

УДК 620.017:669.017

**В.А. Волошин, М.І. Греділь, О.Т. Цирульник, П.Я. Сидор**  
**ОЦІНКА СХИЛЬНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ**  
**ДЕГРАДАЦІЇ**

*У роботі на основі літературних даних та власних результатів наведено загальні закономірності зміни основних механічних характеристик сталей внаслідок експлуатаційної деградації. Показано переваги розробленого методу моделювання експлуатаційних змін, який полягає у попередньому наводнюванні металу з подальшим витриманням за тривалого статичного навантаження. Розглянуто можливість контролю стану матеріалу неруйнівними методами, зокрема, вимірюванням електрохімічних характеристик.*

*Ключові слова:* експлуатаційна деградація, труба сталь, моделювання, механічні властивості.

*Рис. 8. Літ. 7.*

**В.А. Волошин, М.И. Гредиль, О.Т. Цирульник, П.Я. Сидор**  
**ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ К**  
**ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ**

*В работе на основе литературных данных и собственных результатов приведены общие закономерности изменения основных механических характеристик сталей в результате эксплуатационной деградации. Показаны преимущества разработанного метода моделирования эксплуатационных изменений, который состоит в предварительном наводороживании металла с последующей выдержкой под длительной статической нагрузкой. Рассмотрена возможность контролирования состояния материала неразрушающими методами, в частности, измерением электрохимических характеристик.*

*Ключевые слова:* эксплуатационная деградация, трубные стали, моделирование, механические свойства.

**V. Voloshyn, M. Hredil, O. Tsyurulnyk, P. Sydor**  
**EVALUATION OF STRUCTURAL STEELS SUSCEPTIBILITY TO IN-SERVICE**  
**DEGRADATION**

*General regularities of changes in the main mechanical characteristics of steels due to in-service degradation are given in this work on the basis of both literature data and our own results. Advantages of the elaborated method of in-service changes modelling are shown. It consists in preliminary hydrogenation of a specimen using cathodic polarization with following long term static loading. Finally the possibility to control of material state is considered using non-destructive testing, in particular, by electrochemical characteristics evaluation.*

*Keywords:* in-service degradation, pipe steels, modelling, mechanical properties.

**Вступ.** Територією України пролягає велика мережа магістральних трубопроводів, і більшість із них працює після 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 довкілля. Аналіз причин аварій МТ дозволив у багатьох випадках встановити, що відмови пов'язані з розривами металу загалом, або по кільцевих стикових швах. Понад 50% конструкцій руйнуються внаслідок корозійних пошкоджень, 37% аварій викликані незадовільною якістю металу – недостатньою пластичністю і ударною в'язкістю [1].

Вважають, що під час експлуатації відбувається деформаційне старіння матеріалу трубопроводу. З огляду на це експлуатаційну деградацію трубних сталей імітують за лабораторних умов штучним деформаційним старінням (ШДС) згідно з ГОСТ 7268-82 [2]: деформуванням до 10% з подальшим відпуском при 250°C упродовж години, який активізує процес старіння. Проте, як свідчить низка робіт [3–5], ШДС низьколегованих сталей дуже наближено імітує експлуатаційну деградацію сталей. Насамперед, надто інтенсифікує деформаційне зміцнення, що спричиняє перевищення гранично допустимого рівня відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ , і різке падіння відносного видовження, чого не спостерігається для експлуатаційно деградованого металу. Водночас ефект ШДС на ударну в'язкість слабший порівняно із впливом тривалої експлуатації, наприклад, КСВ нафто- [4] і газопроводів [5] падає втричі.

З іншого боку, встановлено, що концентрація розчиненого водню у металі експлуатованих конструкцій підвищена порівняно із не експлуатованим [5]. Показано також, що за більшого вмісту водню у сталях деградація їх властивостей сильніша. Звідси запропоновано розглядати експлуатаційну деградацію металу як суперпозицію дії експлуатаційних навантажень і абсорбованого ним водню.

У роботі виконано порівняльний аналіз закономірностей зміни механічних властивостей сталей типу 17ГС, з одного боку, в часі експлуатації магістральних трубопроводів, опираючись на літературні джерела, а з іншого – після імітації експлуатаційної деградації методом на основі

ГОСТ, та запропонованим нами лабораторним методом, особливістю якого є попереднє електролітичне наводнювання зразків з подальшим їх витриманням під тривалим статичним навантаженням (ПЕН-СН). Крім того, проаналізовано перспективи діагностування деградації механічних властивостей сталі неруйнівними методами з використанням електрохімічних характеристик.

**Методики і матеріали.** Досліджували механічні властивості сталі 17ГС, яку широко використовують під час виготовлення труб для магістральних нафто- і газопроводів. Випробування проводили на двох партіях заготовок. Заготовки першої партії попередньо пластично деформували (ППД): навантажували розтягом до різного рівня деформації  $\varepsilon$  (2,5...15%) і піддавали відпуску при 250°C впродовж 1 год. Заготовки другої партії електролітично наводнювали у лужному електроліті (0,1н р-н NaOH) при температурі 70°C впродовж 100 год, що забезпечувало концентрацію дифузійно рухомого водню 0,7 см<sup>3</sup>/100 г металу. Попередніми випробуваннями встановлено, що за такого режиму вплив водню на механічну поведінку сталі за стандартних випроб розтягом незначний. Після наводнювання для блокування виходу газу із металу за подальшого довготривалого статичного навантаження заготовки електролітично міднили із кислого електроліту, що забезпечувало безпористе мідне покриття товщиною до 30 мкм. Покриті міддю заготовки навантажували розтягом до вибраного рівня напружень і витримували впродовж певного часу. Тоді мідне покриття знімали, а заготовки відпускали при 250°C впродовж 1 год для екстракції із металу водню, а також для реалізації процесу штучного старіння. Із заготовок виготовляли циліндричні зразки для визначення стандартних механічних властивостей (границі плинності  $\sigma_{0,2}$ , граници міцності  $\sigma_B$ , відносного звуження  $\psi$  і відносного видовження  $\delta$ ) та зразки Шарпі для визначення ударної в'язкості KCV.

**Результати і обговорення.** Деформування зразків до різного рівня залишкової деформації показує, що відносні механічні показники наближаються до своїх екстремальних значень за  $\varepsilon = 10\%$  (рис. 1). Таке деформування співпадає з вимогами за ГОСТ 7268-82. Очевидно, ця методика застосовна для оцінки схильності матеріалу до експлуатаційної деградації за зміною його опору крихкому руйнуванню, бо інші механічні показники при цьому перебуватимуть за межами регламентованих допусків. Зокрема, відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  вийде за межу дозволеного рівня вже при деформації 5%, а відносне видовження перетне межу за деформації у 7,5%. Водночас відомо, що за реальних умов експлуатації магістрального трубопроводу експлуатований матеріал не змінює механічні властивості у таких межах.

Тому такі рівні деформування не дозволяють адекватно оцінити зміну властивостей матеріалу внаслідок тривалої експлуатації. Окрім того, вказана методика не враховує вплив водню на деградацію властивостей матеріалу. Для обґрунтування правомірності різних підходів до оцінки стану матеріалу порівняли реальні зміни ключових механічних характеристик трубних сталей у часі експлуатації зі змінами, що отримані внаслідок моделювання деградації за відомим методом ГОСТ та запропонованим нами методом.

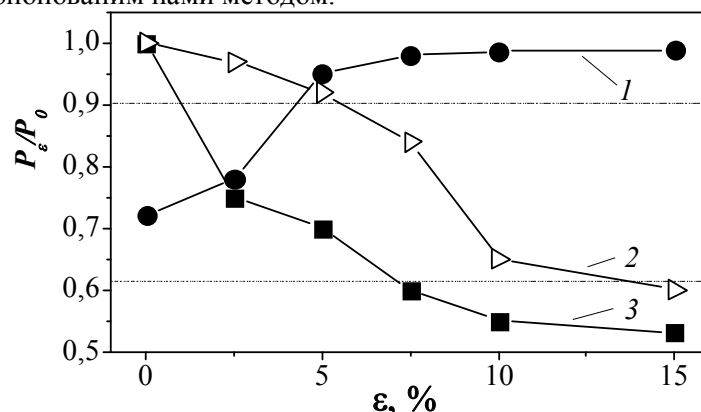


Рис. 1. Зміна відносних механічних показників залежно від рівня деформування: 1 –  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ ; 2 –  $\psi$ ; 3 –  $\delta$

**Відносне звуження  $\psi$ .** Сталі 17ГС властиві високі характеристики пластичності. Експлуатаційна деградація трубних сталей виказує поступове в часі зменшення параметра  $\psi$  (рис. 2а). Після 40 років експлуатації він може впасти майже на 30%, що свідчить про значне окрихчення металу впродовж його експлуатації. Штучне старіння сталі без ППД і з ППД до 2,5%

не впливає на  $\psi$ . За подальшого збільшення  $\varepsilon$  їх сумісний вплив дещо знижує  $\psi$ . Проте навіть за максимального ППД воно зменшується не більше ніж на 10% (рис. 2б). Після ПЕН-СТ у пружній області навантаження ( $0,8 \sigma_{0,2}$ )  $\psi$  сталі практично не міняється. Витримка за напружень, дещо вищих  $\sigma_{0,2}$  ( $\varepsilon = 2 \dots 2,5\%$ ), впродовж 10 діб також незначно вплинуло на відносне звуження  $\psi$ , і тільки після 20 діб воно знизилось на 15% (рис. 2в).

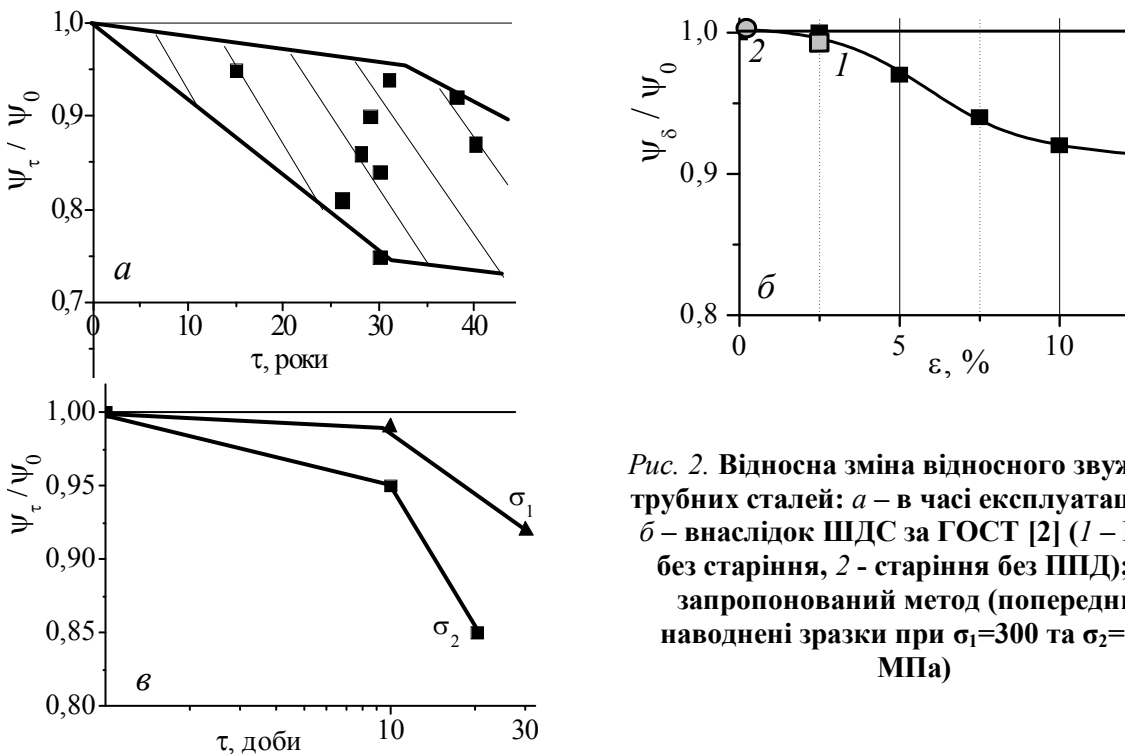


Рис. 2. Відносна зміна відносного звуження трубних сталей: а – в часі експлуатації [4]; б – внаслідок ШДС за ГОСТ [2] (1 – ППД без старіння, 2 – старіння без ППД); в – запропонований метод (попередньо наводнені зразки при  $\sigma_1=300$  та  $\sigma_2=400$  МПа)

Відносне видовження  $\delta$ . Дещо іншу залежність зафіксовано для іншого показника пластичності –  $\delta$  (рис. 3) Упродовж 20–25 років експлуатації сталей  $\delta$  зменшується на третину (рис. 3а), а в багатьох літературних джерелах значення  $\delta$  менші регламентованого в ГОСТ 52079-2003 значення 20%. Однак за подальшої експлуатації  $\delta$  зростає і після 30–40 років може вже на 30% перевищувати початкові значення. ППД до 2,5% та штучне старіння знижують  $\delta$  до 10%, а за сумісного впливу – до 25% (рис. 3б). Збільшення ППД спричиняє хоч і менше, та подальше зниження  $\delta$ , а за ППД більше 7% воно опускається нижче гранично допустимого для трубних сталей рівня. Відносне видовження зразків після ПЕН-СН за витримки в пружній області навантаження впродовж 10 діб дещо падає, але після 30 діб зростає вище вихідного рівня (рис. 3в). Витримка за вищих напружень сильніше впливає на відносне видовження: після 20 діб  $\delta$  знижується до 15% і не відмічено тенденції до його збільшення.

Відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ , регламентований ГОСТ для трубних сталей показник, упродовж експлуатації міняється неоднозначно. На противагу  $\delta$ , відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  впродовж 20–25 років експлуатації сталей зростає, однак не досягає гранично допустимого рівня (рис. 4а). За подальшої експлуатації цей показник зменшується і може після 40 років досягати вихідного значення. ППД до 2,5% без старіння мало впливає на границю плинності сталі і, відповідно, на відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  (рис. 4б). Дещо сильніше впливає штучне старіння сталі на відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ . З огляду на індивідуальні впливи штучного старіння і ППД до 2,5% сталі можна говорити про адитивний характер їх сумісного впливу, однак він різко зростає за подальшого збільшення  $\varepsilon$ : вже при ППД 5% відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  перевищує гранично допустимий для трубних сталей рівень і при  $\varepsilon = 7,5\%$  наближається до 1. ПЕН-СТ зразків за витримки у пружній області навантаження практично не впливає на границю міцності, водночас границя плинності і, відповідно, відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  після 30 діб зростає на 5-7% (рис. 4в). Витримка за напружень у пластичній області дещо збільшує границю міцності. Проте  $\sigma_{0,2}$  зростає набагато сильніше і відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ , наближається до гранично допустимого для трубних сталей.

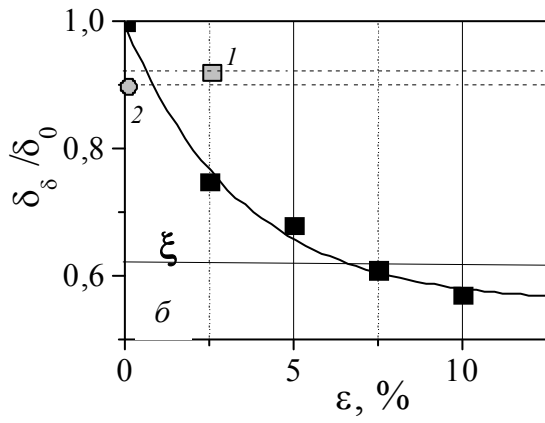
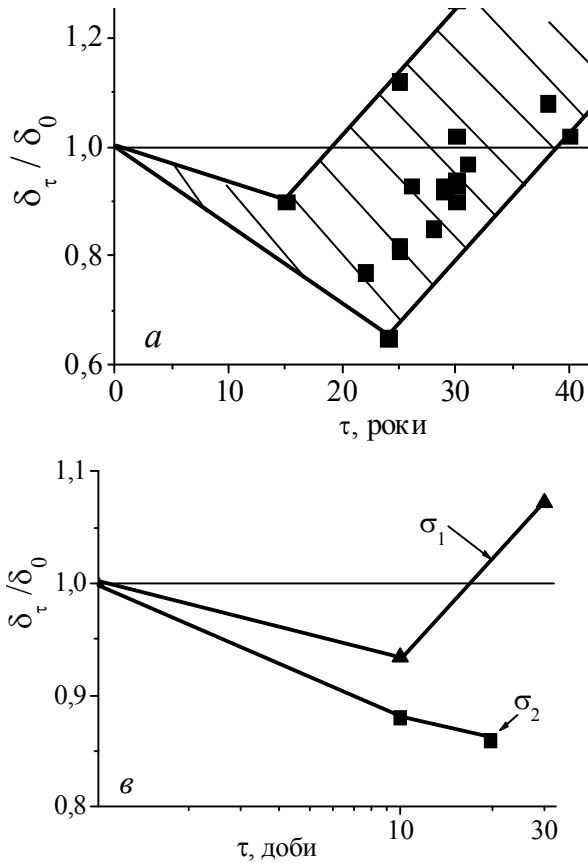


Рис. 3. Відносна зміна відносного видовження трубних сталей: а – в часі експлуатації [4], б – внаслідок ШДС за ГОСТ [2] (1 – ППД без старіння, 2 – старіння без ППД) в – запропонований метод (попередньо наводнені зразки при  $\sigma_1=300$  та  $\sigma_2=400$  МПа);  $\xi$  – гранично допустимий рівень

Опір крихкому руйнуванню. Окрихчення трубних сталей внаслідок їх тривалої експлуатації проявляється, у першу чергу, саме у зниженні їх характеристик опору крихкому руйнуванню – ударної в'язкості (рис. 5а). Впродовж перших 10 років експлуатації магістральних трубопроводів КСВ сталей зменшується на 10–30%, а після 30–40 років їх експлуатації може

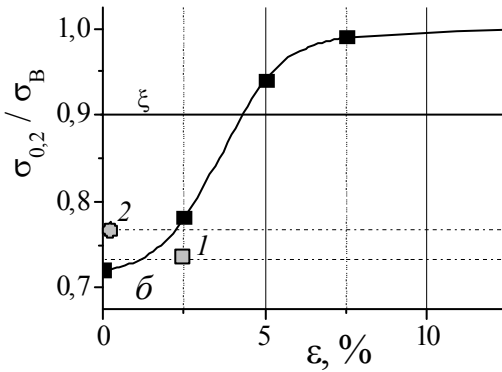
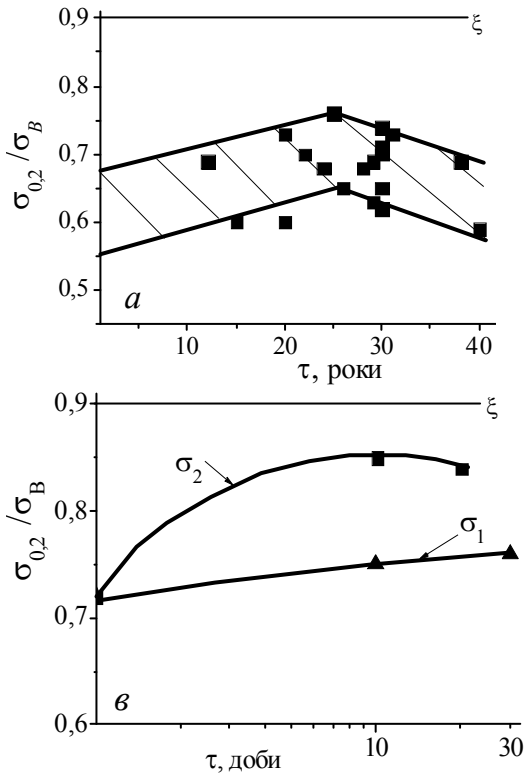


Рис.4. Зміна відношення  $\sigma_{0.2} / \sigma_B$  трубних сталей: а – в часі експлуатації [4], б – внаслідок ШДС за ГОСТ [2] (1 – ППД без старіння, 2 – старіння без ППД) в – запропонований метод (попередньо наводнені зразки при  $\sigma_1=300$  та  $\sigma_2=400$  МПа);  $\xi$  – гранично допустимий рівень

впасти до рівня, втричі меншого від вихідного. Такого різкого падіння не зазнає жодний інший механічний параметр. Штучне старіння сталі без ППД і з ППД до 2,5% практично не впливає на її

ударну в'язкість (рис. 5б). За подальшого збільшення ППД сумісно із штучним старінням  $KCV$  знижується пропорційно величині попередньої деформації до  $\varepsilon = 7,5\%$ , за більших ППД спостерігається різкий її спад і знову слаба пропорційна залежність від  $\varepsilon$ . ПЕН-СТ зразків

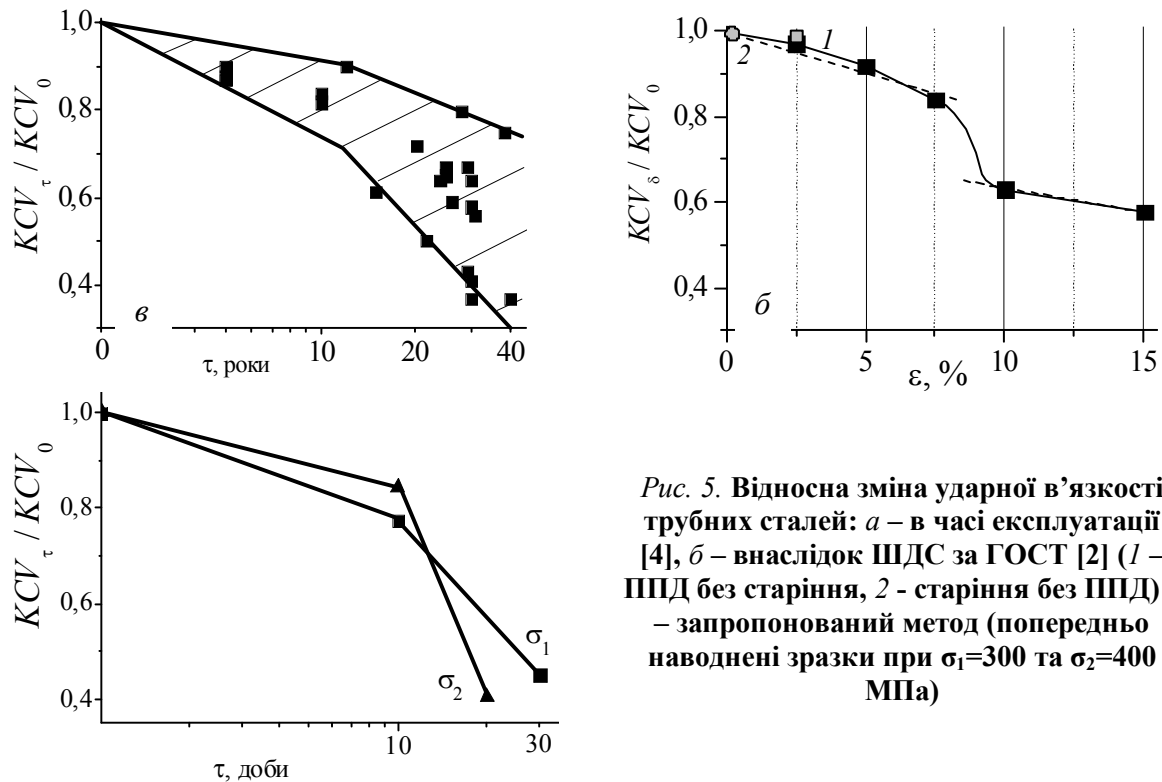


Рис. 5. Відносна зміна ударної в'язкості трубних сталей: а – в часі експлуатації [4], б – внаслідок ШДС за ГОСТ [2] (1 – ППД без старіння, 2 – старіння без ППД) в – запропонований метод (попередньо наводнені зразки при  $\sigma_1=300$  та  $\sigma_2=400$  МПа)

однозначно знижує характеристики опору сталі крихкому руйнуванню (рис. 5в). При цьому за витримки до 10 діб ефект зниження  $KCV$  не залежить від величини прикладеного навантаження. Лише за тривалішої витримки проявляється сильніший вплив навантаження у пластичній області.

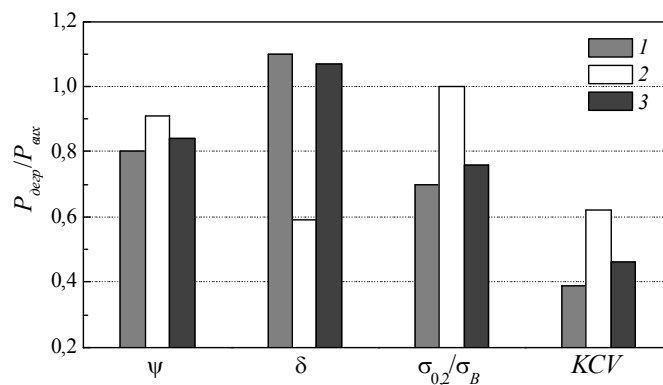


Рис. 6. Відносні зміни стандартних механічних характеристик трубних сталей, отримані: 1 – внаслідок експлуатації; 2 – моделюванням деградації за ГОСТ; 3 – запропонованим методом

Ці результати вказують на те, що запропонована методика реальноше відтворює сукупність всіх структурних процесів експлуатаційної деградації металу порівняно із ГОСТованою. Насамперед це пов'язано із специфічною дією впродовж тривалої витримки під статичним навантаженням 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  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  та подальшого зниження ударної в'язкості) [7].

Узагальнивши наведені результати, можна з упевненістю стверджувати, що запропонована нами методика моделювання експлуатаційної деградації краще відтворює зміни в металі, спричинені деградацією, порівняно із загальноприйнятою [2] (рис. 6), оскільки в ній враховано не

лише процеси деформаційного старіння, але і вплив агресивних середовищ, що за сумісної дії з робочими навантаженнями призводять до розвитку мікропошкодженості у сталях [7].

*Вплив експлуатаційної деградації та ППД на електрохімічні властивості сталі.* ППД сталі в діапазоні  $\varepsilon = 2,5 \dots 15\%$  зменшує її поляризаційний опір  $R_p$ , що підтверджує відомий негативний вплив деформації та навантаження на корозійну тривкість сталей (рис. 7). Такий вплив обумовлений механічною активацією металу через зростання внутрішньої енергії його ґратки і накопичення дефектів, які полегшують роботу іонізації заліза. Останні слугують також центрами сорбції корозійно агресивних компонентів середовища, з ростом кількості яких корозія посилюється. Зафіксована раніше тенденція до зниження  $R_p$  в часі експлуатації сталі 17ГС подібна до впливу експлуатації на механічні властивості металу цих труб. Про перспективу використання фізико-хімічних характеристик взаємодії метал-середовище для оцінювання технічного стану металу магістральних трубопроводів свідчить яскраво виражена кореляція між відносними змінами, з одного боку, ударної в'язкості, і з іншого – поляризаційного опору (рис. 8).

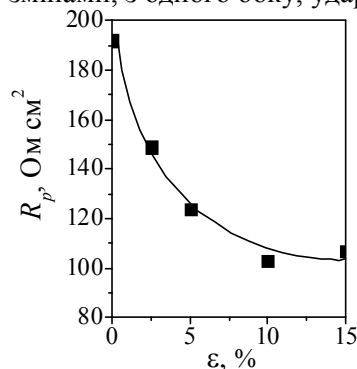


Рис. 7. Поляризаційний опір  $R_p$  пластично деформованої трубної сталі 17ГС

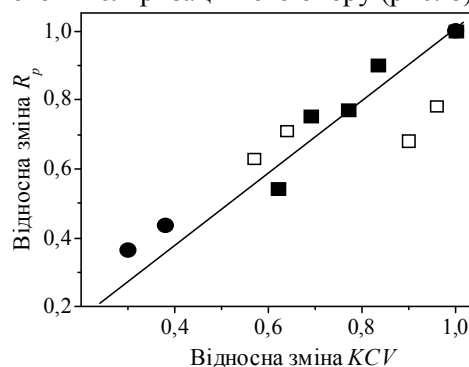


Рис. 8. Кореляційна залежність між відносними змінами механічної (КСУ) та електрохімічної ( $R_p$ ) характеристик трубних сталей 17Г1С (□, ■) та Х52 (●): світлі символи – ППД; темні – експлуатована

**Висновки.** Основні механічні характеристики трубних сталей зазнають суттєвих змін у часі тривалої експлуатації. Погіршення стану металу спричинене сумісним впливом експлуатаційних навантажень та робочого середовища.

Запропонований метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей, на відміну від регламентованого ГОСТ 7268-82, викликає подібні з впливом тривалої експлуатації закономірності зміни їх відносного видовження й звуження, та відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ . Він також спричиняє сумірне з результатами випроб експлуатованих сталей падіння ударної в'язкості.

Поляризаційний опір чутливий до деградації трубної сталі внаслідок її попереднього пластичного деформування, а також тривалої експлуатації, що вказує на можливість застосування неруйнівних методів контролю технічного стану магістральних трубопроводів на основі моніторингу цього показника.

1. *Иванцов О. М.* Надежность магистральных трубопроводов / О. М. Иванцов, В. И. Харитонов. – М., Недра. – 1978. – 166 с.
2. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб: ГОСТ 7268-82. – [Действующий от 1983-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 4 с.
3. Экспериментальная оценка состояния металла длительно работающих нефтепроводов / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, В. И. Кирьян и др. // Автомат. сварка. – 2001. – № 5. – С. 18–22.
4. *Крижанівський Є. І.* Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-тех. пос. у 3-х т. / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; за ред. В. В. Панасюка. – Т.3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франків. нац. тех. ун-ту нафти і газу, 2012. – 433 с.
5. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, К. М. Ямалеев, Г. В. Журавлев, Ф. И. Бадиков. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2001. – 231 с.
6. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – №1. – С. 88–99.
7. *Nykyforchyn H.* Two stages in hydrogen assisted degradation of the properties of long-term service structural steels / H. Nykyforchyn, K.-J. Kurzydowski // Proc. 18<sup>th</sup> European Conference on Fracture, ECF-18: "Fracture of Materials and Structures from Micro and Macro Scale", Dresden, Germany, 2010. – Dresden: ESIS, DVM, 2010. – CD ROM. – Proceeding ID 4: A. 04. 3-5.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2013.