

ЕКСПРЕС-МЕТОД ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДІВ

Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, О. І. Звірко, Н. В. Крет

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

Abstract. The experimental express method that consists in the artificial deformation aging of preliminary electrolytically hydrogen charged metal and combines different mechanisms of degradation (deformation aging, aging and development of dissipated damaging) has been developed for degradation simulation of pipeline steels.

Вступ. Для матеріалів тривалої експлуатації, зокрема, нафто- та газопроводів, важливо враховувати деградацію їх властивостей порівняно з вихідним станом. Водночас важливим аспектом у прогнозуванні експлуатаційної деградації матеріалів є її лабораторне моделювання, що особливо актуально для нових матеріалів, технологій виготовлення чи оброблювання, коли відсутня достатня база даних зміни вихідних властивостей під час експлуатації. Відомий стандартизований експрес-метод [1], яким у лабораторних умовах імітують зміну механічних властивостей сталей внаслідок експлуатації. Він полягає у попередньому (на 10%) пластичному деформуванні металу з подальшим відпуском при 250°C упродовж 1 год, що спричиняє деформаційне старіння матеріалу (утворення на дислокаціях хмар Котрелла [2], зокрема, вуглецю, що зменшує їхню рухливість). Це зміцнює метал, однак знижує його пластичність та опір крихкому руйнуванню. На низці модельних прикладів обґрунтовано роль водню в деградації сталей, яка полягає в інтенсифікації розвитку мікропошкодженості і, тим самим, зниженні опору сталей крихкому руйнуванню, а також розвинуто експериментальний метод моделювання деградації металу, який враховує його наводнювання.

В даній роботі розвинуто експериментальний експрес-метод експлуатаційної деградації сталей магістральних трубопроводів.

Методичні особливості експериментальних досліджень. Об'єкт досліджень – труба сталь API 5L X52 (аналог вітчизняної сталі типу 17ГС), яку десятки років тому широко використовували для побудови магістральних нафтогазопроводів. Відповідно для таких сталей накопичена найбільша база даних їхньої експлуатаційної деградації [7].

Відомий стандартизований метод [1], який базується лише на деформаційному старінні металу, модифікували додатковим попереднім електролітичним наводнюванням зразків [3–6]. Таким чином, пластично деформували наводнений метал і допускали, що це обумовить розвиток мікропошкодженості, що, своєю чергою, спричинить зниження опору крихкому руйнуванню, характерне для тривало експлуатованих трубних сталей [7].

Досліджували сталь X52 труб запасу та магістрального газопроводу, який експлуатували 30 років. З труби запасу магістрального газопроводу діаметром 408 мм та товщиною стінки 12 мм вирізали в осьовому напрямі заготовки розміром 10×6×220 мм. Випробовували дві серії заготовок: одну піддали деградації за стандартизованим методом штучного деформаційного старіння (ШДС) згідно з ГОСТ 7268-82 [1], а до іншої застосували запропонований метод з попереднім електролітичним наводнюванням та наступним штучним деформаційним старінням (ПЕН+ШДС). Заготовки першої серії навантажували розтягом до різного рівня деформації ε (5–10%), а потім відпускали при 250°C впродовж 1 год. Заготовки другої серії наводнювали у лужному електроліті (0,1 N водний розчин NaOH) за постійного струму густиною 50 мА/см² при температурі 70°C впродовж 100 год. Застосовували поміркований режим наводнювання для забезпечення, з одного боку, насичення воднем усього об'єму зразка, а з іншого – запобігання розвитку в металі пошкоджень під час наводнювання. Наступна стадія у процедурі лабораторної деградації металу – навантаження розтягом наводнених заготовок до певного рівня деформації ε . Далі їх

відпускали при 250°C впродовж 1 год. для реалізації ШДС, а також екстракції водню із металу. Із заготовок виготовляли циліндричні зразки з робочою частиною діаметром 5 мм та довжиною 25 мм для визначення границь плинності $\sigma_{0,2}$ та міцності σ_B , відносних звуження ψ і видовження δ , а також зразки Шарпі для визначення ударної в'язкості KCV . Аналізували також відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ як показник резерву пластичності металу, що регламентується під час виготовлення труб.

Апробація експрес-методу деградації трубних сталей. Результати впливу експлуатації впродовж 30 років та різних методів лабораторної деградації на механічні властивості сталі X52 порівняно зі значеннями для вихідного стану (труби запасу) і подано у вигляді діаграм. Випробування зразків з першої серії заготовок показали, що ШДС по-різному діє на механічні властивості: суттєво інтенсифікує деформаційне зміцнення, що спричиняє перевищення гранично допустимого значення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ (рис. 1) та різке зниження відносного видовження (рис. 2а), чого зазвичай не спостерігали під час дослідження експлуатованого металу [7–10]. Водночас ШДС на ψ істотно не впливає (рис. 2б).

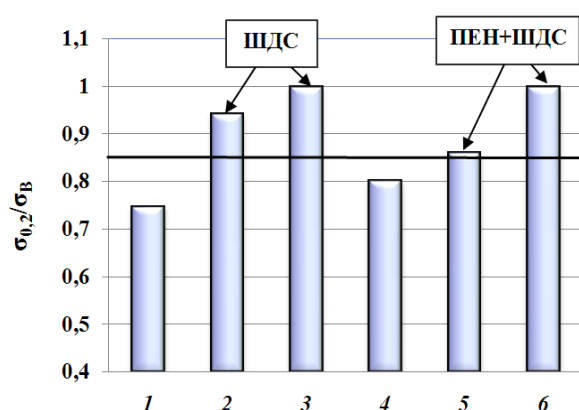


Рис. 1. Відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ для сталі X52 у вихідному стані (1) та його зміна відносно вихідного стану після лабораторних методів деградації (2, 5 – попередня пластична деформація (ППД) 5%; 3, 6 – ППД 10% та після тривалої експлуатації (4); 3 – ШДС згідно з ГОСТ 7268-82. Лінією позначено гранично допустиме значення.

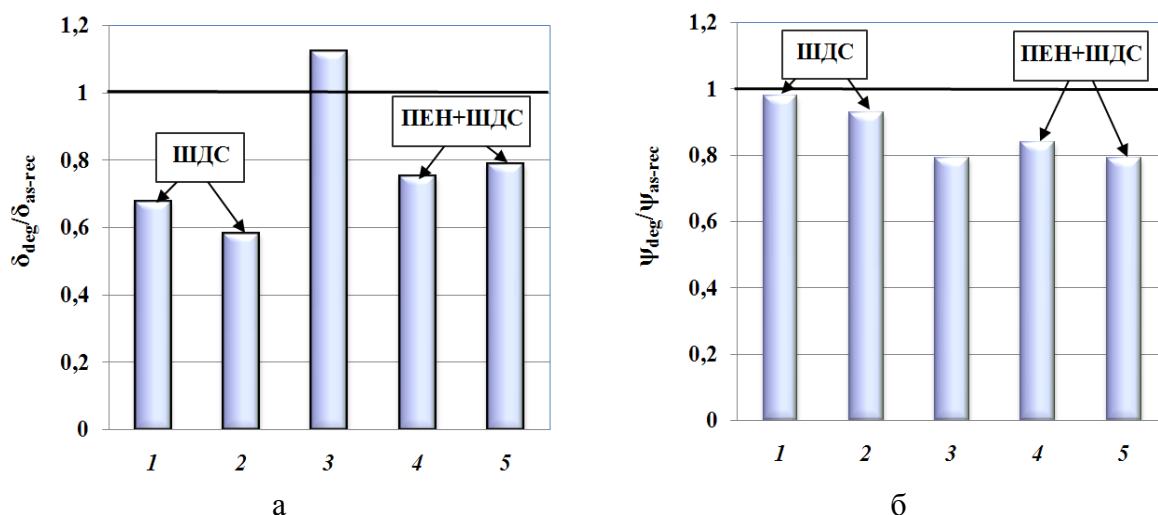


Рис. 2. Зміни показників δ (а) і ψ (б) для сталі X52 після лабораторних методів деградації (1, 4 – ППД 5%; 2, 5 – ППД 10%) та після тривалої експлуатації (3) відносно їх значень у вихідному стані (лінія); 2 – ШДС згідно з ГОСТ 7268-82.

Вплив ШДС на ударну в'язкість слабший порівняно із дією тривалої експлуатації (рис. 3). Отримані результати за зміною механічних властивостей дослідженої сталі

вказують на те, що ШДС наводненого металу, особливо згідно з ГОСТ 7268-82, не узгоджуються із закономірностями впливу експлуатаційної деградації на механічну поведінку: спричиняє ріст $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ вище гранично допустимого; вплив на відносне звуження несуттєвий, а на ударну в'язкість істотно менший, ніж експлуатації; спричиняє занадто сильне зниження відносного видовження, а за використання методики згідно з ГОСТ 7268-82 – нижче гранично допустимого рівня.

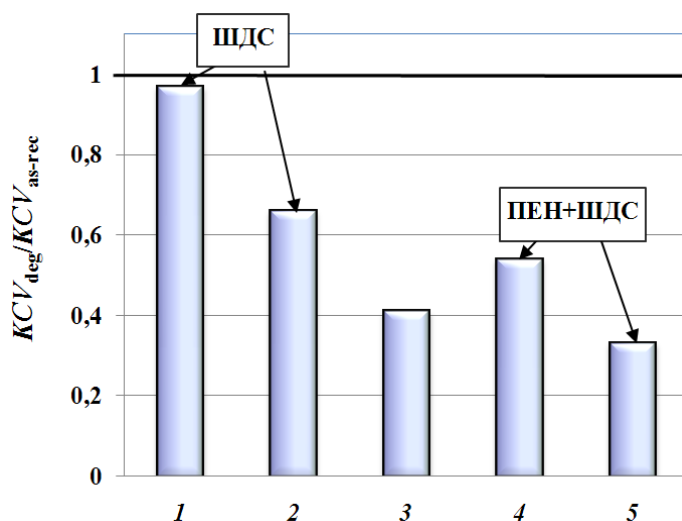


Рис. 3. Зміни показників KCV для сталі X52 після лабораторних методів деградації (1, 4 – ППД 5%; 2, 5 – ППД 10%) та після тривалої експлуатації (3) відносно їх значень у вихідному стані (лінія); 2 – ШДС згідно з ГОСТ 7268-82.

Отже, методика ШДС конструкційних сталей, згідно з ГОСТ 7268-82, не забезпечує тих змін механічних властивостей, які спостерігали за реальних умов експлуатації, тому її використання для імітації експлуатаційної деградації трубних сталей у лабораторних умовах обмежене. У запропонованому методі ПЕН+ШДС низький рівень попередньої пластичної деформації (ППД) зумовлює очікувано істотно меншу зміну δ і $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ порівняно із ШДС. Однак, отримали суттєво сильніше зниження іншої характеристики пластичності – ψ , а особливо KCV . Тобто, під час застосування деформаційного старіння наводненого металу одержали результати, близькі до властивостей експлуатаційного металу: без різкого зростання $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, якщо ППД $\leq 5\%$; вплив на відносне звуження та ударну в'язкість співмірний з дією експлуатації; занадто сильне зниження відносного видовження, однак менше, ніж за використання методики згідно з ГОСТ 7268-82, і не нижче гранично допустимого рівня.

Очевидно, під час ШДС у наводненому металі паралельно відбувався інший процес його окрихчення – розвиток розсіяної пошкоженості, і саме це, подібно як за тривалої експлуатації, зумовлює співмірні зміни механічних властивостей сталі.

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, збільшення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$), ініціює також і розвиток розсіяної пошкоженості (другої фази експлуатаційної деградації – збільшення відносного видовження, зменшення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ і подальшого зниження ударної в'язкості) [10].

Висновки. Методика штучного деформаційного старіння сталі X52 за ГОСТ 7268-82 спричиняє істотне підвищення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ (вище гранично допустимого рівня, згідно з ГОСТ 31447-2012), а також незначне окрихчення металу, що проявляється неістотним зниженням відносного звуження та ударної в'язкості. Це вказує на певні обмеження її застосування з огляду на сильно виражене деформаційне

зміцнення сталі, чого не досягається за реальних умов експлуатації трубних сталей. Запропоновано 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, старіння та розвитку розсіяної пошкодженості). Цей метод викликає за менших рівнів попереднього пластичного деформування і, відповідно, незначного зростання $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ лабораторно деградованої сталі співмірне зниження характеристик пластичності та різке зменшення ударної в'язкості, подібно до результатів випроб експлуатованих трубних сталей.

Робота виконана за часткової підтримки проекту М/1835–2019 МОН України „Розроблення експрес-методу лабораторної симуляції експлуатаційної деградації конструкційних сталей енергетики для оцінювання їх схильності до корозійного розтріскування”.

Список використаної літератури

- ГОСТ 7268-82. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 4 с.
- Cottrell A. H., Bilby B. A. Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron // Proc. of the Physical Soc. Sec. A. – 1949. – 62. – P. 49–62.
- Метод лабораторної деградації конструкційних сталей / О. Т. Цирульник, Н. В. Крет, В. А. Волошин, О. І. Звірко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – т. 53, № 5. – С. 85–93.
- Патент 85446 Україна: МПК51 G01N 3/56. Спосіб моделювання експлуатаційної деградації конструкційних сталей магістральних трубопроводів / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, О. І. Звірко, М. І. Греділь. – Опубл. 25.11.13; Бюл. № 22.
- Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength / O. I. Zvirko, S. F. Savula, V. M. Tsependa, G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn // Proc. Struct. Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 509–516.
- Діагностування схильності трубної сталі до деградації властивостей внаслідок тривалої експлуатації / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, О. І. Звірко, В. А. Волошин // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2016. – № 3. – С. 33–37.
- Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. / Під заг. ред. З. Т. Назарчука. Т. 1: Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є. І. Крижанівський, О. П. Остап, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, П. В. Ясній. – Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.
- Nykyforchyn H. M., Kurzydowski K.-J., Lunarska E. Hydrogen degradation of steels under long-term in-service conditions / **Eds.:** S. A. Shipilov, R. H. Jones, J.-M. Olive, R. B. Rebak // Environment-Induced Cracking of Materials. Prediction, Industrial Developments and Evaluations. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – Vol. 2. – P. 349–361.
- In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska, P. P. Zonta, O. T. Tsyurulnyk, K. Nikiforov, M. I. Hredil, D. Yu. Petryna, T. Vuherer // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 1. – С. 88–99.
- Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. T. Tsyurulnyk, K. Nikiforov, M. E. Genarro, G. Gabetta // Eng. Failure Analysis. – 2010. – 17. – P. 624–632.