

УДК 669.01:620.172:539.4

ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВІДІВ ЗА КРИТЕРІЄМ МЕХАНІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ

Ю. Я. МЄШКОВ¹, А. В. ШИЯН¹, О. І. ЗВІРКО²

¹ Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Описано особливості концепції механічної стабільності конструкційних металів та сплавів, в якій використовують показники, що відображають фізичну природу окрихчення матеріалів. Підхід застосовано для кількісного оцінювання окрихчення сталей магістральних газопроводів після їх тривалої експлуатації. Відзначено підвищену чутливість показників механічної стабільності до експлуатаційної деградації сталей. Визначено залишкову механічну стабільність експлуатованого металу та спрогнозовано безпечний термін його експлуатації, за якого не очікується крихкого руйнування.

Ключові слова: газопровід, сталь, механічна стабільність, відносне звуження, деградація властивостей, залишковий ресурс.

Експлуатаційна деградація магістральних нафтогазопроводів – важлива науково-технічна проблема, яку досліджують різнопланово та із застосуванням різних підходів. Один із аспектів цієї проблеми – послаблення фізико-механічних властивостей металу під час експлуатації [1–4], що, відповідно, знижує робоздатність трубопроводів та підвищує ризик їх аварійного руйнування. Загалом встановлено, що зміна стану сталей проявляється у першу чергу в зниженні їх пластичності та характеристик опору крихкому руйнуванню, тобто тривала експлуатація зумовлює окрихчення металу [5–7]. Наводнювання стінки труби від її внутрішньої поверхні інтенсифікує цей процес, оскільки навіть незначні домішки води у транспортованому товарному продукті здатні електрохімічно взаємодіяти з металом із утворенням водню [8]. Звідси водень розглядаємо як чинник впливу не тільки на ріст тріщин, але, і з огляду на прискорення ним дифузійних процесів [9, 10], також і на деградацію структури сталей упродовж десятків років експлуатації трубопроводів [11], що призводить до окрихчення металу.

З іншого боку, розвиваються нові підходи в оцінюванні крихкої міцності металів, один з яких полягає у використанні концепції механічної стабільності (МС) [12, 13], в якій використовують показники, що відображають фізичну природу окрихчення металу. Нижче використана ця концепція для оцінювання зміни стану сталі 17Г1С тривало експлуатованих магістральних газопроводів, зважаючи на втрату пластичності як чинника запобігання крихкому руйнуванню.

Концепція механічної стабільності. Під МС розуміють поєднання властивостей міцності та пластичності, яке забезпечує елемент конструкції від крихкого руйнування для заданих експлуатаційних умов. Виходячи з цього, здатність металу чинити опір переходу з пластичного стану в крихкий описують в межах концепції МС, а окрихчення металів як втрату певної частини пластичності, а отже, і певної частини МС, яку кількісно оцінюють параметрами K_{ms} , K_{msc} та P_{ms} [12, 13]:

$$K_{ms} = R_x / \sigma_2 = R_x / (\sigma_{0,2} \cdot 10^n),$$

де K_{ms} – коефіцієнт МС; R_x – крихка міцність (для конструкційних сталей – опір мікросколу R_{mc}) – напруження руйнування зразка за певної (критичної) деформації $e_c \approx 2\%$; σ_2 – міцність металу за деформування до $e_c \approx 2\%$; n – показник деформаційного зміцнення за Холломоном [14].

Концепція МС передбачає визначення критичного коефіцієнта K_{msc} , що характеризує втрату МС в результаті дії окрихчувального чинника:

$$K_{msc} = R_x / \sigma_{2C},$$

де σ_{2C} – крихка міцність зразка за дії окрихчувального чинника (концентратора напружень) за критичної температури крихко-в'язкого переходу T_c . Тут показник K_{msc} відображає схильність металу до окрихчення і дає можливість визначити параметр P_{ms} :

$$P_{ms} = K_{ms} / K_{msc} = \sigma_{2C} / \sigma_2,$$

де P_{ms} – показник залишкової МС зразка за дії чинника окрихчення. Він характеризує резерв МС, завдяки якому не слід очікувати крихкого руйнування під час дії додаткових окрихчувальних чинників.

Зазначимо, що за неможливості експериментального визначення характеристики крихкої міцності R_x (R_{mc}), її можна розрахувати за методикою [15], використовуючи базові механічні характеристики металу – $\sigma_{0,2}$, σ_B та відносне звуження ψ .

Параметр K_{msc} виступає в такій концепції як кількісна міра окрихчення, тобто слугує показником окрихченості металу. Тривала експлуатація газопроводів теж спричинила окрихчення, яке пов'язане із деградацією металу в об'ємі стінки труби, тобто зі зміною стану металу в результаті сумісної дії робочих напружень та корозивно-агресивного середовища. Тому цей параметр можна подати як величину K_{msd} , що характеризує втрату МС внаслідок деградації тривало експлуатованого металу.

Можливості практичної реалізації концепції МС продемонстровано раніше [16] при розробленні методики суто розрахункового визначення критичної температури крихкості T_c під час окрихчення зразка, спричиненого концентратором напружень із відомим критичним коефіцієнтом МС K_{msc} .

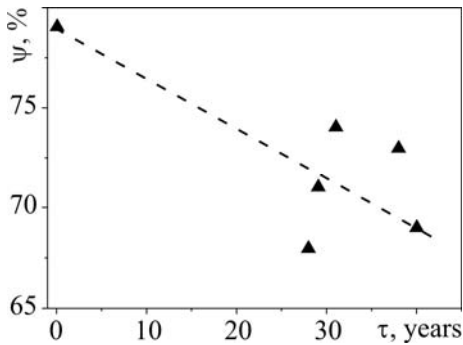


Рис. 1. Залежність відносного звуження ψ від часу експлуатації τ трубної сталі 17Г1С.

Fig. 1. Reduction of area ψ vs. service time τ for 17G1C pipeline steel.

Матеріали та результати досліджень. Об'єктом досліджень слугувала сталь 17Г1С магістральних трубопроводів у вихідному стані та після експлуатації упродовж часу τ в діапазоні 29...40 years. Циліндричні зразки для визначення базових характеристик міцності та пластичності (по 5 зразків на одне випробування) вирізали вздовж осі труби.

Концепція МС передбачає використання відносного звуження ψ серед характеристик пластичності. Саме відносному звуженню надають перевагу для оцінювання експлуатаційної деградації сталей газопроводів, оскільки на відносне видовження може

впливати розкриття дефектів розсіяної пошкоженості і призводити до його зростання [17]. Тенденція зміни відносного звуження ψ досліджуваної сталі від часу її експлуатації τ (рис. 1) відповідає загальним уявленням про деяку втрату пластичності матеріалів упродовж тривалої експлуатації.

Щоб застосувати концепцію МС, визначили низку базових характеристик міцності (рис. 2а), які вказують на її зниження з часом експлуатації. Зазначимо, що одночасний спад міцності і пластичності є особливістю експлуатаційної деградації трубопровідних сталей, зумовленою розвитком в об'ємі металу стінки труби розсіяної пошкодженості. В цьому випадку характеристики міцності та відносного видовження недостатні для аналізу стану металу, оскільки вони формально вказують на знеміцнення металу та його пластифікацію під час тривалої експлуатації. З іншого боку, порівняння границі крихкої міцності R_{mc} (крива 4) для вихідного та експлуатованого станів металу свідчить про протилежне. Отже, границя крихкої міцності R_{mc} є коректною для аналізу окрихчення металу та виділяється помітною чутливістю до експлуатаційної деградації.

Підвищеною чутливістю до експлуатаційної деградації сталі відзначилися і показники K_{msd} та P_{ms} (рис. 2б), використовуючи які, можна кількісно оцінити стан металу з огляду на ризик його крихкого руйнування. Їх часові залежності описали аналітично:

$$K_{msd} = a + b \cdot \tau,$$

де $a = 1,537$; $b = 0,023$;

$$P_{ms} = a \cdot \exp(-\tau/b) + c,$$

де $a = 1,721$; $b = 14,213$; $c = 1,021$.

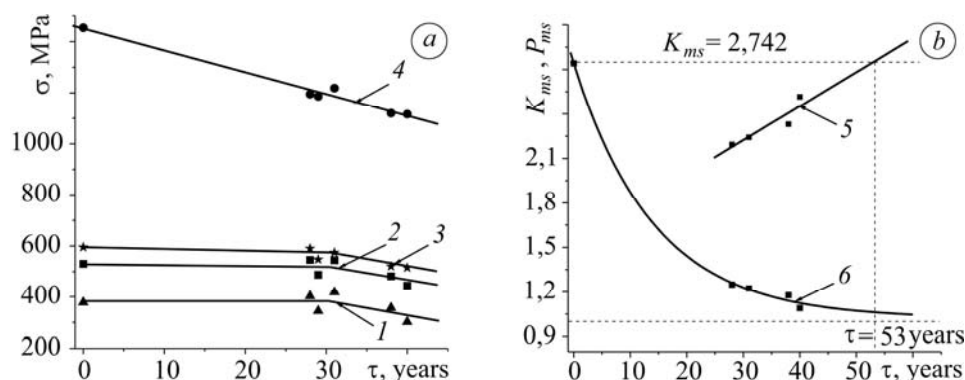


Рис. 2. Залежність від тривалості експлуатації τ трубної сталі 17Г1С характеристик міцності (а) та механічної стабільності (б): 1 – $\sigma_{0,2}$; 2 – σ_2 ; 3 – σ_B ; 4 – R_{mc} ; 5 – K_{msd} ; 6 – P_{ms} .

Fig. 2. Dependence of strength (a) and mechanical stability (b) of 17Г1С pipeline steel on service time τ : 1 – $\sigma_{0,2}$; 2 – σ_2 ; 3 – σ_B ; 4 – R_{mc} ; 5 – K_{msd} ; 6 – P_{ms} .

Аналітичний опис функцій $K_{msd} = f(\tau)$ і $P_{ms} = f(\tau)$ дає можливість не тільки оцінити ступінь окрихчення металу, але і спрогнозувати експлуатаційну довговічність за критерієм МС (рис. 2б). За втраченою внаслідок деградації металу часткою механічної стабільності K_{msd} можна судити про втрату трубоною сталю опірності крихкому руйнуванню, а екстраполяцією функції $K_{msd} = f(\tau)$ – визначити границю експлуатаційної довговічності за умови $K_{msd} = K_{ms} = 2,742$, яка дорівнюватиме 53 years (згідно зі статистикою Стьюдента, середнє квадратичне відхилення $\sigma \approx 0,04$ з вірогідністю 0,92 в довірчому інтервалі $\pm 0,07$, а коефіцієнт кореляції R залежності не нижче 0,998). Це означає, що за досягнення зазначеного терміну експлуатації дія різноманітних окрихчувальних чинників може з великою вірогідністю призвести до крихкого руйнування трубопроводу. Про це кількісно свідчить і низька залишкова МС $P_{ms} \approx 1,06$.

Зазначимо ще один позитив концепції МС. Якщо аналізувати розкид даних залежності відносного звуження від часу експлуатації (див. рис. 1), то його фак-

тично не можна обґрунтувати тільки результатами експериментів, які стосуються часу τ в діапазоні 29...40 years. Такий розкид логічно пояснювати проявом різних чинників, починаючи з відмінних властивостей сталі у вихідному стані для різних труб і закінчуючи неоднаковими умовами експлуатації трубопроводу на його різних ділянках. Однак часові залежності показників МС R_{mc} , K_{msd} та P_{ms} не виявили такого значного розкиду даних, тобто спостерігали монотонну залежність їх зміни в часі експлуатації металу (див. рис. 2b). Це вказує на те, що стан металу, вирізаного з різних ділянок трубопроводу, однозначно втрачає опірність крихкому руйнуванню зі збільшенням τ , якщо використовувати для аналізу показники МС, однак пластичність ψ не зовсім придатна для цього. Звідси можна зробити висновок, що окремі загальновизнані механічні характеристики є обмежені у можливостях характеризувати стан металу з огляду на небезпеку його переходу в крихкий стан за експлуатаційних умов, тоді як показники МС, базуючись на цих характеристиках, якби інтегрують їх особливості саме в напрямі кількісного оцінювання такої небезпеки.

ВИСНОВКИ

Із застосуванням концепції МС оцінено ступінь окрихчення та залишкову механічну стабільність ($P_{ms} \approx 1,06$) трубної сталі 17Г1С за її експлуатації до 40 років, а також спрогнозовано її експлуатаційну довговічність (53 роки за умови, що критичний коефіцієнт МС $K_{msd} = 2,742$). За дії різноманітних окрихчувальних чинників на метал магістральних трубопроводів за досягнення ними зазначеного терміну експлуатації існує висока ймовірність їх крихкого руйнування.

РЕЗЮМЕ. Описаны особенности концепции механической стабильности конструкционных металлов и сплавов, в которой используют показатели, отражающие физическую природу охрупчивания материалов. Подход применен для количественного оценивания охрупчивания сталей магистральных газопроводов после их длительной эксплуатации. Отмечено повышенную чувствительность показателей механической стабильности к эксплуатационной деградации сталей. Определено остаточную механическую стабильность эксплуатируемого металла и спрогнозировано безопасный срок его эксплуатации, при котором не ожидается хрупкого разрушения.

SUMMARY. The peculiarities of the concept of mechanical stability of structural metals and alloys, which uses indicators of the physical nature of the phenomenon of materials embrittlement, are described. This approach was used for the quantitative evaluation of embrittlement of main gas pipelines steels as a result of its long-term service. The increased sensitivity of the mechanical stability parameters to in-service degradation of steels was noticed. These estimations also allowed us to determine the residual level of the mechanical stability of the exploited metal and to predict the safety period of its operation, when brittle fracture was not expected.

1. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. в 3-х т. / За ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 432 с.
2. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel / Н. Nykyforchyn, Е. Lunarska, О. Tsyulnyk, and et al. // Materials and Corrosion. – 2009. – **60**, № 9. – Р. 716–725.
3. Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 5. – С. 55–58.
(Degradation of properties of the metal of welded joints in operating gas mains / О. Т. Tsyulnyk, V. A. Voloshyn, D. Yu. Petryna et al. // Materials Science. – 2011. – **46**, № 5. – Р. 628–632).
4. Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т. Особливості експлуатаційної деградації конструкційних металічних матеріалів “в об'ємі” за дії агресивних середовищ // Проблеми прочності. – 2009. – **41**, № 6. – С. 79–94.

- (*Nykyforchyn H. M. and Tsyryl'nyk O. T. Specific features of the in-service bulk degradation of structural steels under the action of corrosive media // Strength of Materials. – 2009. – 41, № 6. – P. 651–663.*)
5. *Влияние длительной эксплуатации на вязкость трубной стали 17ГС / С. А. Котречко, А. Я. Красовский, Ю. Я. Мешков и др. // Там же. – 2002. – 360, № 6. – С. 21–30.*
(*Influence of long-term operation on the toughness of 17GS pipeline steel / S. A. Kotrechko, A. Ya. Krasovskii, Yu. Ya. Meshkov et al. // Strength of Materials. – 2002. – 34, № 6. – P. 541–547.*)
 6. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 11–20.*
(*Kryzhanivskyi E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 127–136.*)
 7. *Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyryl'nyk et al. // Eng. Failure Analysis. – 2010. – 17. – P. 624–632.*
 8. *Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 5. – С. 29–37.*
(*Influence of operation of Kh52 steel on corrosion processes in a model solution of gas condensate / O. T. Tsyryl'nyk, Z. V. Slobodyan, O. I. Zvirko et al. // Materials Science. – 2008. – 44, № 5. – P. 619–629.*)
 9. *Goltsov V. A. Fundamentals of hydrogen treatment of materials and its classification // Int. J. of Hydrogen Energy. – 1997. – № 2/3. – P. 119–124.*
 10. *Ускорение процессов самодиффузии в металлах под влиянием растворенного водорода / В. М. Сидоренко, В. В. Федоров, Я. В. Барабаш, В. И. Похмурский // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – 13, № 6. – С. 27–30.*
(*Acceleration of self-diffusion processes in metals under the influence of dissolved hydrogen / V. M. Sidorenko, V. V. Fedorov, L. V. Barabash, V. I. Pokhmurskii // Materials Science. – 1977. – 13, № 6. – P. 607–610.*)
 11. *Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков // Там же. – 2010. – 46, № 2. – С. 42–54.*
(*Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, A. D. Markov // Materials Science. – 2010. – 46, № 2. – P. 177–189.*)
 12. *Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. – К.: Наук. думка, 2008. – 296 с.*
 13. *Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В. Механическая стабильность – универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла // Успехи физики металлов. – 2009. – 10, № 2. – С. 207–228.*
 14. *Hollomon J. H. Tensile deformation // Trans. AIME. Iron Steel Div. – 1945. – 162. – P. 268–290.*
 15. *Шиян А. В. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей // Металознавство та термічна обробка металів. – 2012. – 58–59, № 3–4. – С. 29–56.*
 16. *Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей // Проблемы прочности. – 2010. – № 1. – С. 112–119.*
 17. *Оценка деградации физико-механических свойств сталей длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов / Г. Н. Никифорчин, О. Т. Цирульник, О. И. Звірко и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – 79, № 9. – С. 48–55.*

Одержано 29.08.2014