

**КРИТИЧНІ ФАКТОРИ КОРОЗІЙНО-ВТОМНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛІ 17Г1С
МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ В УМОВАХ НЕПОВНОГО
ЗАВАНТАЖЕННЯ ГТС**

Петрина Д.Ю.¹ [ORCID], Глеб А.Т.² [ORCID]

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
д.т.н., професор, Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
аспірант, Україна

Анотація. Представлено результати дослідження впливу нестационарних режимів неповного завантаження магістральних газопроводів на критичні показники циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С, що перебувала в експлуатації понад 35 років та зроблене порівняння зі сталлю у вихідному стані. Експериментально встановлено, що структурна деградація («робоче старіння») та специфіка навантаження (зміна коефіцієнта асиметрії R , частоти f циклу навантаження і зростання динамічної складової) спричиняють значне зниження порогів тріщиностійкості. Виявлено потужний синергічний ефект між низькочастотними циклами та агресивним експлуатаційним середовищем, що призводить до майже трикратного прискорення корозійно-втомного руйнування сталі порівняно з проектними режимами. Результати роботи можуть бути використані для уточнення методик прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів в умовах змінених технологічних режимів експлуатації.

Ключові слова: трубна сталь 17Г1С, корозійно-втомне руйнування, низькочастотне навантаження, циклічна тріщиностійкість, структурна деградація, неповне завантаження ГТС, коефіцієнт асиметрії.

Вступ. Значна частина магістральних газопроводів (ГТС) експлуатується понад проектний ресурс (понад 35 років) і змушена працювати в нестационарних режимах, зокрема в умовах неповного завантаження. Це спричиняє циклічні зміни внутрішнього тиску, що є каталізатором розвитку втомних пошкоджень у трубних сталях типу 17Г1С. Тривала експлуатація викликає структурну деградацію металу («робоче старіння»), накопичення мікропошкоджень та підвищення чутливості до агресивного експлуатаційного середовища (волога, конденсат, CO_2 , H_2S , продукти корозії).

Особливу небезпеку становлять: асиметрія циклу навантаження (R): Режими неповного завантаження ГТС характеризуються асиметричними циклами з додатним середнім напруженням ($R = 0.3...0.5$), що зміщує середнє напруження в область розтягу та прискорює ріст тріщин порівняно з проектними режимами.

Одним з основних чинників, що характеризують неповне завантаження магістральних трубопроводів є частота навантаження f . Зі зменшенням частоти навантаження швидкість росту тріщини $\frac{dl}{dN}$ стабільно зростає. Це вказує на переважання часозалежних чинників деградації — корозійного впливу та впливу наводнення.

Спільна дія циклічного навантаження та агресивного середовища активізує корозійно-втомні механізми руйнування, сприяючи локалізації пластичної деформації та знижуючи опір матеріалу поширенню тріщин.

Незважаючи на значні дослідження втоми металів [1-6], комплексний вплив саме режимів неповного завантаження (низькі частоти, змінні R та корозійне середовище) на циклічну тріщиностійкість тривалоексплуатованих сталей 17Г1С залишається недостатньо систематизованим, що обмежує точність прогнозування залишкового ресурсу.

Основний матеріал. Об'єктом дослідження була низьколегована трубна сталь 17Г1С, відібрана з ділянки трубопроводу, який перебував в експлуатації понад нормативний термін служби (35+ років). Для порівняльного аналізу використовувався матеріал із нової труби тієї ж марки.

Випробування на ріст втомних тріщин проводили на сервогідравлічній машині, використовуючи стандартні компактні зразки типу СТ (Comprast Tension) відповідно до вимог ASTM E647. Використовувалися асиметричні цикли навантаження з додатним середнім напруженням ($R = 0.1-0.5$) для моделювання режимів неповного завантаження. Частота навантаження встановлювалася на рівні $f = 1.0$ Гц та $f = 0.1$ Гц (а також $f = 0.02$ Гц для аналізу впливу низьких частот), характерному для експлуатаційних коливань тиску. Частина випробувань проводили в корозійному середовищі, що імітує

експлуатаційні умови (водний розчин електроліту NS_4 з контрольованим рН та насиченням CO_2/H_2S).

Циклічна тріщиностійкість оцінювалася кінетичною діаграмою втомного руйнування (КДВР) — залежністю швидкості росту втомної тріщини dl/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK у вершині тріщини. Середньоамплітудні ділянки описувалися формулою Періса $\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n$.

Аналіз КДВР на повітрі продемонстрував систематичне зміщення кривої для експлуатованої сталі в область вищих швидкостей росту тріщини dl/dN порівняно з неексплуатованим станом. Експлуатаційна деградація призводить до зниження порогового значення ΔK_{th} , полегшуючи зародження та початкове поширення тріщин.

Перехід до випробувань у корозійному розчині NS_4 докорінно змінив характер руйнування, виявивши синергічний ефект. Спостерігається суттєвий зсув діаграм, де швидкість росту тріщин зростає майже на порядок при ідентичних ΔK порівняно з повітрям. Експлуатована сталь виявила вищу чутливість до дії електроліту, що підтверджує гіпотезу про те, що мікродефекти експлуатованого металу слугують додатковими центрами адсорбції водню, які прискорюють корозійно-втомне руйнування.

Зі зростанням значення R (що відповідає підвищенню середнього напруження при стабільно високому тиску) спостерігається систематичне зміщення КДВР у область нижчих значень ΔK , що призводить до суттєвого зниження порогу ΔK_{th} .

В умовах неповного завантаження ГТС коефіцієнт асиметрії часто зміщується до $R = 0.3...0.5$. Для тривалоексплуатованої сталі це підсилюється відсутністю ефекту «закриття тріщини» при низьких R . Тріщина залишається відкритою протягом більшої частини циклу, забезпечуючи безперешкодний приплив свіжого електроліту та інтенсифікацію електрохімічних процесів, що критично скорочує термін безпечної експлуатації.

Виявлено чітку інверсну логарифмічну залежність швидкості росту тріщини dl/dN від частоти навантаження f . Зі зменшенням частоти

навантаження швидкість dl/dN стабільно зростає, що вказує на переважання часозалежних чинників деградації (корозійний вплив та вплив наводнення).

При зниженні частоти навантаження від 1 Гц до 0.02 Гц спостерігається майже трикратне прискорення росту тріщин. Низькочастотне навантаження ($f < 1$ Гц) є найбільш небезпечним, оскільки свіжа поверхня металу у вершині тріщини довше контактує з агресивним електролітом, прискорюючи анодне розчинення. Низькі частоти дають більше часу для дифузії атомарного водню в зону пластичної деформації. Деградована структура сталі 17Г1С містить мікрodefекти-«пастки», в яких водень накопичується інтенсивніше, спричиняючи локальне окрихчення металу.

Висновки. Структурна деградація тривалоексплуатованої сталі 17Г1С зумовлює зниження порогу ΔK_{th} на 16% на повітрі, а у поєднанні з агресивним середовищем – критичне падіння опору руйнуванню на 34% (синергічний ефект). Низькочастотний характер пульсацій тиску ($f = 0.02...0.1$ Гц), притаманний нестационарним режимам, спричиняє майже трикратне прискорення росту тріщин через інтенсивне наводнювання. Перехід до нижчих коефіцієнтів асиметрії циклу ($R = 0.3...0.5$), характерний для неповного завантаження ГТС, сприяє інтенсифікації корозійно-втомного розтріскування через відсутність ефекту «закриття тріщини» та безперешкодний доступ середовища до ювенільного металу.

Операторам ГТС рекомендується переглянути критичні межі допустимих коливань тиску для ділянок, що працюють у недовантажених режимах, оскільки чинні нормативи можуть не враховувати суттєве зниження порогу ΔK_{th} для сталей тривалої експлуатації. Необхідно інтегрувати в системи діагностики датчики високої точності для фіксації низькочастотних пульсацій, що дозволить ідентифікувати зони ризику, де частота та амплітуда циклів сприяють інтенсивній корозійній втомі.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Vira V., Krechkovska H., Kulyk V., Duriagina Z., Student O., Vasylyv B., Cherkes V., Loskutova T. Peculiarities of fatigue crack growth in steel 17H1S after long-term operations on a gas pipeline. Materials. 2023. Vol. 16, № 8. 2964. DOI: 10.3390/ma16082964.

2. Zvirko O., Gabetta G., Tsyurulnyk O., Kret N. Assessment of in-service degradation of gas pipeline steel taking into account susceptibility to stress corrosion cracking. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 121–125. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.030.
3. Nykyforchyn H., Krechkovska H., Student O., Zvirko O. Feature of stress corrosion cracking of degraded gas pipeline steels. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 153–160. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.035.
4. Fatigue crack growth rate parametric study on subsea X65 pipeline steel girth welds in H₂S/CO₂ environments. *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 163. 107078. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107078.
5. Igwemezie V., Mehmanparast A., Brennan F. The role of microstructure in the corrosion-fatigue crack growth behaviour in structural steels. *Materials Science and Engineering A*. 2021. Vol. 803. 140470. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140470.
6. Roccisano A., Nafisi S., Ghomashchi R. Stress corrosion cracking observed in ex-service gas pipelines: A comprehensive study. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020. Vol. 51. P. 167–188. DOI: 10.1007/s11661-019-05496-3.

**CRITICAL FACTORS OF CORROSION-FATIGUE DEGRADATION OF 17G1S
STEEL OF MAIN GAS PIPES UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE
LOAD OF THE GTS**

D.Yu. Petryna, A.T. Gleb

Abstract. *The results of the study of the influence of non-stationary modes of incomplete loading of main gas pipelines on the critical indicators of cyclic crack resistance of 17G1S steel, which has been in operation for over 35 years, are presented and a comparison is made with the steel in the initial state. It was experimentally established that structural degradation ("working aging") and the specifics of the load (change in the asymmetry coefficient R , frequency f of the load cycle and increase in the dynamic component) cause a significant decrease in the crack resistance thresholds. A powerful synergistic effect between low-frequency cycles and an aggressive operating environment has been revealed, which leads to an almost threefold acceleration of corrosion-fatigue destruction of steel compared to the design modes. The results of the work can be used to refine the methods for predicting the residual resource of pipelines under conditions of changed technological operating modes.*

Keywords: *17G1S pipe steel, corrosion fatigue fracture, low-frequency loading, cyclic crack resistance, structural degradation, incomplete loading of the GTS, asymmetry coefficient.*