійно-механічних випробувань зразки виготовляли згідно з ескізом (рис. 1). Зразки вирізали поперек прокату листа.

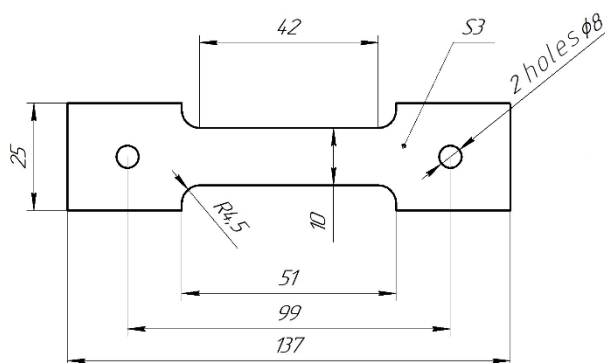


Рис. 1. Ескіз зразка для корозійно-механічних досліджень

Зразки розтягували в повітрі та в розчині зі швидкістю 10^{-6} с^{-1} на розривній машині АИМА-5-1. Робочий розчин – модельний ґрунтовий електроліт NS4 складу: 0,122 г/л KCl + 0,483 г/л NaHCO₃ + 0,181 г/л CaCl₂ + 0,131 г/л MgSO₄, рН 8,2 [15–18].

Ступінь електролітичного наводнювання сталі визначали за методикою ГОСТ Р 9.915 [19] в діапазоні катодних потенціалів від -0,75 В до -1,2 В з кроком 0,05 В. Потенціали задавали за допомогою потенціостата ПИ-50-1.1 та програматора ПР-8. Зразки випробовували на корозійне розтріскування за періодичного змочування розчином за циклом 50 хвилин у розчині, 10 хвилин у повітрі у діапазоні потенціалів катодної поляризації від -0,75 до -1,2 В (відносно хлоридсрібного електрода, х.с.е.). Схильність сталі до КР оцінювали за безрозмірним коефіцієнтом $K_S = \frac{\psi_n}{\psi_p}$, згідно з розробленою раніше методикою [15], де ψ_n , ψ_p

– відносне звуження зразків у повітрі та розчині, відповідно. Для оцінювання деградації показників відносного подовження та межі міцності розраховували коефіцієнти втрати властивостей F відносно аналогічних показників на повітрі: $F = \left(1 - \frac{F_p}{F_n}\right) \times 100\%$, де F_n , F_p – значення відповідного показника під час випробувань на повітрі та у розчині.

Результати дослідження.

Мікроструктура сталі – дисперсна феритно-перлітна суміш з видовженням зерен в напрямку прокату. Характерна мікроструктура сталі наведена на рис. 2 а.

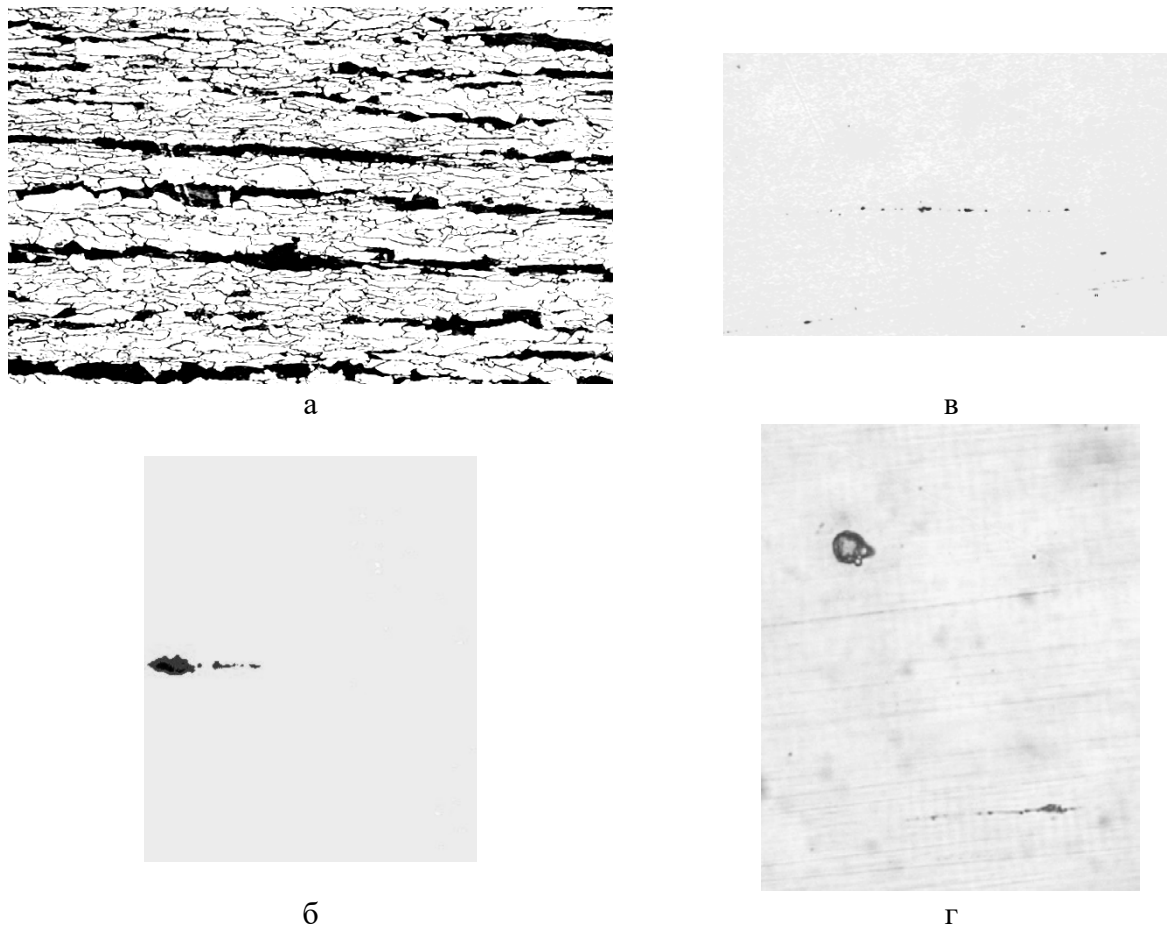


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 400$) та неметалеві включення сталі 10Г2ФБ ($\times 500$):
а – мікроструктура; б – оксиди; в – силікати; г – глобулярні включення

Феритне зерно відповідає (10–11) номеру згідно з ГОСТ 5639; смугастість металу – (3–4) балу, ряд Б згідно з ГОСТ 5640. Твердість сталі знаходиться в межах (180–190) HV. Структурні характеристики є типовими для сталі контрольованої прокатки, мікролегованої ванадієм і ніобієм. Неметалеві включення, переважно, дрібні глобулярні оксиди і оксисульфідів, рис. 2, б. Спостерігається невелика кількість оксидів стрічкових і силікатів крихких у вигляді стрічок, розташованих вздовж текстури прокату рис. 2, в. Забрудненість неметалевими включеннями згідно з ГОСТ 1778 відповідає (1,5–2) балу. Спостерігається дещо більша кількість складних глобулярних включень великого розміру (до 5 мкм), рис. 2, г.

Корозійно-механічні та фрактографічні дослідження. Діаграми руйнування представлені на рис. 3. Руйнування зразків у повітрі відбувалося в'язко, з характерним утягуванням біля місця розриву та утворенням ділянок, які зазнали пластичної деформації, рис. 3. Межа міцності дорівнювала ~ 512 МПа, відносне видовження $\sim 28,0\%$. Морфологія зламу в'язка (ямкового характеру), розмір ямок, в основному не перевищує ~ 50 мкм, рис. 4, а.

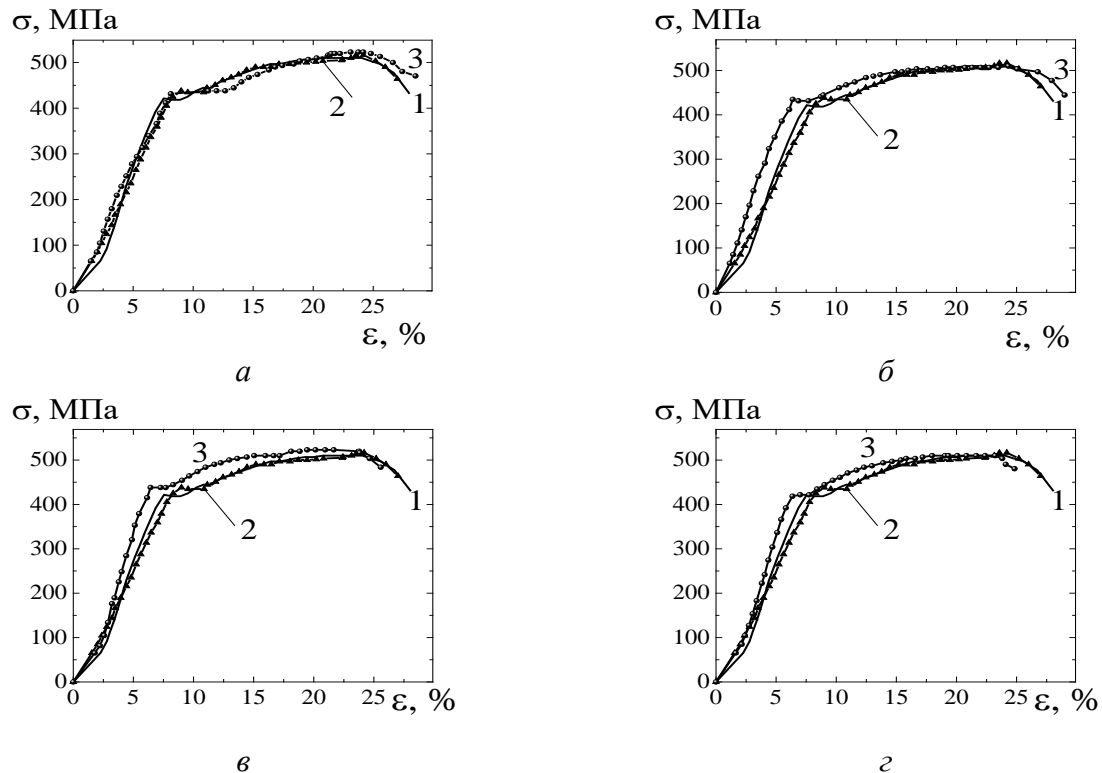


Рис. 3. Діаграми руйнування зразків зі сталі 10Г2ФБ після корозійно-механічних випробувань у розчині NS4 за різних умов:
1 – у повітрі; 2 – за потенціалу корозії; 3 – за потенціалів поляризації:
а – -0,75 В; б – -0,95 В; в – -1,05 В; г – 1,2 В

Після руйнування зразків у розчині за потенціалу корозії (рис. 3, крива 2) спостерігали незначне зменшення максимального навантаження приблизно на $\sim 2\%$ та відносного видовження на $\sim 3,7\%$ порівняно з такими самими показниками у повітрі, рис. 5 (криві 1,2, відповідно). Превалює в'язкий (ямковий) характер зламу, але ямки крупніше, ніж під час руйнування у повітрі, рис. 4, б. Розраховане значення коефіцієнту схильності до корозійного розтріскування дорівнює 1,07, рис. 5 (крива 3).

За мінімального захисного потенціалу -0,75 В ознаки в'язкого руйнування залишаються, лінія розриву хвиляста, наявне утягування біля крайки розриву, рис. 4, в, коефіцієнт K_s дорівнює 1,09, рис. 5 (крива 3) В морфології зламів відмічається укрупнення ямок та зменшення їх глибини порівняно із поверхнею руйнування зразка за потенціалу корозії рис. 4, в.

За потенціалу -0,95 В спостерігається тенденція до зменшення частки в'язкого руйнування та зростання частки крихкого, на що вказує зміна вигляду лінії розриву, яка набуває форми складної ламаної зі сходінками розриву, рис. 4, г, збільшення коефіцієнту K_s до 1,11, рис. 5 (крива 3). В морфології зламів відмічається укрупнення ямок та зменшення їх глибини, поява плоских ділянок руйнування рис. 4, г.

За максимального захисного потенціалу -1,05 В в області руйнування переважає крихкий характер, звуження зразка помітно менше, рис. 4, д, лінія розриву складна ламана, видні сходінки розриву та вторинні тріщини. Показники зниження межі міцності та відносного видовження становлять $\sim 1,0\%$ та $\sim 8,8\%$, відповідно, коефіцієнт схильності до КР дорівнює 1,13, рис. 5 (крива 3). На поверхні руйнування превалюють майже плоскі ділянки

руйнування більшої площі довжиною від 10 до 30 мкм, ніж на зразках, зруйнованих при менш від'ємних потенціалах, рис. 4, в.



Рис. 4. Вигляд області руйнування зразків зі сталі 10Г2ФБ після корозійно-механічних випробувань за різних умов та фрактограми поверхонь руйнування, $\times 500$:
а – у повітрі; б – за потенціалу корозії; за потенціалів катодної поляризації в – $-0,75$ В;
г – $-0,95$ В; д – $-1,05$ В; е – $-1,20$ В

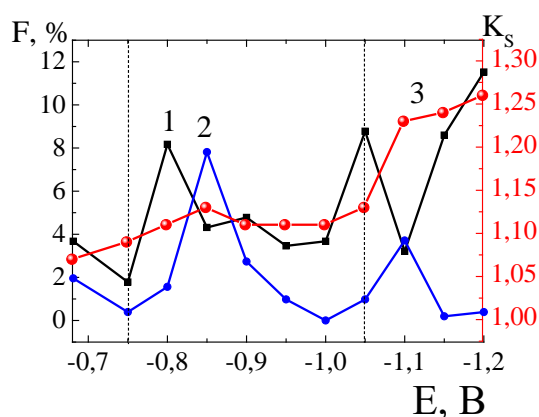


Рис. 5. Зміна коефіцієнтів втрати властивостей зразків зі сталі 10Г2ФБ залежно від потенціалу після корозійно-механічних випробувань у розчині NS4: 1 – межа міцності; 2 – відносне видовження; 3 – коефіцієнт схильності до КР

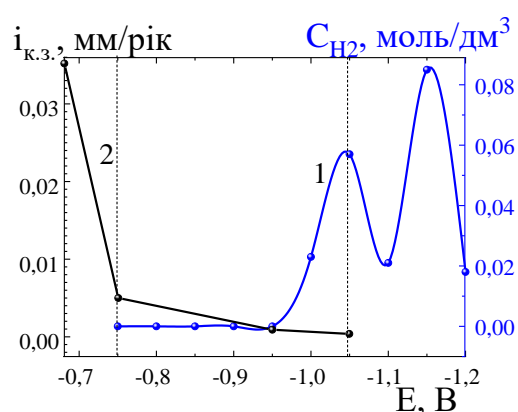


Рис. 6. Зміна концентрації водню, що проникає в сталь при катодній поляризації та швидкості залишкової корозії сталі 10Г2ФБ залежно від потенціалу у розчині NS4: 1 – концентрація водню; 2 – швидкість залишкової корозії

За потенціалу -1,2 В відмічається тенденція до зростання частки крихкого руйнування, що корелює із зменшенням відносного звуження, рис. 4, е. Лінія розриву – складна східчаста ламана, рис. 5, е. Показники зниження межі міцності та відносного видовження змінюються неоднозначно, коефіцієнт K_s продовжує зростати до 1,26, рис. 5 (крива 3). На поверхні руйнування збільшується кількість плоских ділянок руйнування та їх площа, зменшується частка ямок та їх глибина, рис. 4, е.

Дослідження проникнення водню в сталь та швидкості залишкової корозії при катодній поляризації. Для пояснення причин розвитку крихкого руйнування за катодної поляризації дослідили процес проникнення водню в сталь 10Г2ФБ, що утворюється у нейтральному або слаболужному водному розчині згідно з реакцією:



За результатами досліджень встановили, що проникнення водню починається за потенціалу -1,0 В (його вміст в сталі за такого потенціалу становить $C_{\text{H}_2} = 0,023$ моль/дм³). При зміщенні потенціалу поляризації до від'ємніших значень спостерігається немонотонне зміння вмісту водню в сталі, але в цілому можна простежити тенденцію до збільшенні його кількості, рис. 6, крива 1. Слід відзначити, що саме в цьому діапазоні потенціалів починається зростання схильності сталі 10Г2ФБ до корозійного розтріскування, рис. 5 (крива 3).

Ще однією важливою характеристикою ефективності катодного захисту є швидкість залишкової корозії ($i_{\text{к.з.}}$), представлена на рис. 6 (крива 2). Видно, що її значення зменшується досить різко при зсуві потенціалу від потенціалу корозії до -0,75 В, а саме: від 0,035 мм/рік без поляризації до 0,005 мм/рік при наведенні мінімального захисного потенціалу. Подальше збільшення за абсолютним значенням потенціалу поляризації суттєво не зменшує швидкість залишкової корозії, значення якої знаходяться в межах від 0,0009 мм/рік до 0,0004 мм/рік. При збільшенні потенціалу катодної поляризації відбувається розклад водного електроліту з виділенням водню, який проникає в сталь та викликає крихке розтріскування. Процес впровадження водню в сталь протікає інтенсивніше за дії механічних напружень. Цим пояснюється збільшення частки крихкого руйнування та відповідне зростання схильності до корозійного розтріскування.

Висновки:

1. Катодна поляризація у нейтральному ґрунтовому середовищі найбільш сильно впливає на показник відносного звуження сталі 10Г2ФБ; в меншій мірі – на відносне видовження, що в цілому вказує на окрихчення металу під дією корозивного середовища та потенціалу. Міцнісні характеристики залишаються майже на тому самому рівні.

2. За результатами комплексу корозійно-механічних, електрохімічних та фізичних методів досліджень встановлено, що при збільшенні за абсолютним значенням потенціалу катодної поляризації $-0,75 \text{ В} \rightarrow -0,95 \text{ В} \rightarrow -1,05 \text{ В} \rightarrow -1,2 \text{ В}$ схильність цієї сталі, оцінена за коефіцієнтом K_S до корозійного розтріскування зростає $1,09 \rightarrow 1,11 \rightarrow 1,13 \rightarrow 1,26$. При цьому немонотонно зростає концентрація водню, що проникає в сталь $0 \rightarrow 0 \rightarrow 0,057 \rightarrow 0,018$ моль/дм³.

3. Швидкість залишкової корозії різко зменшується при зсуві потенціалу від потенціалу корозії до $-0,75 \text{ В}$: від $0,035$ мм/рік без поляризації до $0,005$ мм/рік. Подальше збільшення за абсолютним значенням потенціалу поляризації суттєво не зменшує швидкість залишкової корозії, значення якої знаходяться в межах від $0,0009$ мм/рік до $0,0004$ мм/рік, але викликає розклад водного електроліту з виділенням водню, який проникає в сталь та сприяє розвитку крихкого розтріскування. Цим пояснюється зростання схильності до корозійного розтріскування та збільшення частки крихкого руйнування в зламах.

Робота виконана за підтримки Національної академії наук України у 2019–2021 рр. (державний реєстраційний номер теми 0118U100537).

References

Література

1. Antonov, V. H. Et et al. (2006). Korrozyonnoe rastreskyvanye pod napriazhenyem trub mahystralnykh hazoprovodov: atlas [Stress Corrosion Cracking of Trunk Gas Pipelines: Atlas]. Moscow: Nauka. 105 p. [in Russian].
1. Антонов В. Г. и др. Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов: атлас. М.: Наука, 2006. 105 с.
2. Cheng, Y. F. (2013). Stress corrosion of pipeline / edited by R. Winston. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 288 p.
2. Cheng Y. F. Stress corrosion of pipeline. Edited by R. Winston. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013. 288 p.
3. Krasovskiy, A. Ya., Lokhman, Y. V., Oryniak, Y. V. (2012). Stress-korrozyonnje razrusheniya mahystralnykh truboprovodov [Stress corrosion destruction of main pipelines]. *Problemy prochnosti = Strength problems*, № 2, P. 23–43 [in Russian].
3. Красовский А. Я., Лохман И. В., Орыняк И. В. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов. *Проблемы прочности*. 2012. № 2. С. 23–43.
4. Liu, Z. Y., Li, X. G., Du, C. W., Cheng, Y. F. (2009). Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution. *Corrosion Science*, Vol. 51, Is. 12, P. 2863–2871.
4. Liu Z. Y., Li X. G., Du C. W., Cheng Y. F. Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution. *Corr. Sci.* 2009. Vol. 51, № 12. P. 2863–2871.
5. Liu, Z. Y., Li, X. G., Du, C. W., Zhai, G. L., Cheng, Y. F. (2008). Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment. *Corrosion Science*, Vol. 50, Is. 8, P. 2251–2257.
5. Liu Z. Y., Li X. G., Du C. W., Zhai G. L., Cheng Y. F. Cheng Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment. *Corr. Sci.* 2008. Vol. 50, № 8. P. 2251–2257.
6. Dey, S., Mandhyan, A. K., Sondhi, S. K., Chattoraj, I. (2006). Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media *Corrosion Science*, V. 48, Is. 9, P. 2676–2688.
6. Dey S., Mandhyan A. K., Sondhi S. K., Chattoraj I. Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media. *Corr. Sci.* 2006. Vol. 48, № 9. P. 2676–2688.
7. Cheng, Y. F. (2007). Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH
7. Cheng Y. F. Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-

- stress corrosion cracking of pipelines. *Electrochimica Acta.*, Vol. 52, Is. 7. P. 2661–2667.
8. Cheng, Y. F., Niu, L. (2007). Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution. *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, Is. 4, P. 558–562.
9. Shipilov, S. A., May, I. L. (2006). Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection. *Eng. Failure Analysis*, Vol. 13, Is. 7, P. 1159–1176.
10. Parkins, R. N., Blanchard, W. K. jr., Delanty, B. S. (1994). Transgranular stress corrosion cracking of high pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. *Corrosion*, Vol. 50, P. 394–408.
11. Eslami, A., Kania, R., Worthingham, B. et al. (2011). Effect of CO₂ and R-ratio on near-neutral pH stress corrosion cracking initiation under a disbanded coating of pipeline steel. *Corrosion Science*, Vol. 53, P. 2318–2327.
12. Lu, B. T., Luo, J. L., Norton, P. R. et al. (2009). Effects of dissolved hydrogen and elastic and plastic deformation on active dissolution of pipeline steel in anaerobic groundwater of near-neutral pH. *Acta Mater.*, Vol. 57, P. 41–49.
13. Liu, Z. Y., Li, X. G., Cheng, Y. F. (2012). Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization. *Corrosion Science*, Vol. 55, P. 54–60.
14. Fang, B., Atrens, A., Wang, J., Han, E., Zhu, Z., Ke, W. (2003). Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in “low” and “high” pH solutions. *Journal of Materials Science*, Vol. 38, P. 127–132.
15. Niu, L., Cheng, Y. F. (2007). Corrosion behavior of X-70 pipe steel in near-neutral pH solution. *Applied surface science*, Vol. 253, Is. 21, P. 8626–8631.
16. de Sena, R. A., Bastos, I. N., Platt, G. M. (2012). Theoretical and Experimental Aspects of the Corrosivity of Simulated Soil Solutions. *International Scholarly Research Notices*. Article ID 103715, 6 pages.
17. Gu, B., Yu, W. Z., Luo, J. L., Mao, X. (1999). Transgranular stress corrosion cracking of X-80 and X-52 pipeline steels in dilute aqueous solution with near-neutral pH. *Corrosion*, Vol. 55, Is. 3, P. 312–318.
18. GOST R 9.915 *Edynaia sistema zashchyty ot korrozii y starenia. Metally, splavy, pokrytyia, yzdelyia* [Unified neutral pH stress corrosion cracking of pipelines. *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 52, № 7. P. 2661–2667.
8. Cheng Y. F. and Niu L. Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution. *Electrochemistry Communications*. 2007. Vol. 9, № 4. P. 558–562.
9. Shipilov S. A., May I. L. Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection. *Eng. Failure Analysis*. 2006. Vol. 13, № 7. P. 1159–1176.
10. Parkins R. N., Blanchard W. K. jr., Delanty B. S. Transgranular stress corrosion cracking of high pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. *Corrosion*. 1994, Vol. 50. P. 394–408.
11. Eslami A., Kania R., Worthingham B. et al. Effect of CO₂ and R-ratio on near-neutral pH stress corrosion cracking initiation under a disbanded coating of pipeline steel. *Corros. Sci*. 2011. Vol. 53. P. 2318–2327.
12. Lu B. T., Luo J. L., Norton P. R. et al. Effects of dissolved hydrogen and elastic and plastic deformation on active dissolution of pipeline steel in anaerobic groundwater of near-neutral pH. *Acta Mater*. 2009. Vol. 57. P. 41–49.
13. Liu Z. Y., Li X. G., Cheng Y. F. Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization. *Corros. Sci*. 2012. Vol. 55. P. 54–60.
14. Fang B. Y., Atrens A., Wang J. Q., Han E. H., Zhu Z. Y., Ke W. Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in “low” and “high” pH solutions. *Journal of Material Science*. 2003. No. 38. P. 127–132.
15. Niu L, Cheng Y. F. Corrosion behavior of X-70 pipe steel in near-neutral pH solution. *Applied surface science*. 2007. Vol. 253, Is. 21. P. 8626–8631.
16. de Sena R. A., Bastos I. N., Platt G. M. Theoretical and Experimental Aspects of the Corrosivity of Simulated Soil Solutions. *International Scholarly Research Notices*. 2012. Article ID 103715. 6 p.
17. Gu B., Luo J. L., Mao W. Z., Yu X. *Corrosion*. 1999. Vol. 55, Is. 3. P. 312–318.
18. ГОСТ Р 9.915 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы,

system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, coatings, products. Test methods of hydrogen embrittlement]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 31 p. [in Russian].

19. Nyrkova, L. I., Osadchuk, S. O., Rybakov, A. O., Melnychuk, S. L. (2020). Methodical approach and a criterion for the evaluation of the susceptibility of pipe steel to corrosion cracking. *Materials Science*, Vol. 55, Is. 5, P. 625–632.

покрытия, изделия. Методы испытаний на водородное охрупчивание. Москва. Дата введения 2012-01-01.

19. Nyrkova L. I., Osadchuk S. O., Rybakov A. O., Melnychuk S. L. Methodical approach and a criterion for the evaluation of the susceptibility of pipe steel to corrosion cracking. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, Is. 5. P. 625–632.

NYRKOVA LYUDMILA

Doctor of Technical Sciences
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>
Scopus Author ID: 57209672063
Researcher ID: AAF-3187-2020
E-mail: lnyrkova@gmail.com

LISOVYI PAVLO

Post Graduate Student
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7705-9524>
E-mail: Lisovyi.Pavel@gmail.com

GONCHARENKO LARYSA

Junior researcher
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of
Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-8371-2078>
E-mail: larikgon153@gmail.com

OSADCHUK SVETLANA

Candidat of Technical Sciences
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>
Scopus Author ID: 55215010000
E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

KLYMENKO ANATOLIY

Candidat of Technical Sciences
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9148-8221>
Scopus Author ID: 57220153661
E-mail: aklimenko@meta.ua

BORYSENKO YULIYA

Candidat of Technical Sciences
Department for electrochemical power
engineering & chemistry
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-0205>
Kyiv National University of Technologies and Design
E-mail: boria95@ukr.net

BRATOCHKIN OLEG

Maister of department for electrochemical
power engineering
Kyiv National University of
Technologies and Design Ukraine
E-mail: simplemakinglab@gmail.com

¹НЫРКОВА Л. И., ¹ЛИСОВОЙ П. Э., ¹ГОНЧАРЕНКО Л. В., ¹ОСАДЧУК С. А.,

¹КЛИМЕНКО А. В., ²БОРИСЕНКО Ю. В., ²БРАТОЧКИН О. В.

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

²Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ
10Г2ФБ В МОДЕЛЬНОМ ГРУНТОВОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ
ПРИ КАТОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

Цель. Исследовать закономерности коррозионного растрескивания стали трубного сортамента 10Г2ФБ в условиях катодной защиты.

Методика. Применяли следующие методы: деформации с малой скоростью, метод растровой электронной микроскопии, электролитического наводороживания, массометрии.

Результаты. Изучены закономерности коррозионного растрескивания трубной стали 10Г2ФБ в модельной почвенной среде NS4 в диапазоне потенциалов от потенциала коррозии до -1,2 В. По результатам комплекса коррозионно-механических, электрохимических и физических исследований установлено, что при смещении потенциала катодной поляризации в ряду -0,75 В → -0,95 В → -1,05 В → -1,2 В коэффициент склонности этой стали к коррозионному растрескиванию K_S соответственно возрастает 1,09 → 1,11 → 1,13 → 1,26. Концентрация водорода, проникающего в сталь при этих потенциалах, изменяется немонотонно: 0 → 0 → 0,057 → 0,018 моль/дм³. Скорость остаточной коррозии при смещении потенциала в ряду $E_{кор}$ → -0,75 В → -0,95 В → -1,05 В уменьшается сначала резко, затем медленно: 0,035 мм/год → 0,005 мм/год → 0,0009 мм/год → 0,0004 мм/год, т.е. при высоких катодных потенциалах приложенная поляризация расходуется на разложение водного электролита с выделением водорода, который проникает в сталь и вызывает хрупкое растрескивание, что подтверждено ростом доли хрупкого разрушения в морфологии изломов образцов.

Научная новизна. Получены новые результаты фундаментальных исследований, касающиеся закономерностей коррозионного растрескивания стали ферритно-перлитного класса трубного сортамента 10Г2ФБ в условиях катодной защиты в диапазоне потенциалов от потенциала коррозии до -1,2 В. Выявлено, что особенностью влияния катодной поляризации в указанном диапазоне потенциалов при оценке склонности к коррозионному растрескиванию по коэффициенту K_S является увеличение относительного сужения и уменьшение относительного удлинения, что в целом указывает на охрупчивание металла под действием коррозионной среды и потенциала. Прочностные характеристики остаются почти на том же уровне. Наибольшая склонность к коррозионному растрескиванию наблюдается при потенциале поляризации -1,0 В и отрицательнее.

Практическое значение. Разработанная методология комплексного исследования закономерностей коррозионного растрескивания использована для исследования стали трубного сортамента 10Г2ФБ в модельной почвенной среде NS4 в условиях, моделирующих условия эксплуатации. Полученные новые данные относительно закономерностей коррозионного растрескивания стали будут полезны для предупреждения коррозионного растрескивания магистральных газопроводов во время эксплуатации.

Ключевые слова: сталь трубного сортамента 10Г2ФБ; метод деформации с малой скоростью; катодный потенциал; электрохимическая коррозия; коррозионное растрескивание.

¹NYRKOVA L. I., ¹LISOVOY P. E., ¹GONCHARENKO L. V., ¹OSADCHUK S.A.,
¹KLIMENKO A. V., ²BORISENKO YU. V., ²BATOCHKIN O. V.

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Kyiv National University of Technology and Design, Ukraine

REGULARITIES OF STRESS CORROSION CRACKING OF 10G2FB PIPELINE STEEL IN NEAR NEUTRAL SOIL ENVIRONMENT AT CATHODIC POLARIZATION

Purpose. Investigate the regularities of corrosion cracking of 10G2FB steel under cathodic protection.

Methodology. The following methods were used: slow strain rate, scanning electron microscopy, electrolytic hydrogenation, mass measurement.

Results. The regularities of corrosion cracking of pipe steel 10G2FB in near neutral soil environment NS4 in the range of potentials from the corrosion potential to -1.2 V were investigated. According to the results of a complex of corrosion-mechanical, electrochemical and physical studies, it was found that with a shift in the cathodic polarization potential in the range of -0,75 V → -0,95 V → -1,05 V → -1,2 V → -0,95 V the coefficient of susceptibility of this steel to stress corrosion cracking K_S increases correspondingly, 1,09 → 1,11 → 1,13 → 1,26. The concentration of hydrogen which penetrating into steel at these potentials changes nonmonotonically: 0 → 0 → 0,057 → 0,018 mol/dm³. The rate of residual corrosion with a potential shift in the series $E_{кор}$ → -0,75 V → -0,95 V → -1,05 V decreases first sharply, then slowly: 0.035 mm/year → 0.005 mm/year → 0.0009 mm/year → 0.0004 mm/year, i.e. at high cathodic potentials, the applied polarization is spent on the decomposition of the aqueous electrolyte with the release of hydrogen, which

penetrates into the steel and causes brittle cracking, which is confirmed by an increasing in the part of brittle fracture in the surface morphology of the specimens.

Scientific originality. New results of fundamental research concerning the regularities of stress-corrosion cracking of ferrite-pearlite class steel of pipe assortment 10G2FB under conditions of cathodic protection in the range of potentials from the corrosion potential to -1.2 V have been obtained. It was revealed that a feature of the effect of cathodic polarization in the indicated range of potentials when assessing the tendency to stress corrosion cracking by the K_s coefficient is an increasing in the relative narrowing and a decrease in the relative elongation, which generally indicates the embrittlement of the metal under the contact with corrosive medium and potential. Strength characteristics remain almost the same. The greatest tendency to stress-corrosion cracking is observed at a polarization potential of -1.0 V or more negative.

Practical value. The developed methodology for a complex study of the regularities of stress-corrosion cracking was used for study of 10G2FB steel of the pipe assortment in a model soil environment NS4 under conditions simulating operating conditions. The new data obtained on the regularities of stress-corrosion cracking of steel will be useful for preventing the stress-corrosion cracking of main gas pipelines during operation.

Keywords: pipeline assortment steel 10G2FB; slow strain rate method; scanning electron microscopy; cathodic potential; electrochemical corrosion; stress-corrosion cracking.