

ОСОБЛИВОСТІ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СТАЛЕЙ У МОДЕЛЬНОМУ ГРУНТОВОМУ РОЗЧИНІ

М.І. Греділь, О.Т. Цирульник

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

Peculiarities of stress corrosion cracking and corrosion fatigue for gas pipeline steels of different strength in the model soil solution NS4 have been analyzed depending on their operation time. Aggressive action of the corrosive environment is more significant under a lower strain rate. Regularities of steels in-service degradation reveal themselves in a similar way in two types of the tests, namely in the slow strain rate testing as well as under cyclic loading.

Ключовою ланкою газотранспортної системи України є магістральні газопроводи протяжністю понад 22 тис. км, якими природний газ транспортують у країни Європи. Вони є об'єктами тривалої експлуатації, які працюють за сумісного впливу робочих навантажень та корозивного середовища. Газопроводи зазнають тривалого впливу агресивного середовища як ззовні (від ґрунтових вод у випадку пошкодження захисного покриття), так і зсередини (корозійна дія газового конденсату) [1]. Особливості їх роботи зумовлюють виникнення статичних (від тиску транспортованого газу) та циклічних (внаслідок коливань температури) напружень. Такі умови експлуатації спричиняють деградацію властивостей трубної сталі в об'ємі стінки труби [2]. І хоч основною причиною втрати властивостей є наводнювання стінки труби зсередини як результат корозії, що спричинена агресивними компонентами газового конденсату [2], однак це призводить до зниження опору корозійному розтріскуванню і ззовні труби. Зважаючи на строки експлуатації газопроводів і їх технічний стан, для підтримки надійного і ефективного їх функціонування необхідно адекватно оцінити поточні властивості сталі та її опірність впливу корозивних ґрунтових середовищ.

У роботі проаналізовано особливості корозійно-механічного руйнування трубних сталей різної категорії міцності після їх тривалої експлуатації на магістральних газопроводах.

Матеріали та методики досліджень. Досліджували трубні сталі різних класів міцності (X52, X60, X70), на магістральних газопроводах, отримані від підприємств Нафтогаз України. Перелік і умовні позначення досліджуваних сталей подано в табл. 1. Експерименти виконували на повітрі та у розчині NS4, що моделює ґрунтове середовище. Склад розчину, мг/л: KCl – 122; NaHCO₃ – 483; CaCl₂·2H₂O – 181; MgSO₄·7H₂O – 131. Чутливість сталей до корозійного розтріскування визначали за повільного розтягу циліндричних зразків зі сталюю швидкістю навантаження $\sim 10^{-6}$ та $\sim 10^{-7}$ с⁻¹, корозійно-втомні випробування виконували на компактних зразках з частотою циклічного навантаження 1 Гц, та асиметрією циклу 0,1.

Табл. 1. Умовні позначення досліджуваних сталей

Клас міцності сталі	Тривалість експлуатації, роки					
	0	25	30	36	37	41
X52	X52 ^{R1}		X52 ^{E1}			
	X52 ^{R2}		X52 ^{E2}	X52 ^{E3}		X52 ^{E4}
X60	X60 ^R	X60 ^E				
X70	X70 ^R				X70 ^E	

Результати та їх обговорення. На рис. 1 наведено результати випробувань на розтяг циліндричних зразків на повітрі та в корозивному середовищі для сталі класу міцності X52. Пластичність сталей за показником відносного звуження вичерпується впродовж експлуатації. Ця тенденція чіткіше проявляється у корозивному середовищі. Сталі X52^{E1} і X52^{E2}, попри однакову тривалість експлуатації, суттєво відрізняються за опірністю корозійно-механічному

руйнуванню, що спричинено, очевидно, різними умовами експлуатації, оскільки сталь X52^{E2} є більш деградована і за іншими показниками [3]. Водночас вплив агресивного середовища на сталі труб запасу незначний, тоді як після довготривалої експлуатації (понад проектний ресурс газопроводів) опірність корозійному розтріскуванню різко падає.

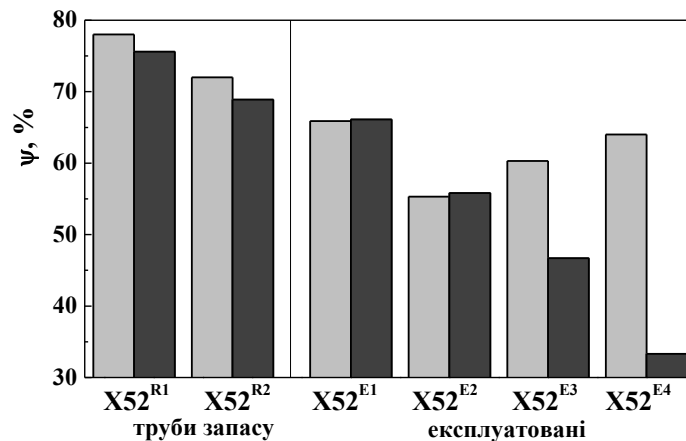


Рис. 1. Відносного звуження зразків зі сталі X52, випробуваних на повітрі (світлі стовпчики) та в розчині NS4 (темні) зі швидкістю навантаження $\epsilon \sim 10^{-6} \text{ c}^{-1}$, залежно від тривалості експлуатації.

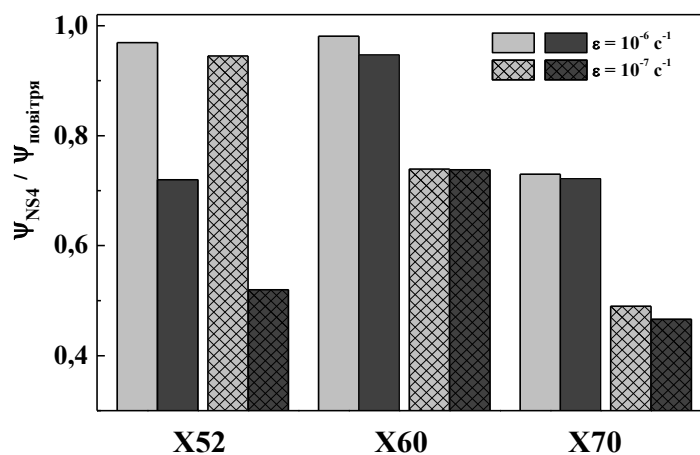


Рис. 2. Втрата пластичності трубопровідних сталей різного класу міцності під впливом корозивного середовища за різної швидкості навантаження: світлі стовпчики – матеріал у вихідному стані, темні – після тривалої експлуатації.

Рисунок 2 дає змогу порівняти сталі різної категорії міцності, з одного боку, за їх схильністю до корозійного розтріскування, а з іншого – за схильністю до експлуатаційної деградації. Зокрема, сталь X52 практично нечутлива до впливу корозивного середовища у вихідному стані, проте її опірність корозійному розтріскуванню суттєво падає після експлуатації, причому цей спад різкіший за нижчої ($\sim 10^{-7} \text{ c}^{-1}$) швидкості навантаження. Міцніша сталь X60 за вищої швидкості розтягу не проявляє схильності до корозійного розтріскування, а також ознак експлуатаційної деградації, і лише за низької швидкості спостерігається зниження пластичності сталі, як у вихідному стані, так і в експлуатованому. Щодо найміцнішої сталі X70, то тут суттєва чутливість до впливу корозивного середовища спостерігається вже і за вищої швидкості навантаження, а за нижчої пластичність цієї сталі під впливом середовища впала вдвічі, і для труби запасу, і для експлуатованої, при цьому експлуатована сталь незначно поступається по пластичності сталі у вихідному стані.

За результатами втомних випроб досліджуваних сталей зауважено вплив експлуатаційної деградації сталі X52 на поріг циклічної тріщиностійкості: ΔK_{th} знизився від 6,8

до $5,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ для експлуатованого металу. Для сталей X60 та X70 отримані значення ΔK_{th} є дуже близькі до тих, що отримані для відповідних сталей труб запасу. Суттєвих відмінностей на етапі стабільного росту тріщини (ділянка Періса) не зауважено для жодної з досліджених сталей, отже, тривала експлуатація не впливає на ріст тріщини на повітрі в цьому діапазоні значень ΔK . Найвищу опірність втомному росту тріщини показала сталь X70.

Корозійно-втомними випробами на сталі X52 виявлено деякий вплив корозивного середовища на механічну поведінку сталі X52 за циклічного навантаження. Встановлено, що значення ΔK_{thc} , визначене в розчині, є дещо вище за відповідне значення на повітрі. Це зумовлено, очевидно, затупленням тріщини внаслідок корозійних процесів, бо втрата гостроти вершини тріщини призводить до зниження ефективного значення параметра K_I . Для експлуатованої сталі X70 у середовищі спостерігали певне пришвидшення росту тріщини на ділянці Періса, а сталь X60 потребує додаткових досліджень.

У табл. 2 якісно узагальнено чутливість досліджених трубних сталей до експлуатаційної деградації та до впливу модельного ґрунтового середовища. Зауважено, що закономірності зміни характеристик сталей внаслідок їх експлуатації, з одного боку, та корозійного чинника з іншого, є однакові за різного виду навантаження. Виходячи з даних таблиці, слід очікувати змін корозійно-втомних характеристик сталі X60 після експлуатації, однак цей аспект потребує подальших досліджень.

Табл. 2. Узагальнена таблиця якісних змін характеристик досліджуваних сталей за різних умов експерименту

Вид навантаження	Вплив середовища на характеристики сталей різних категорій міцності					
	X52		X60		X70	
	X52 ^{R1}	X52 ^{E4}	X60 ^R	X60 ^E	X70 ^R	X70 ^E
Повільний розтяг ($\epsilon \sim 10^{-6} \text{ с}^{-1}$)	+	++	–	+	+	++
Циклічне ($R = 0,1; \nu = 10 \text{ Гц}$)	+	+	–	?	?	+

ВИСНОВКИ. Пластичність сталі категорії міцності X52 суттєво знижується впродовж експлуатації, при цьому сталь набуває схильності до корозійного розтріскування. Сталь X60 є чутлива до корозійного розтріскування лише за дуже низької швидкості навантаження, при цьому середовище не посилює чутливості цієї сталі до експлуатаційної деградації. Сталь X70 проявляє схильність до корозійного розтріскування вже і за вищої швидкості розтягу, яка при зниженні швидкості суттєво посилюється, однак експлуатаційна зміна пластичності незначна. Закономірності впливу експлуатаційної деградації на механічні та корозійно-механічні характеристики досліджених сталей є аналогічні для випроб на розтяг і на втому.

The research has been supported by the NATO in the Science for Peace and Security Programme under the Project G5055.

Література

1. Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання // наук.-техн. пос.: у 3-х т. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – 432 с.
2. M. Hredil, O. Tsyruľnyk. Inner corrosion as a factor of in-bulk steel degradation of transit gas pipelines / Proc. of the 18th European Conference on Fracture (ECF-18), Dresden, Germany, 30.08 – 03.09. 2010, manuskript No.483.
3. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska, P. P. Zonta, O. T. Tsyruľnyk, K. Nikiforov, M. I. Hredil, D. Yu. Petryna, T. Vuherer // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – №1. – С. 88–99.