

УДК 620.17:669.017

ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛІ ГАЗОПРОВОДУ РУЙНІВНИМИ І НЕРУЙНІВНИМИ МЕТОДАМИ

Ю. В. МІЛЬМАН¹, Г. М. НИКИФОРЧИН², К. Е. ГРІНКЕВИЧ¹,
О. Т. ЦИРУЛЬНИК², І. В. ТКАЧЕНКО¹, В. А. ВОЛОШИН², Л. В. МОРДЕЛЬ¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ;

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

Проаналізовано вплив тривалої експлуатації трубопровідної сталі API X52 на деградацію її механічних властивостей. Встановлено, що після експлуатації впродовж 30 років суттєво знижуються її характеристики міцності і пластичності, особливо різко – ударна в'язкість, що пов'язано з розвитком пошкоджуваності. Використано методи ідентування для порівняльного оцінювання стану експлуатованого і неексплуатованого матеріалу. Показано, що показники розсіювання результатів вимірів (коефіцієнт варіації) механічних властивостей (твердість, знос тощо) чутливіші до пошкодженості металу у вихідному стані та після експлуатації, ніж усереднені їх значення. Встановлено певні кореляції між твердістю за Віккерсом, циклічною твердістю, та міцністю і пластичністю сталі.

Ключові слова: експлуатаційна деградація, сталь газопроводу, діагностика стану металу, методи ідентування.

Більшість магістральних трубопроводів в Україні вже вичерпали свій розрахунковий ресурс, або на межі цього, тому особливо актуально обґрунтувати їх безпечну експлуатацію з урахуванням можливої деградації властивостей металу. Оцінка ступеня деградації сталей після тривалої експлуатації – завдання складне і комплексне. Праць, які висвітлюють ці питання, недостатньо, хоча останнім часом дослідження за цією тематикою активізуються [1–7]. Поряд з оцінюванням змін механічних характеристик вивчають структурні перетворення у сталях [2, 5, 6], вимірюють акустичні [4] та електрохімічні [8] характеристики після тривалої експлуатації в агресивному середовищі. Разом з тим, виходячи з можливості суттєвої деградації вихідних властивостей, стає також актуальним моніторинг поточних механічних властивостей сталей [4, 8, 9], а отже, створення неруйнівних методів їх діагностування, які повинні базуватися, в першу чергу, на оцінюванні чутливих до перетворень у металі на структурних та субструктурних рівнях показників [5, 6]. Тут перспективні методи оцінювання зносотривкості, твердості і сили тертя. Важливо також враховувати розсіювання результатів вимірів цих параметрів, показники якого під час дослідження впливу тривалої експлуатації на розвиток розсіяної пошкодженості у сталях виявились чутливіші до стану металу (метод LM-твердості [10]), ніж усереднені значення.

Мета роботи – проаналізувати деградацію сталі магістрального газопроводу методами ідентування з визначенням показників зносу та тертя за умов циклічного навантаження у поєднанні з оцінюванням корозійно-механічних характеристик металів.

Матеріали та методика досліджень. Зразки вирізали з труб зі сталі API X52 феритно-перлітного класу (аналог сталі 17Г1С) магістрального газопроводу: неексплуатована труба – умовне позначення X52, зовнішній діаметр $D = 408$ mm, товщина $t = 12$ mm; труба після 30 років експлуатації – X52-12, $D = 275$ mm, $t = 12$ mm.

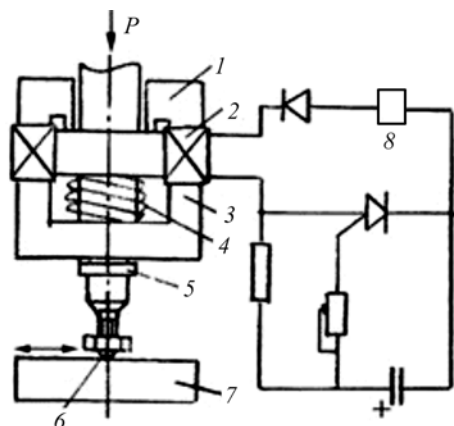


Рис. 1. Fig. 1.

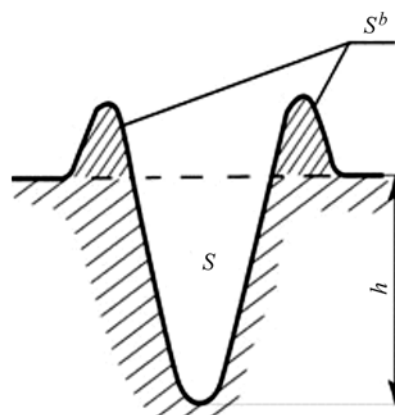


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 1. Вібродинамічний пристрій установки для визначення характеристик тертя в умовах циклічного навантаження за частоти від 0 до 25 Hz, в якому електричний сигнал з генератора 1 перетворюється електромагнітом 2 в механічні коливання, що за допомогою рухомої частини 3 передаються у зону контакту індентора 4 і зразка 5.

Fig. 1. Vibrodynamical device for determination of friction under cyclic loading at a frequency from 0 to 25 Hz, in which the electric signal from generator 1 is transformed by electromagnet 2 into mechanical vibrations, that by a moving part 3 are passed to contact zone of indenter 4 and specimen 5.

Рис. 2. Поперечна профілограма доріжки тертя.

Fig. 2. Transverse profilogram of the friction path.

Показники руйнування поверхні під час тертя

Критерій		Метод визначення	Примітка
I_s, I_c	Показники зносу плоского зразка	За глибиною доріжки тертя h (рис. 2)	На ділянках, відповідно, стаціонарного (s) і циклічного (c) режимів навантаження
V_s, V_c	Коефіцієнти варіації I_s і I_c	$V = \sigma_I / I$	σ_I – дисперсія показника зносу; I – середнє його значення
K_s, K_c	Показники пластифікування	$K = S^b / S$	S^b – площа витісненого матеріалу; S – площа доріжки тертя (рис. 2)

Твердість вимірювали за Брінеллем (HB) та Віккерсом (HV) згідно з ГОСТ 8.062-85 та ГОСТ 2999-75 відповідно. Знос і силу тертя матеріалів визначали за статичного та циклічного навантажень на розробленій установці АТКД [11] (рис. 1). Випробовуючи в оливі I-20 за статичного (I_s, P_{fs}) та циклічного (I_c, F_{fc}) режимів навантаження силою $P = 30$ N упродовж $t \sim 15$ min у парі з індентором, виготовленим зі сплаву ВК8. Швидкість ковзання 0,03 m/s, загальна довжина доріжки тертя 8 mm. Циклічну компоненту сили нормального тиску ΔP для установки АТКД задавали у вигляді механічних коливань, які прикладали одночасно зі статичною силою P_0 ; амплітуда A розмаху ΔP становила 0...15% від статичного на-

вантаження. Загальне навантаження $P = P_0 + A$. На кожному етапі виконували не менше трьох дослідів. У зонах статичного і циклічного зношування визначали поперечний профіль доріжки тертя (рис. 2), на основі якого розраховували показники зношування (див. таблицю).

Результати досліджень і їх обговорення. Виявили [5], що після тривалої експлуатації суттєво змінюється механічна поведінка металу. Зокрема, знижуються міцність σ_B і твердість HB , а також пластичність (ψ), тріщиностійкість J_i та ударна в'язкість KCV (рис. 3), і збільшується коефіцієнт деформаційного зміцнення n .

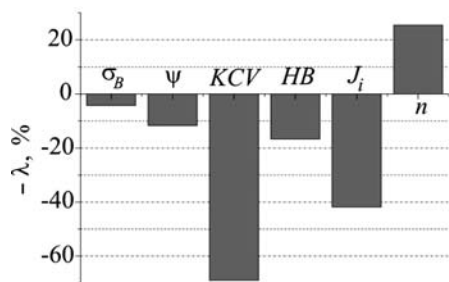


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Відносна зміна $\lambda = (P_0 - P_e)100\% / P_0$ механічних властивостей сталі X52 внаслідок експлуатації: P_0 і P_e – показники сталі у вихідному стані і після експлуатації.

Fig. 3. A relative change $\lambda = (P_0 - P_e)100\% / P_0$ of mechanical properties of X52 steel in consequence of service: P_0 and P_e – parameters of steel in as-received state and after service correspondingly.

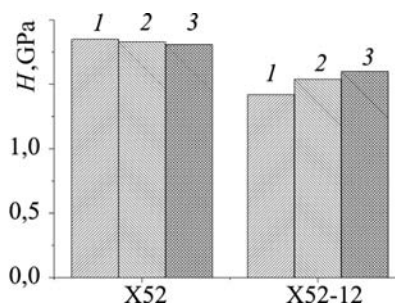


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Вплив експлуатації на твердість H сталі у вихідному стані (X52) та після експлуатації (X52-12) за навантаження на індентор 15,6 кг (1); 9 (2) і 0,2 кг (3): 1 – HB ; 2, 3 – HV .

Fig. 4. Effect of service on hardness, H , and of steel in as-received state (X52) and after service (X52-12) under loading on indenter 15.6 kg (1); 9 (2) and 0.2 kg (3): 1 – HB ; 2, 3 – HV .

Виділимо певну специфіку зміни механічних властивостей: ріст показника n свідчить про деформаційне старіння сталі під час експлуатації, що узгоджується зі спадом Ψ та зниженням характеристик опору крихкому руйнуванню. Водночас зменшуються міцність і твердість, що нетипово за цих умов. Такі аномалії пояснюють розвитком пошкодженості, коли, крім зниження ударної в'язкості і тріщиностійкості, можуть також зменшуватись міцність і твердість [4, 6–8].

Нижче, розвиваючи метод індентування для оцінювання деградації сталі, визначали твердість HV (рис. 4), а також знос за статичних та циклічних випроб (рис. 5). Зі зростанням навантаження на індентор чутливість твердості до експлуатаційної деградації посилюється. З падінням твердості зростають характеристики статичного (30%) і циклічного (біля 15%) зношування сталі (рис. 5). Однак при цьому зменшуються сили тертя, особливо за динамічних випроб. Тобто, маємо певну тенденцію – експлуатаційна деградація посилює знос сталі за випроб з меншим коефіцієнтом тертя (оскільки він за наших умов пропорційний силі тертя).

Експлуатаційна деградація також зменшує коефіцієнт пластифікування, особливо за статичних випроб, що свідчить про її окрихчуючий вплив на механізм руйнування сталі під час тертя. Це повністю узгоджується із виявленою закономірністю зниження пластичності і вказує на реалізацію крихкішого механізму руйнування сталі за ударних випроб внаслідок її тривалої експлуатації (див. рис. 3), а також пояснює одночасне зменшення сил тертя і твердості. Такий спе-

цифічний вплив тривалої експлуатації на механічну поведінку сталі за умов тертя може свідчити про домінування росту мікропошкодженості над деформаційним зміцненням. Непрямим доказом цього може також слугувати збільшення відношення зносотривкості за динамічного навантаження до такої ж за статичного експлуатованої сталі проти неексплуатованої. Оскільки ослаблення ефекту циклічної компоненти навантаження під час тертя зумовлене тим, що мікропошкодженість експлуатованої сталі уже достатньо розвинена внаслідок її деградації і стадія зародження мікроефектів, яка різко інтенсифікується за власне циклічного навантаження, вже не відіграє такої ролі за статичного.

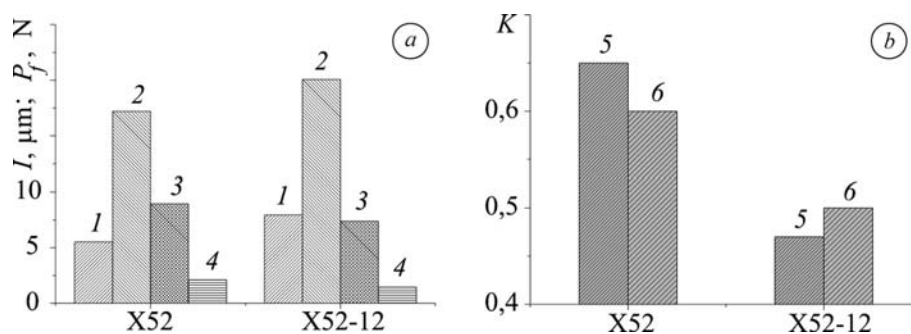


Рис. 5. Вплив експлуатації на знос I (1, 2) і силу тертя P_f (3, 4) (а) та коефіцієнт пластифікування K (5, 6) (б) сталі у вихідному стані (X52) та після експлуатації (X52-12) за статичного (1, 3, 5) і динамічного (2, 4, 6) випроб.

Fig. 5. Effect of service on wear, I , (1, 2) and friction force, P_f , (3, 4) (a) and plastification factor, K , (5, 6) (b) for steel in as-received state (X52) and after service (X52-12) in static (1, 3, 5) and dynamic (2, 4, 6) tests.

Аналогічно нівелюється роль стадії зародження мікроефектів за випроб експлуатованої сталі проти неексплуатованої у корозійному розтріскуванні гладких циліндричних зразків за їх повільного розтягу [8]. Корозивним середовищем був водний розчин, який моделював водний конденсат у газовій трубі. За суто корозивної дії водного конденсату експлуатація практично не впливає на схильність трубної сталі до корозійного розтріскування через її опір зародженню поверхневих тріщин за механізмом локального розчинення, оскільки за наявності втомної тріщини середовище суттєво знижує як механічне навантаження старту тріщини (пороговий рівень корозійної тріщиностійкості), так і швидкість її поширення. Однак за поміркованого електролітичного наводнювання у цьому розчині ($0,1 \text{ A/m}^2$), коли після наступної дегазації металу повністю відновлюються його механічні властивості, схильність експлуатованої сталі до крихкого розтріскування суттєво зростає. Вочевидь це пов'язано з тим, що експлуатаційна мікропошкодженість полегшує стадію зародження тріщин в об'ємі стінки труби за водневим механізмом. Такий механізм підтверджується різким погіршенням характеристик корозійної тріщиностійкості [7] та водневого окрихчення [8] експлуатованих сталей, які чутливі до зміни властивостей металу саме в об'ємі стінки труби. Окрім того, за електролітичного наводнювання корозійно-механічна поведінка металу нижньої частини труби відрізняється від верхньої. Металу нижньої частини труби властивий нижчий опір корозійному розтріскуванню, що узгоджується з більшою її пошкодженістю [7].

Зроблена спроба використати для оцінки експлуатаційної деградації сталі такий статистичний параметр, як розсіювання результатів вимірів – коефіцієнт варіації V механічного показника [10]. Загалом коефіцієнти варіації зносу V_I та твердості V_{HV} суттєво відмінні для металу у вихідному стані та після експлуатації

(рис. 6). Статичним характеристикам (I_s, HV) властиве зменшення коефіцієнта їх варіації, тоді як для циклічним – збільшення. Підвищене значення V_{I_s} порівняно з V_{HV} , з одного боку, обумовлено, в основному, більшим розміром ділянки виміру (доріжки тертя відносно відбитка за вимірювань твердості, тобто більшою ймовірністю контакту пошкод з індентором), а з іншого – невизначеністю початкових умов контактування індентора зі зразком під час вимірів зносу.

Отримані, а також літературні [1–5] результати зміни механічних властивостей трубних сталей X52 після тривалої експлуатації засвідчили, що їх стандартні властивості міняються мало (до 15%). Дещо вища (в межах 15...25%) чутливість до експлуатаційної деградації сталі показники твердості (рис. 7). Ще відчутніший вплив експлуатації на характеристики тертя – зносотривкість, силу тертя та коефіцієнт пластифікування (до 30%). Зауважмо, що за статичного навантаження чутливіші до експлуатації зносотривкість та коефіцієнт пластифікування, а за циклічного – сила тертя. Проте найсильніше експлуатація впливає на коефіцієнти варіації твердості і, особливо, зносотривкості (до 60%).

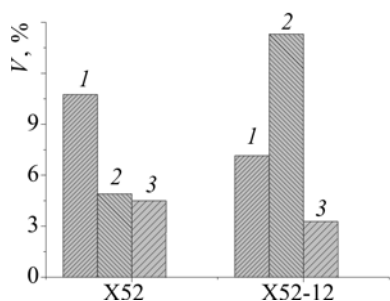


Рис. 6. Fig. 6.

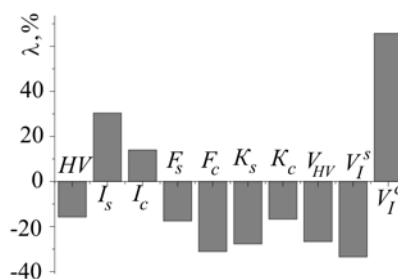


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 6. Вплив експлуатації на коефіцієнт варіації зносу за статичного V_{I_s} (1) та динамічного V_{I_c} (2) навантажень та коефіцієнт варіації твердості V_{HV} (3) сталі X52.

Рис. 6. Effect of service on wear variation factor under static, V_{I_s} , (1) and dynamic, V_{I_c} , (2) loadings and hardness variation factor, V_{HV} , (3) of X52 steel.

Рис. 7. Відносна зміна характеристик твердості і зношування сталі X52 внаслідок експлуатації λ , а також їх коефіцієнтів варіації.

Fig. 7. Relative change, λ , of the characteristics of hardness and wear of X52 steel and their variation factors as a result of steel operation.

ВИСНОВКИ

Параметри індентувань (твердість і тертя) чутливіші до експлуатаційної деградації сталей порівняно зі стандартними механічними характеристиками. Показники розсіювання результатів вимірів (коефіцієнти варіації) механічних характеристик краще відтворюють зміну пошкодженості металу після експлуатації, ніж їх усереднені значення. Отримані результати доводять принципову можливість використання параметрів твердості і зносу трубних сталей для неруйнівного контролю експлуатаційної пошкодженості трубопроводів.

РЕЗЮМЕ. Проаналізовано вплив довготривалої експлуатації трубопроводної сталі API X52 на деградацію її механічних властивостей. Установлено, що після 30 років експлуатації суттєво падають її характеристики міцності та пластичності, особливо різко – показники ударної в'язкості, що пов'язано з розвитком пошкоджуваності. Для порівняльної оцінки матеріалу в початковому стані та після експлуатації використано методи індентування. Показано, що показники розсіювання результатів вимірів (коефіцієнти варіації) механічних властивостей (твердість, знос і др.) більш чутливі до змін пошкодженості металу в результаті експлуатації, ніж їх усереднені значення.

усредненные значения. Установлены определенные корреляции между твердостью по Виккерсу, циклической твердостью, прочностью и пластичностью стали.

SUMMARY. The influence of long-term operation of API X52 pipeline steel on degradation of its mechanical properties is analyzed. It is found that after operation for 30 years there is a significant drop of strength and plasticity characteristics, and especially of the impact toughness, which is associated with the development of damage. Indentation technique for comparative assessment of the exploited and initial material is applied. It is shown that the dispersion of measurement results (or coefficient of variation) of mechanical properties (hardness, wear, etc.) better reflects the difference in metal damages in the initial state and after operation than the average values. Some correlations between Vickers hardness, cyclic hardness as well as the strength and ductility of steel are found.

1. Ямалеев К. М. Старение металла труб в процессе эксплуатации трубопроводов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1994. – 64 с.
2. Измерение структуры и свойств трубной стали во время длительных выдержек под нагрузкой / С. И. Ильин, М. А. Смирнов, Ю. И. Пашков и др. // Изв. Челябинск. науч. центра. Сер. Физ. химия и технологии неорг. материалов. – 2002. – Вып. 4 (17). – С. 42–46.
3. Krasowsky A. Y., Dolgiy A. A., and Torop V. M. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation // Proc. “Charpy Centary Conference”, Poitiers. – 2001. – Vol. 1. – P. 489–495.
4. Пенкин А. Г., Терентьев Г. Ф., Маслов Л. Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости. – Уфа, 2004. – С. 41–49.
5. Нечаев Ю. С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов // Успехи физ. наук. – 2008. – **178**, № 7. – С. 709–726.
6. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite–pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk, K. Nikiforov, and G. Gabetta // Materials and Corrosion. – 2009. – № 9. – P. 716–725.
7. Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т. Особливості експлуатаційної деградації конструкційних сталей “в об’ємі” за дії агресивних середовищ // Проблеми прочності. – 2009. – № 6. – С. 79–94.
8. Цирульник О. Т. Оцінка деградації властивостей як характеристика технічного стану матеріалів конструкцій тривалої експлуатації / Техн. діагностика и неразруш. контроль. – 2009. – № 2. – С. 36–41.
9. Nykyforchyn H. M. and Tsyurulnyk O. T. In-service degradation diagnostics of low-alloyed steels and aluminium alloys properties by electrochemical methods // Ultrasound. Kaunas Ultrasound institute, Lithuania. – 2009. – **64**, № 1. – P. 46–49.
10. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Метод диагностики состояния материала по параметрам рассеяния характеристик твердости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – **69**, № 12. – С. 49–51.
11. Гринкевич К. Э. Комплекс диагностической аппаратуры и методология контроля параметров трибосистемы в динамических условиях испытаний // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 6. – С. 49–51.

Одержано 01.09.2011