

ДІАГНОСТУВАННЯ СХИЛЬНОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ ДО ДЕГРАДАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВНАСЛІДОК ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Г. М. НИКИФОРЧИН, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, О. І. ЗВІРКО, В. А. ВОЛОШИН

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79053, м. Львів-53, вул. Наукова, 5. E-mail: termomech@iapmm.lviv.ua

Розроблено прискорений метод деградації механічних властивостей сталей магістральних трубопроводів у лабораторних умовах, який дозволяє діагностувати схильність сталей та їх зварних з'єднань до деградації внаслідок тривалої експлуатації, що дає можливість прогнозувати зміну роботоздатності трубопроводів в процесі їх експлуатації. Проведено порівняльні дослідження механічних та корозійно-механічних властивостей лабораторно та експлуатаційно деградованих сталей. За базу лабораторну методіку взято відомий метод імітації деформаційного старіння металів за ГОСТ 7268–82. Апробовано новий метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей за кліматичних температурних умов, який полягає у штучному деформаційному старінні попередньо електролітично наводненого металу і поєднує різні механізми деградації: деформаційного зміцнення, деформаційного старіння та розвитку розсіяної пошкодженості. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: експлуатаційна деградація, сталі магістральних трубопроводів, електролітичне наводнення, ударна в'язкість, тріщиностійкість, корозійне розтріскування

На території України експлуатується велика мережа магістральних трубопроводів (МТ) і більш 50 % з них працює після завершення амортизаційного терміну служби. Це призводить до виникнення експлуатаційних відмов, а інколи – до аварій, які обумовлюють не тільки значні матеріальні збитки, але і порушення екологічної безпеки навколишнього середовища. Аналіз причин аварій МТ дозволив встановити, що у багатьох випадках відмови пов'язані з розривами по металу, при цьому більше 50 % конструкцій руйнуються внаслідок корозійних пошкоджень, 37 % аварій викликані незадовільною якістю металу через недостатні пластичність і ударну в'язкість [1]. Вважають, що це спричиняє деформаційне старіння матеріалу трубопроводу впродовж його тривалої експлуатації. З огляду на це експлуатаційну деградацію (ЕД) трубних сталей імітують у лабораторних умовах штучним деформаційним старінням (ШДС) згідно з ГОСТ 7268–82 [2]. Водночас відомо також про особливу вразливість деформованого металу до дії корозійно-водневого чинника. Таким чином, проблема стабільності експлуатаційних властивостей сталей МТ, що зазнають в процесі виготовлення труб суттєвого попереднього пластичного деформування (ППД), особливо гостра і вирішення завдань оцінювання та підвищення роботоздатності такого обладнання часто неможливе без урахування дії цього чинника.

З іншого боку, встановлено, що метал експлуатованих конструкцій містить підвищену концентрацію

розчиненого водню порівняно із неексплуатованим [3–6]. Показано також, що за більшого вмісту водню у сталях спостерігається і сильніша деградація їх властивостей. Звідси запропоновано розглядати ЕД металу як суперпозицію сумісної дії експлуатаційних навантажень і абсорбованого ним водню.

Мета роботи: розробити лабораторний експрес-метод діагностування схильності трубних сталей до експлуатаційної деградації за кліматичних температурних умов, який поєднує різні механізми деградації: деформаційного зміцнення, старіння та розвитку розсіяної пошкодженості, пов'язаної із специфічною дією впродовж активного навантаження абсорбованого металом водню.

Розвиток та верифікація методик лабораторного моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей, що спирається на ШДС попередньо наводненого металу. Дослідження проводили на сталі X52 труб МТ.

У роботі модернізували метод ШДС, що відповідає ГОСТ 52079–2003, введенням операції попереднього електролітичного наводнювання (ПЕН), поверхневим електролітичним мідненням і зменшенням наступного ППД до такого рівня деформації, котра вичерпує межу плинності матеріалу ($\approx 5\%$).

Випробування проводили на двох партіях заготовок. Заготовки першої партії попередньо пластично деформували: навантажували розтягом до різного рівня деформації ε (2,5...15 %) і піддавали відпуску при 250 °C впродовж 1 год – метод ШДС згід-

но ГОСТ 7268–82. Заготовки другої партії – метод ПЕН-ШДС – наводнювали у лужному електроліті (0,1 н р-н NaOH) за сталого струму (50 мА/см²) при температурі 70 °С впродовж 100 год, що забезпечувало насичення воднем усього об'єму зразка. Відновлення характеристик пластичності сталі після десорбції водню із заготовок за витримки при 150 °С впродовж доби вказує на те, що у металі за такого рівня струму у процесі ПЕН не розвивається викликана воднем незворотна пошкодженість. Наступне міднення заготовок із кислого електроліту, що забезпечувало безпористе мідне покриття товщиною до 30 мкм, гальмувало десорбцію водню впродовж навантаження розтягом до 4 % залишкової деформації і ШДС. Однак перед виготовленням зразків мідне покриття зішліфовували із заготовок і витримували їх при 150 °С впродовж доби для десорбції водню.

Із заготовок виготовляли циліндричні зразки для визначення стандартних механічних властивостей (межі плинності $\sigma_{0,2}$, межі міцності σ_b , відносного звуження ψ і відносного видовження δ) та зразки Шарпі для визначення ударної в'язкості KCV.

Для верифікації запропонованого методу порівнювали експериментально визначені механічні характеристики сталі X52 у вихідному стані, після ШДС згідно ГОСТ 7268–82 та після ШДС запропонованим методом.

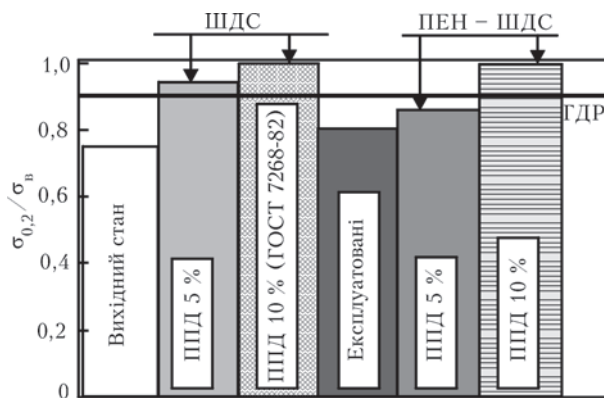


Рис. 1. Порівняння значень відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ сталі X52 після лабораторних методів деградації із максимальною його зміною внаслідок тривалої експлуатації трубних сталей

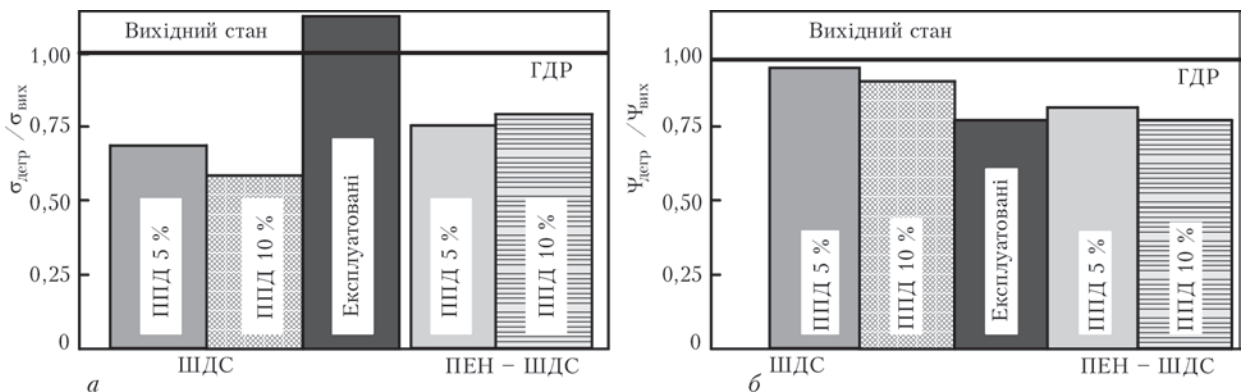


Рис. 2. Порівняння відносної зміни δ (а) і ψ (б) сталі X52 після лабораторних методів деградації із максимальною їх зміною внаслідок тривалої експлуатації трубних сталей (ГДР – гранично допустимий рівень)

ШДС згідно ГОСТ 7268–82 надто інтенсифікує деформаційне зміцнення, що спричиняє перевищення гранично допустимого рівня відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ (рис. 1) і різке падіння відносного видовження (рис. 2), чого не спостерігається при дослідженні ЕД металу [3–7]. Водночас ШДС не справляє істотного впливу на ψ .

Подібні результати отримано при дослідженні впливу такої обробки на механічні властивості трубної сталі 17ГС у двох вихідних станах – після контрольованого вальцювання та після нормалізації, а також трубних сталей контрольованого вальцювання 10Г2БТ, X70, 10Г2Т і 13ГС [8, 9].

Ефект ШДС на ударну в'язкість слабший порівняно із впливом тривалої експлуатації (рис. 3).

Менший рівень ППД у запропонованому методі ПЕН–ШДС зумовлює очікувано суттєво меншу зміну δ і $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ порівняно із ШДС. Однак при цьому отримано значно сильніше зниження іншої характеристики пластичності – ψ , а особливо KCV.

Тобто за меншого деформаційного зміцнення у наводненому металі паралельно протікав інший процес його окрихчення. Очевидно, розвиток саме розсіяної пошкодженості в процесі ШДС наводненого металу, подібно як і за тривалої експлуатації, зумовлює і співмірні зміни механічних властивостей сталі.

Отримані результати за зміною механічних властивостей сталі вказують на те, що ШДС ненаводненого металу, особливо згідно ГОСТ 52079–2003, не узгоджуються із закономірностями впливу експлуатаційної деградації:

- спричиняє ріст відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ вище гранично допустимого;
- не справляє істотного впливу на відносне звуження;
- вплив на ударну в'язкість і тріщинотійкість істотно менший, ніж в процесі експлуатації;
- спричиняє занадто сильне падіння відносного видовження, а за ГОСТ 52079–

2003 методики – нижче гранично допустимого рівня.

Отже методика ШДС конструкційних сталей згідно ГОСТ 52079–2003 не забезпечує тих змін механічних властивостей, що спостерігається за реальних умов експлуатації, тому її використання для імітації експлуатаційної деградації трубних сталей у лабораторних умовах обмежена.

Водночас при застосуванні деформаційного старіння наводненого металу отримано результати, близькі до експлуатаційних:

- не спричиняє такого різкого зростання відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, якщо ППД $\leq 5\%$;
- вплив на відносне звуження, ударну в'язкість і тріщиностійкість співмірний з впливом експлуатації;
- спричиняє занадто сильне падіння відносно-го видовження, однак менше, ніж за використання гостованої методики і не нижче гранично допустимого рівня.

Отже, ШДС наводненого металу реальніше відтворює сукупність всіх фізичних процесів експлуатаційної деградації металу порівняно із ШДС ненаводненого металу. Насамперед це пов'язано із специфічною дією впродовж активного навантаження абсорбованого металом водню, який окрім інтенсифікації деформаційного старіння (першої фази експлуатаційної деградації – зменшення відносного звуження і видовження, ударної в'язкості і тріщиностійкості, збільшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$), ініціює також і розвиток розсіяної пошкоженості (другої фази експлуатаційної деградації – збільшення відносного видовження, зменшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ і ще сильнішого зниження ударної в'язкості).

Порівняльний аналіз впливу лабораторних методів ШДС і експлуатаційної деградації сталі X52 на її корозійно-механічні властивості. Із заготовок виготовляли також зразки для визначення наступних корозійно-механічних характеристик:

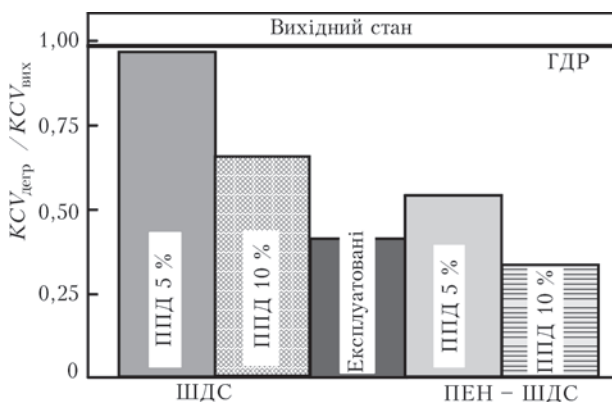


Рис. 3. Порівняння відносної зміни KCV сталі X52 після лабораторних методів деградації із максимальною їх зміною внаслідок тривалої експлуатації трубних сталей

– Ψ_{SCC} – відносного звуження випробуваннями у корозивному середовищі за потенціалу корозії;

– J_{SCC} – порогового рівня тріщиностійкості при випробуваннях у корозивному середовищі за потенціалу корозії.

З огляду на те, що із закономірностями впливу експлуатаційної деградації найкраще узгоджуються зміни механічних властивостей сталі внаслідок ШДС наводненого металу за використання ППД 5%, в подальшому досліджували вплив саме цих умов лабораторної деградації на її корозійно-механічні властивості і порівнювали їх із впливом гостованої методики, а також із впливом експлуатації.

Корозійно-механічні характеристики сталі визначали випробуваннями у модельному розчині водного конденсату за потенціалу корозії та за поміркованого наводнювання (0,1...0,2 мА/см²).

У вихідному стані високопластична трубна сталь характеризується високим опором до корозійного розтріскування, оскільки відносне звуження гладких зразків випробуваннями у корозивному середовищі при потенціалі корозії практично не змінюється (рис. 4, а).

Після ШДС згідно ГОСТ 52079–2003 відносне звуження сталі випробуваннями у корозивному середовищі зменшується майже на 20%, тобто вона втрачає імунітет до цього виду корозійно-механічного руйнування. Проте експлуатованій сталі властивий набагато менший опір до корозійного розтріскування, у корозивному середовищі її відносне звуження зменшується майже на 40%. Очевидно така різниця зумовлена тим, що гостована методика зумовлює деформаційне зміцнення і вичерпує в основному рівномірну деформацію, що і проявляється у незначній зміні відносного звуження (див. рис. 2), яке визначається мірою локалізації деформації у «шийці» при зародженні та розвитку пошкодження у об'ємі металу, на фоні суттєвого зменшення відносного видовження, на яке мало впливає локальна деформація у шийці. Незважаючи на те, що корозійно-механічне руйнування поширюється з поверхні, опір корозійному розтріскуванню також визначається здатністю корозивного середовища локалізувати деформацію, яка ініціює зародження дефекту. Тому ШДС згідно ГОСТ 52079–2003 порівняно із тривалою експлуатацією слабше впливає на опір сталі корозійному розтріскуванню.

ШДС наводненого металу, не впливаючи на рівномірну деформацію, вичерпує його пластичність саме за умов локалізації, що різко знижує і його опір корозійному розтріскуванню.

Ці результати можуть бути підтвердженням гіпотези про розвиток (поряд із деформаційним

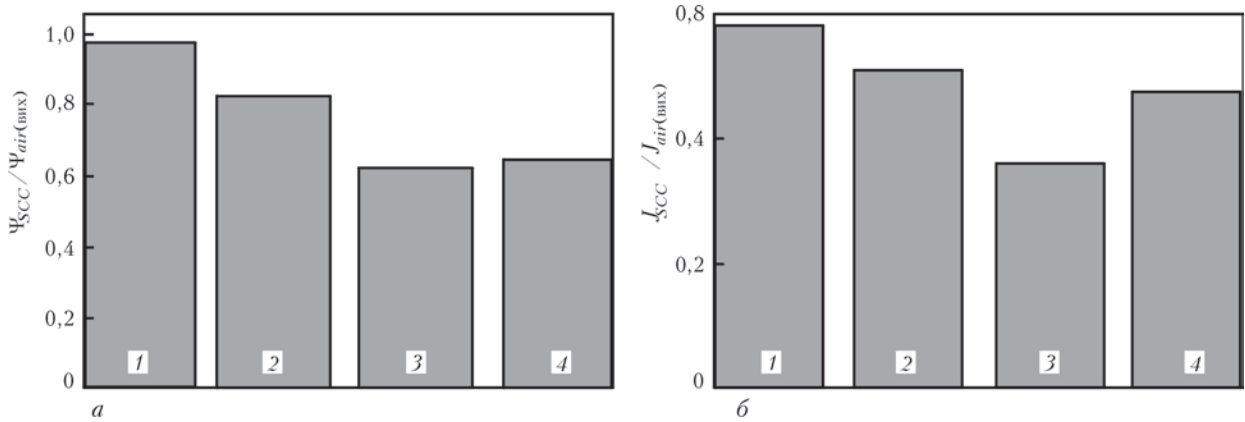


Рис. 4. Порівняння відносної зміни опору корозійному розтріскуванню (а) та корозійно-статичної тріщиностійкості (б) сталі X52 за потенціалу корозії після лабораторних методів деградації із їх відносною зміною внаслідок тривалої експлуатації: 1 – вихідний стан; 2 – за ГОСТ 7268–82; 3 – експлуатаційна деградація; 4 – за запропонованою методикою

старінням), об'ємної пошкодженості (дефектності) металу внаслідок його експлуатаційної деградації. Саме наявність дефектів у експлуатованому металі обумовлює таку різницю у деформівній поведінці експлуатованої і неексплуатованої сталі. Відповідно і краща узгодженість результатів впливу ШДС наводненого металу та експлуатації на опір корозійному розтріскуванню сталі вказують на розвиток пошкодженості в процесі деформування під впливом абсорбованого водню. Очевидно цього не відбувається за використання гостованої методики, що вказує на перевагу запропонованої методики для імітації експлуатаційної деградації трубних сталей у лабораторних умовах.

Випроби зразків з тріщиною засвідчили, що корозійно-статична тріщиностійкість трубної сталі навіть у вихідному стані є дуже низькою (рис. 4, б). Таким чином, високий опір сталі корозійному розтріскуванню визначається високим її опором зародженню корозійної тріщини. За наявності попередньо вирощеної втомної тріщини опір сталі корозійному розтріскуванню, тобто корозійно-статична тріщиностійкість, різко падає.

Після обох лабораторних методів ШДС корозійно-статична тріщиностійкість сталі дещо знижується. Однак їх вплив за таких випробувань менший, ніж за випробувань гладких зразків, оскільки наявність наперед вирощеної втомної тріщини усуває стадію зародження корозійної тріщини, що також нівелює вплив пошкодженості внаслідок ШДС наводненого металу і, тим самим, обумовлює співмірний ефект обох лабораторних методів. А зниження корозійно-статичної тріщиностійкості сталі внаслідок лабораторних методів деформаційного старіння відображає тільки ефект її зміцнення.

Водночас тривала експлуатація сталі спричиняє суттєве падіння її корозійно-статичної тріщиностійкості навіть у порівнянні із випробуваннями зразків після лабораторних методів деформацій-

ного старіння. Це зумовлено, очевидно, не тільки зміцненням внаслідок осадження атомів вуглецю і азоту на дислокаціях, а й іншими змінами у тонкій структурі, що протікають впродовж тривалої експлуатації за дії експлуатаційних чинників.

Висновки

Методика штучного деформаційного старіння сталі X52 за ГОСТ 7268–82 спричиняє сильний ріст відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, вище гранично допустимого за ГОСТ 52079–2003 рівня, а також незначне окрихчення металу, що проявляється неістотним зниженням відносного звуження, ударної в'язкості та характеристик корозійно-механічного руйнування. Це вказує на певні обмеження її застосування з огляду на занадто сильно виражене деформаційне зміцнення сталі, чого не досягається за реальних умов експлуатації трубних сталей.

Запропоновано новий експрес-метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей за кліматичних температурних умов, який полягає у штучному деформаційному старінні попередньо електролітично наводненого металу і поєднує різні механізми деградації (деформаційного зміцнення, старіння та розвитку розсіяної пошкодженості). Метод дозволяє діагностувати схильність трубної сталі до експлуатаційної деградації її механічних характеристик та прогнозувати негативний вплив тривалої експлуатації на роботоздатність трубопроводу.

Запропонований метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей викликає за менших рівнів попереднього пластичного деформування і, відповідно, незначного зростання відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ лабораторно деградованої сталі співмірне зниження характеристик пластичності, подібно до випробувань експлуатованих сталей. Також вона спричиняє різке падіння ударної в'язкості, тріщиностійкості і опору корозійному роз-

тріскуванню, подібно до результатів випробувань експлуатованих сталей.

Переваги запропонованого методу моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей пов'язані із специфічною дією впродовж активного навантаження абсорбованого металом водню, який окрім інтенсифікації деформаційного старіння (першої фази експлуатаційної деградації – зменшення відносного звуження і видовження, ударної в'язкості, статичної і корозійно-статичної тріщиностійкості, збільшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$) ініціює також і розвиток розсіяної пошкодженості (другої фази експлуатаційної деградації – збільшення відносного видовження, зменшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, опору корозійному розтріскуванню і ще сильнішого зниження ударної в'язкості, статичної і корозійно-статичної тріщиностійкості).

1. Иванцов О. М. Надежность магистральных трубопроводов / О. М. Иванцов, В. И. Харитонов. – М.: Недра. – 1978.
2. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб: ГОСТ 7268-82. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 4 с.

An accelerated method of degradation of mechanical properties of main pipeline steels under laboratory conditions was developed, which allows diagnosing the susceptibility of steels and their welded joints to degradation as a result of long-term service that enables prediction of the change of pipeline serviceability during their operation. Comparative studies of mechanical and corrosion-mechanical properties of steels, degraded in the laboratory and in operation, were performed. Well-known method of simulation of strain ageing of metals to GOST 7268-82 was taken as the basic laboratory procedure. A new method of modeling operational degradation of pipe steels under climatic temperature conditions was tried out that consists in artificial strain ageing of preliminarily electrolytically hydrogenated metal and combines different degradation mechanisms, strain hardening, strain ageing and development of scattered damage. 9 References, 4 Figures.

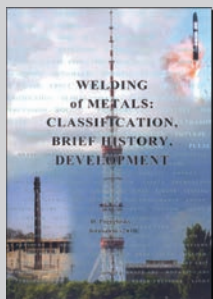
Key words: operational degradation, steels of main pipelines, electrolytic hydrogenation, impact toughness, crack resistance, corrosion cracking

Надійшла до редакції
09.06.2016

NEW BOOK

Pogrebisky D. (2016) *Welding of Metals: Classification, Brief History, Development*, 380 pp., 250 pictures, a dozen of tables, 205 x 290 mm, hard cover, Jerusalem, Israel. The book price is \$175.

In June, 2016 the former staff member of Paton Welding Institute published in Jerusalem a new book «Welding of Metals: Classification, Brief History, Development». It gives a lot of information about metal welding processes, including ones not listed in American and European normative documents which the author tries to match to each other. For the purpose of international harmonization, a preliminary attempt was made to provide a unified classification of about 300 welding methods based on the abbreviations that are similar to ones adopted in the American Welding Society.



At the same time the book author tried to create the impartial review of historical metal welding developments against a background of general sciences evolution and progress of adjacent processes. Some comparative, economic and other considerations are given too together with a rich illustrative material and large number of references.

The book may be useful for different welding specialists, industrial engineers, designers of precision metal structures and various electro-mechanical devices as well as for students of relevant specialties.

Orders for book please send to:
POB 31445, Jerusalem 91313, Israel
www.actualweld.com