

УДК 620.19:620.17

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ (Огляд)

О. І. ЗВІРКО

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

Проаналізовано механізм деградації сталей перлітного класу залежно від умов експлуатації, насамперед, температури, напружень та наводнювання. Систематизовано мікроструктурні, механічні та електрохімічні ознаки експлуатаційної деградації конструкційних сталей, її основні стадії. Найхарактернішою ознакою є зниження опору крихкому руйнуванню, що підвищує ризик втрати цілісності конструкцій. Виділено стадію розвитку розсіяної пошкодженості на нано- і мікрорівні та пов'язані з цим певні механічні ефекти. Розглянуто лабораторні методи прискореної деградації сталей. Показано особливу роль наводнювальних середовищ у деградації сталей та проаналізовано неруйнівні методи її діагностування. Розглянуто перспективи досліджень експлуатаційної деградації сталей водневої енергетики, пов'язаної з використанням існуючої мережі транзитних і розподільчих газопроводів для транспортування водню чи сумішей природного газу з ним.

**Ключові слова:** *сталь, експлуатація, водень, мікроструктура, механічні властивості, корозія, опір крихкому руйнуванню, воднева крихкість.*

The mechanism of degradation of pearlitic steels depending on operational conditions, first of all, temperature, stresses and hydrogenation, is analyzed. Microstructural, mechanical and electrochemical indicators of operational degradation of structural steels and its main stages are systematized. The most characteristic feature is a decrease in resistance to brittle fracture, which increases the risk of the structural integrity loss. The stage of development of dissipated damaging at the nano- and microscales and associated mechanical effects are highlighted. In-laboratory methods of accelerated steel degradation are considered. The special role of hydrogenating environments in the steel degradation process is shown, and non-destructive evaluation methods are analyzed. Research perspectives in operational degradation of steels for hydrogen energy associated with a usage of an existing network of gas transit and distribution pipelines for transportation of hydrogen or its mixtures with natural gas are considered.

**Keywords:** *steel, operation, hydrogen, microstructure, mechanical properties, corrosion, resistance to brittle fracture, hydrogen embrittlement.*

**Вступ.** Деградація тривало експлуатованих конструкційних сталей є однією з основних проблем інженерної практики сьогодення [1] і полягає у зміні мікроструктури, нано- і мікромеханізму руйнування та погіршенні загалом їх фізико-механічних властивостей. Вона особливо важлива під час оцінювання поточного стану матеріалів відповідальних конструкцій, які експлуатуються за сумісної дії механічного навантаження та корозивно-наводнювальних середовищ, оскільки за таких умов інтенсифікується розвиток розсіяної пошкодженості в об'ємі металу на нано- та мікрорівні. Внаслідок пошкодженості знижуються механічні та корозійно-механічні властивості, посилюється чутливість металу до водневої крихкості, корозійного та водневого розтріскування, що найчастіше є причиною раптового руйнування конструкцій. Тому деградація сталей суттєво впливає на на-

---

*Контактна особа:* О. І. ЗВІРКО, e-mail: olha.zvirko@gmail.com

дійність та довговічність об'єктів тривалої експлуатації і її необхідно враховувати під час діагностування технічного стану конструкцій, що вимагає ефективних методів неруйнівного контролю поточного структурно-механічного стану сталей.

В огляді розглянуті основні закономірності експлуатаційної деградації сталей перлітного класу за впливу на них корозивних і наводнювальних середовищ та методи їх діагностування.

**Зміни у мікроструктурі.** Під час експлуатації феритно-перлітних сталей за високих температур їх мікроструктура зазнає відчутних структурно-фазових змін [2, 3], зокрема, змінюється співвідношення між фазами: легувальні елементи внаслідок інтенсивних дифузійних процесів перерозподіляються, внаслідок чого збіднюється ферит, частково розпадається перліт та відбувається перерозподіл карбідної фази (утворення карбідів з легувальними елементами, сфероїдизація та укрупнення). Виділення та ріст карбідів структурно залежні і пов'язані з накопиченням та перерозподілом дислокацій за умов повзучості і супроводжуються пороутворенням на міжфазних межах карбід (неметалева включення)–матриця та у феритних зернах на субмежах, формуючи з часом їх ланцюжки, від яких зароджуються міжзеренні тріщини.

Під час експлуатації конструкцій за кліматичних умов мікроструктурні зміни відбуваються дуже повільно, тому їх складно виявляти [4, 5]. Матеріал зазнає, насамперед, деформаційного старіння, зумовленого нерівноважністю вихідної мікроструктури та релаксаційністю процесів під час експлуатації [6], як наслідок, у феритно-перлітних сталях може формуватися коміркова субструктура з неоднорідним розподілом дислокацій – вищим на стінках комірок [5–7]. Еволюційні зміни у структурі перліту під час деформаційного старіння сталей відбуваються суттєво повільніше [7], ніж у феритних зернах. Деформаційне зміцнення сталей під час експлуатації внаслідок осідання атомів вуглецю та азоту на утворених дислокаціях утруднює мікропластичну деформацію і релаксацію пікових напружень.

За експлуатації феритно-перлітних сталей утворюються зерномежові карбіди, які фіксують просвітлювальною електронною мікроскопією [4]. Цьому передуює дифузія вуглецю з феритних зерен до їх меж; згідно з розрахунками для сталі контрольованого вальцювання, цей період становить ~ 24 роки, а тривалість утворення карбідів ~ 1 рік. Цей час співмірний з тривалістю експлуатації трубних сталей, після якої спостерігають значне зниження опору крихкому руйнуванню. На цей процес впливає технологія виготовлення сталі (ступінь пересичення фериту вуглецем, розмір зерен, вміст легувальних елементів і неметалевих включень, які перешкоджають дифузії вуглецю до меж зерен) та умов експлуатації (температура і рівень робочих напружень). Зокрема, що менше зерно, то менше часу потрібно для дифузії вуглецю у кількості, достатній для формування карбідів нанотовщини; робочі напруження утричі скорочують тривалість старіння порівняно з ненапруженим станом металу, а підвищення температури експлуатації (зокрема, поблизу компресорних станцій) – на порядок. У праці [8] запропоновано модель, згідно з якою, під час експлуатації феритно-перлітних сталей утворюється суцільна мережа карбогідридних зерномежових наносегрегацій (типу  $Fe_2CH_{0,6...2}$ ) товщиною ~ 1 nm, які можуть взаємодіяти з воднем, окрихчуючи метал. Їх утворення визначає дифузія необхідної кількості надлишкових атомів вуглецю з феритних зерен до їх меж, яка у багатьох випадках становить не менше 10 років, при цьому достатньо дифузії вуглецю з тіла зерна до його меж на віддаль всього ~ 1  $\mu m$  (рис. 1) [9].

Моделі, запропоновані у працях [4, 8], не враховують інтенсифікації дифузії вуглецю воднем [10], який проникає у сталь внаслідок її взаємодії з корозивними середовищами [11–14] і, відповідно, прискорює деформаційне старіння сталей.

Для наводненого металу, очевидно, зростає роль температури та робочих напружень як чинників пришвидшення дифузії водню, а отже, і його деформаційного старіння. Загалом вважають, що міжфазні межі є найефективнішими пастками для водню [15]. Згідно з працею [16], водень під час старіння металів концентрується здебільшого в дислокаційних (низькоенергоємних) пастках всередині зерен (в атомарному стані), а напруження підвищують здатність металу пасткувати водень [17]. Водночас за сумісної дії напружень та водню він локалізується у вакансіях та їх скупченнях [16, 17], при цьому зростає їх густина та відбувається об'єднання. На пасткування водню у сталі суттєво впливає вуглець, займаючи замість нього дефекти ґратки. Так, зі збільшенням вмісту вуглецю у сталі від 6 ppm до 0,1% енергія зв'язку між дислокаціями та воднем зменшується від 24,9 до 17,7 kJ/mol, при цьому знижується частка водню у дислокаційних пастках [18]. Відповідно водень, з одного боку, прискорює старіння сталей утворенням зерномежових карбідів, а з іншого – полегшує міжзеренне крихке руйнування за механізмом водневої крихкості.

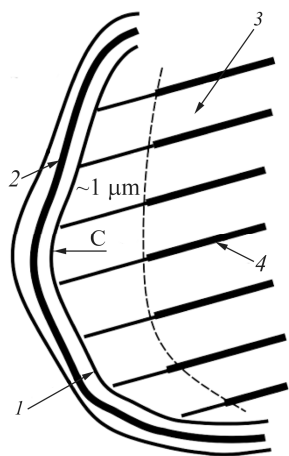


Рис. 1. Схема утворення мережі карбідів нанотовщини на межах зерен феритно-перлітної сталі за її тривалої експлуатації [9]. 1 – межа зерна; 2 – наночар карбідів; 3 – тіло зерна; 4 – цементит.

Fig. 1. Scheme of formation of a network of nanocarbidеs at the grain boundaries of ferritic-pearlitic steel under long-term operation [9]. 1 – grain boundary; 2 – nanocarbide layer; 3 – grain body; 4 – cementite.

Концепцію [8] стосовно утворення упродовж тривалої експлуатації на межах зерен мережі карбідів (карбогідридів) нанотовщини розвинуто у праці [19]. Припустили, що експлуатація зумовлює дифузію вуглецю, яку інтенсифікує водень, також і всередині зерен до дефектів типу меж субзерен та утворення там нанопрошарків карбідів (карбогідридів), які спричиняють крихке кризьзеренне руйнування. Це підтвердили електрохімічно діагностованим підвищеним вмістом вуглецю на поверхнях кризьзеренного відколу, утвореного випробами на ударну в'язкість експлуатованого металу [19]. Утворення нанорозмірних (10...100 nm) карбідів всередині феритних зерен спостерігали у праці [6], фіксуючи також подрібнення і коагуляцію частинок цементиту на окремих ділянках пластинчатого перліту.

#### **Зміна механічних, корозійних та корозійно-механічних характеристик.**

Внаслідок експлуатаційної пошкодженості сталей фіксують погіршення їх механічних [6, 8, 12, 13, 20–32], корозійно-механічних [13, 22–25] та корозійних [11, 21, 22, 25, 33, 34] характеристик, посилення їх чутливості до водневої крихкості, корозійного та водневого розтріскування [13, 23, 27, 31, 35], що найчастіше є причиною раптового руйнування конструкцій.

Для коректного оцінювання стану експлуатованого металу важливо вибрати інформативні показники, чутливі до експлуатаційної деградації. Найчастіше її ступінь оцінюють за зміною міцності, пластичності, твердості та опору крихкому руйнуванню, оскільки вони здебільшого регламентуються нормативними документами. Узагальнено [25, 36] зміну механічних властивостей феритно-перлітних вальцьованих сталей внаслідок їх тривалої експлуатації та, ґрунтуючись на цьому, виділено дві стадії деградації: I – деформаційне старіння; II – розвиток розсіяної пошкодженості, яка відбувається через підстадії ПА – розвитку розорієнтованої

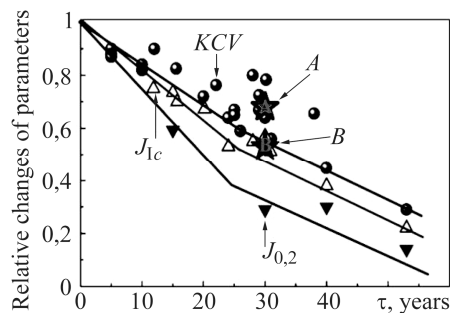
пошкодженості і ПВ – орієнтування пошкоджень у напрямі вальцювання. Характеристики міцності, пластичності та твердисті є слабо чутливими до деградації сталей. Відносне видовження через розкриття численних дефектів під час навантаження зразка розтягом може іноді збільшуватися і, відповідно, некоректно характеризувати зміну пластичності сталі [20, 21, 25, 36]. Однак найчутливішими є характеристики опору крихкому руйнуванню (рис. 2), з яких вирізняють тріщиностійкість та ударну в'язкість  $KCV$  [12, 13, 35, 36]. Здебільшого застосовують останній показник механічного стану металу, зважаючи на доступність та простоту випроб. Для досліджень вальцьованих сталей важливим є напрям вирізання зразків: перевагу надають радіальним та поперечним стосовно напрямку вальцювання зразкам [27–29, 36]. Ефективним інструментом для оцінювання експлуатаційної деградації сталей є побудова кривих холодноламкості з визначенням температури крихко-в'язкого переходу, яка здебільшого є чутливішою, ніж ударна в'язкість за кімнатної температури випроб [12, 22].

Є спроби посилити чутливість ударної в'язкості, вирізнивши певні складові енергії руйнування, зокрема, опір матеріалу росту тріщини. Зокрема, у праці [13] визначили окремо енергії, які витрачаються на зародження та поширення тріщини, і показали, що саме складова опору росту тріщини (складова  $B$  показника  $KCV$  на рис. 2) відповідальна за зниження опору крихкому руйнуванню сталі внаслідок її тривалої експлуатації.

Що стосується використання показників тріщиностійкості на основі підходів механіки руйнування, то слід вирізнити окремо статичну тріщиностійкість (в'язкість руйнування), а окремо характеристики росту втомної тріщини. У першому випадку критичні значення чи коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{Ic}$ , чи для високопластичних матеріалів  $J$ -інтеграла ( $J_0$  за стартом тріщини або  $J_{0,2}$  за приростом тріщини 0,2 mm) належать до найчутливіших для оцінювання деградації сталей [13, 23, 25, 36] (рис. 2). Перевагу віддають показнику  $J_{0,2}$ , оскільки він безпосередньо характеризує опір матеріалу певному приросту тріщини.

Рис. 2. Вплив тривалості експлуатації на зміну характеристик  $KCV$ ,  $J_{Ic}$  та  $J_{0,2}$  для трубних сталей API 5L X52 та API 5L X60:  
 $A$  – загальна енергія руйнування  $KCV$ ;  
 $B$  – енергія поширення тріщини (складова  $KCV$ ) [13].

Fig. 2. Effect of operation time on changes in the characteristics  $KCV$ ,  $J_{Ic}$  and  $J_{0,2}$  for API 5L X52 and API 5L X60 pipeline steels:  
 $A$  – total fracture energy  $KCV$ ;  
 $B$  – crack propagation energy (component of  $KCV$ ) [13].



Для оцінювання експлуатаційної деградації сталей ефективною виявилася концепція механічної стабільності, під якою розуміють комбінацію характеристик міцності та пластичності, яка забезпечує елемент конструкції від крихкого руйнування у заданих експлуатаційних умовах [37]. Запропоновано застосовувати показник істинної пластичної деформації сталі у момент руйнування, який визначають з істинної діаграми напруження–деформація, для оцінювання міри деградації сталей, особливо для тих, чиї базові характеристики пластичності внаслідок експлуатації змінюються незначно [31, 32].

Структурно-механічна анізотропія вальцьованих сталей суттєво підвищується внаслідок їх експлуатаційної деградації, зокрема, ударна в'язкість  $KCV$  труб-

ної сталі X60 після 25 років роботи для осьових і радіальних зразків відрізняється майже у 6 та 9 разів для вихідного та експлуатованого станів, відповідно [29]. Подібні результати отримано і для вальцьованих сталей наднормативно експлуатованих портових кранів [28]. За дії низки негативних чинників (конденсація вологи, перепад температур тощо) вальцьовані феритно-перлітні сталі схильні до утворення розшарувань значних розмірів [36, 38].

Експлуатаційне зниження корозійної тривкості сталей [11, 19, 20, 22, 33, 34]. проявляється в інтенсифікації катодних та анодних процесів на деградованих сталях, збільшенні густини струму корозії, зниженні поляризаційного опору (рис. 3) та зміщенні потенціалу корозії у бік від'ємніших значень порівняно зі сталями у вихідному стані. Фіксують також незначне зниження констант Тафеля анодної реакції для експлуатованих сталей, що вказує на полегшення перебігу реакції анодного розчинення [34].

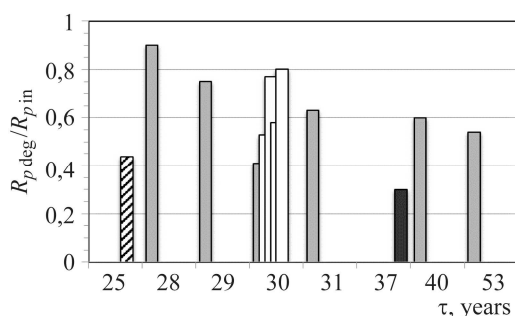


Рис. 3. Відносна зміна поляризаційного опору  $R_{p\ deg}/R_{p\ in}$ , зумовлена експлуатаційною деградацією, для трубних сталей 17Г1С (□), X52 (□), X60 (▨) та X70 (■) [34].

Fig. 3. Relative changes in polarisation resistance  $R_{p\ deg}/R_{p\ in}$  for the 17Г1С (□), X52 (□), X60 (▨) and X70 (■) pipeline steels caused by long-term operation [34].

Високочутливі до деградації і характеристики корозійно-механічного руйнування [24, 39, 40]. За таких умов корозивне середовище інтенсивніше окрихчує метал в експлуатованому стані, очевидно, за водневим механізмом. Виявлено посилення негативного впливу корозивних середовищ на циклічну тріщиностійкість експлуатованих сталей [24, 39, 40], найбільше за високої асиметрії циклу навантаження та потенціалу катодного захисту [39]. Пришвидшення втомного росту тріщини в експлуатованій сталі найінтенсивніше за значень  $\Delta K$ , які відповідають середній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування, що вказує на схильність сталі до корозійного розтріскування в умовах циклічного навантаження. Показано [41], що деформаційно зістарені трубні сталі характеризуються вищою чутливістю до корозійного розтріскування.

**Лабораторні методи прискореної деградації сталей.** Посилена останнім часом увага до проблеми експлуатаційної деградації сталей зумовила розвиток лабораторних методик їх прискореної деградації. Для умов високотемпературної експлуатації запропоновано метод термоцикування зразків у газоподібному водні від кімнатної до робочої температур (для сталей паропроводів ТЕС це  $\sim 550^\circ\text{C}$ ) швидкісним нагрівом зразків електричним струмом [42]. Метод базується на можливості насичення воднем за високої температури, а також враховує термо-механічну втому металів. Для забезпечення фіксації досягнутої термоцикуванням концентрації водню у сталі, яка за таких умов на порядки вища рівноважної, застосовують швидке охолодження водою. В результаті мікроструктура феритно-перлітних сталей змінюється впродовж 100...300 термоциклів подібно як за десятки років експлуатації на паропроводах та супроводжується подібними експлуатаційними змінами механічних властивостей, насамперед, характеристик опору крихкому руйнуванню.

Для кліматичних температур експлуатації запропоновано метод [41, 43], який базується на відомому методі деформаційного старіння згідно з ГОСТ 7268-82, однак поєднує сумісну дію на метал водню та деформації. Його застосування дає

зможу ініціювати розвиток у сталі мікропошкоджень з урахуванням інтенсифікувального впливу абсорбованого металом водню, подібно як під час тривалої експлуатації (стадія II), поєднуючи різні механізми деградації (деформаційного зміцнення, старіння та розвитку розсіяної пошкодженості). Процедура методу полягає у попередньому електролітичному наводнюванні зразків за поміркованого режиму впродовж 95...100 h з подальшим розтягом до певного рівня пластичної деформації (2,8...5%), нагріванням до температури 250°C впродовж 1...2 h для десорбції з металу водню та реалізації деформаційного старіння. Метод апробовано для сталей API X52 та API X60 і показано, що він спричиняє співмірне зниження характеристик пластичності та ударної в'язкості подібно як під час випроб експлуатованих сталей. Запропонований метод дає змогу оцінювати чутливість феритно-перлітних сталей до корозійного розтріскування після певного періоду їх експлуатації [41], що важливо для обґрунтування їх вибору на стадії проектування.

**Неруйнівні методи діагностування експлуатаційної деградації сталей.** Останнім часом значні зусилля дослідників спрямовані на розвиток неруйнівних методик, які можуть надійно оцінювати визначальні для роботоздатності матеріалів їх механічні характеристики. Це, зокрема, твердість, границя міцності, границя плинності, ударна в'язкість, температура крихко-в'язкого переходу, втомна довговічність. Із фізичних методів для виявлення експлуатаційної деградації властивостей металу здебільшого використовують акустичні, вихрострумкові, магнетні та електричні.

**Акустичні методи.** Вони базуються на побудові кореляційних залежностей між, з одного боку, механічними властивостями сталей та показниками мікроструктури (розмір зерна, текстура, міцність, твердість тощо), а з іншого – з їх акустичними характеристиками. Зокрема, за швидкістю поширення ультразвукових коливань визначають твердість матеріалів [44]. Ефективним є використання поверхневих акустичних хвиль Релея із застосуванням лазерної техніки [45], оскільки пластична деформація сповільнює їх поширення, що пов'язує з утворенням дислокацій, мікропошкоджень та мікронапружень, тобто тих чинників, які супроводжують експлуатаційну деградацію металу.

Для оцінювання міри деградації сталей застосовують метод акустичної емісії (АЕ) [46]. Показано, що часові характеристики сигналів АЕ під час втискування індентора подібні до тих, які отримують за активного розтягу зразків. Параметри АЕ корелюють зі зміною структурного стану сталей внаслідок експлуатації, а сумарна енергія АЕ може слугувати критерієм стану металу, в т. ч. його пошкодженості, і основою для розрахунку залишкового ресурсу.

Останніми роками для діагностування феромагнетних матеріалів активно розвивають метод магнетопружної АЕ [47–49], в якому зовнішнім магнетним полем збуджують сигнали АЕ. Наводнювання підвищує активність сигналів АЕ і в цьому плані метод особливо привабливий для діагностування стану сталей, які експлуатують у наводнювальному середовищі [47]. Зокрема, у праці [49] оцінили стан труби нафтогону зі сталі 19Г після 48 років експлуатації та виявили відмінності у мірі деградації матеріалу верхньої та нижньої частин труби.

**Магнетний метод.** Він придатний для феромагнетних матеріалів і базується на встановлених кореляційних залежностях між електрорушійною силою магнетних шумів та механічними характеристиками сталей [50]. Зі зростанням пошкодженості металу за циклічного навантаження поступово збільшується градієнт магнетного поля, а з наближенням моменту зародження втомної тріщини і її розвитку він різко зростає, і так можна оцінювати ступінь пошкодженості металу за циклічного навантаження.

**Вихрострумний метод.** Його застосовують для виявлення відмінностей у структурі металу, його хімічному складі та фізико-механічних властивостях [51]. Встановлено, що найбільш структурно-чутливими електромагнетними характеристиками для контролю границі плинності є початкова магнетна проникність і питома електрична провідність, а для контролю границі міцності – коерцитивна сила.

**Метод питомого електричного опору.** Розроблено комплексні методики визначення характеристик міцності сталей трубопроводів за їх питомим опором, теплопровідністю і твердістю та побудовано кореляційні залежності між механічними властивостями сталей і їх питомим опором [52].

**Метод індентування.** Оскільки твердість найчастіше пов'язують з міцністю матеріалу, то цим методом прогнозують саме експлуатаційні зміни за характеристиками міцності. Для їх визначення застосовують розвинутий останнім часом метод інструментального автоматичного індентування з використанням моделювання та комп'ютеризованого аналізу результатів [53]. Лабораторними дослідженнями показано [54], що коефіцієнт деформаційного зміцнення та відношення границі плинності до границі міцності  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ , визначені на основі індентування, є придатнішими для оцінювання деградації сталей, ніж твердість та характеристики міцності.

Для оцінювання експлуатаційної деградації матеріалів запропоновано метод L-M твердості [55], коли за інформаційні ознаки стану металу слугують не усереднені значення твердості, а параметри розкиду даних. Вважають, що метод відтворює у зміні стану металу передусім його пошкодженість, яка і є причиною зростання розкиду даних. Встановлено кореляцію між параметрами розсіювання і тріщиностійкістю матеріалів, що дає можливість прогнозувати експлуатаційну деградацію такої важливої розрахункової характеристики опору матеріалу крихкому руйнуванню.

Останнім часом активно розвивають метод динамічного індентування, який базується на застосуванні поступового покрокового збільшення навантаження індентора з частковим розвантаженням на кожному кроці до досягнення максимального навантаження. Дані щодо глибини та діаметра проникнення індентора неперервно реєструють, обробляють та на їх основі отримують криві розтягу та характеристики міцності матеріалу, показник деформаційного зміцнення [56, 57]. Зокрема, наведено [56] приклад застосування цього методу для оцінювання визначальних механічних характеристик трубних сталей, в т. ч. деформації Людерса, модуля пружності та тріщиностійкості.

**Електрохімічні методи.** Можливість використання електрохімічних методів для аналізу технічного стану конструкційних металевих матеріалів розглянуто у працях [19, 22, 34, 58, 59] та обґрунтовано ефективність застосування певних електрохімічних характеристик, поляризаційного опору і потенціалу поверхні руйнування як інформативних параметрів стану металу для оцінювання ступеня деградації та прогнозування механічних властивостей. Між відносними експлуатаційними змінами цих показників та ударної в'язкості встановлено кореляції [19, 34, 58, 59]. Зокрема, на основі експериментальних результатів стосовно зумовлених тривалою експлуатацією змін поляризаційного опору та ударної в'язкості вуглецевих і низьколегованих феритно-перлітних сталей низки об'єктів отримали кореляційну залежність  $KCV_{deg}/KCV_{in} = -0,14 + 1,12 \cdot R_{p deg}/R_{p in}$ , коефіцієнт кореляції  $r = 0,976$  (рис. 4), яка є універсальною для цього класу сталей [59]. Залежність дає можливість прогнозувати опір крихкому руйнуванню металу за зміною його електрохімічних характеристик.

Рис. 4. Кореляція між відносними змінами ударної в'язкості  $KCV$  та поляризаційного опору  $R_p$ , зумовленими експлуатаційною деградацією, для вуглецевих та низьколегованих феритно-перлітних сталей різних об'єктів тривалої експлуатації [59]:  
 ◇, ◀ – гіперболоїдних веж;  
 □ – стріли буртоукладника;  
 ● – морських порталних кранів;  
 ○, ■ – резервуарів зберігання нафти;  
 △ – нафтогазопроводів;  
 ◆ – гинів парогонів ТЕС;  
 ▽ – роликів машин неперервного лиття заготовок.

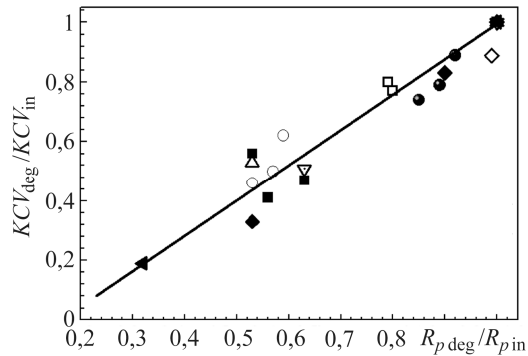


Fig. 4. Correlation between relative changes in impact toughness  $KCV$  and polarisation resistance  $R_p$ , caused by operational degradation for carbon and low-alloyed ferrite-pearlite steels of different long-term operated structures [59]: ◇, ◀ – hyperboloid towers; □ – clamp-forming machine boom; ● – marine portal cranes; ○, ■ – oil storage tanks; △ – oil and gas pipelines; ◆ – elbows of thermal power plants; ▽ – rollers of continuous casting machine.

**Перспективи досліджень експлуатаційної деградації сталей водневої енергетики.** Останнім часом посилилась увага до водню як енергетичного палива у багатогранній структурі розвитку відновлювальних джерел енергії, при цьому для його транспортування пропонують використовувати вже існуючу мережу як транзитних, так і розподільчих газопроводів [60, 61]. Дослідження у цьому напрямі вказують на реальну можливість транспортування сумішей природного газу з воднем, при цьому існують різні дані щодо частки водню, яка не впливає негативно на інфраструктуру. Враховуючи агресивний вплив водню на механічну поведінку конструкційних сталей, насамперед, на їх пластичність та опір крихкому руйнуванню, це ставить науково-технічне завдання збереження цілісності трубопроводів.

Експлуатаційна деградація газопроводів загострює проблему їх цілісності за транспортування газоводневої суміші, оскільки окрихчені сталі чутливіші до дії водню. Водень, з одного боку, інтенсифікує розвиток мікропошкоджень, а з іншого – прискорює ріст макротріщини у пошкодженому матеріалі, що і спричиняє порушення цілісності труби. З цієї причини особливої уваги потребують зварні з'єднання, яким властиві такі особливості експлуатаційної деградації: не завжди зона термічного впливу виявляє найбільшу чутливість до деградації, найістотніших змін може зазнавати і метал шва [20], очевидно, через його вищу дефектність у вихідному стані та ймовірність інтенсивнішого наводнювання.

Розглядаючи агресивний вплив транспортованого водню, враховують, що метал стінки труби інтенсивніше наводнюватиметься з боку внутрішньої поверхні порівняно з транспортуванням лише природного газу через його вологість [11, 12]. Очевидно, що за такого наводнювання концентрація водню характеризуватиметься високим градієнтом за товщиною стінки труби, тому для випроб впливу водню на метал у лабораторних умовах необхідно застосовувати зразки малої товщини (до 1...1,2 mm). Їх перевага для визначення міцності та пластичності полягає у мінімізуванні дії деформування і руйнування всередині зразка на загальну поведінку металу [62], оскільки необхідно оцінити насамперед вплив водню у поверхневому шарі металу, де його концентрація найвища.



## ВИСНОВКИ

На механізм деградації сталей перлітного класу суттєво впливають температура, напруження та наводнювання. Деградація сталей інтенсифікується за дії наводнювальних середовищ через розвиток розсіяної в об'ємі металу нано- та мікропошкодженості. Зміни мікроструктури сталей за високих температур експлуатації пов'язують зі зниженням частки фериту, розпадом перліту, утворенням та укрупненням карбідів і пороутворенням, внаслідок чого зароджуються міжзеренні тріщини. Під час експлуатації сталей за кліматичних температур на межах зерен та у дефектах всередині зерен утворюються нанопрошарки карбідів, при цьому особливу роль відіграє водень, інтенсифікуючи їх утворення та полегшуючи руйнування за механізмом водневої крихкості. Внаслідок експлуатаційної пошкодженості сталей найсуттєвіше знижуються їх тріщиностійкість, ударна в'язкість, опір корозійному розтріскуванню та корозійній втомі, а також поляризаційний опір, при цьому характеристики міцності і пластичності можуть змінюватися неоднозначно. Вагому роль водню у деградації сталей враховують і під час розроблення лабораторних методів її моделювання. Проаналізовано низку неруйнівних методів діагностування стану сталей за зміною їх механічних властивостей. Розглянуто особливості досліджень експлуатаційної деградації сталей існуючої мережі газопроводів для обґрунтування можливості її використання для транспортування водню чи сумішей природного газу з ним, які враховують наводнювання металу з боку внутрішньої поверхні труби.

1. *Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів* / С. І. Крижанівський, О. П. Остап, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, П. В. Ясній // Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. / Під заг. ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Простір-М, 2016. – Т. 1. – 360 с.
2. *Остап О. П., Вольдемаров О. В., Гладыш П. В.* Діагностування структурно-механічного стану сталей парогонів коерцитиметричним методом і прогнозування їх ресурсу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 5. – С. 98–111.  
(*Ostap O. P., Vol'demarov O. V., and Hladysh P. V.* Diagnostics of the structural-mechanical state of steels of steam pipelines by the coercimetric method and prediction of their service life // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 5. – P. 667–680.)
3. *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 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 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* / Н. М. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, and A. D. Markov // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
4. *Чувильдеев В. Н.* Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сб. тр. науч.-практ. семинара. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 18–67.
5. *Degradation of the pipe steel structure upon long term operation in contact with a hydrogen sulfide containing medium* / V. M. Schastlivtsev, T. I. Tabatchnikova, N. A. Tereshchenko, and I. L. Yakovleva // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2011. – **111**, № 3. – P. 281–293.
6. *Ячинский А. А.* Влияние структурно-фазового состава трубных сталей и их сварных соединений на сопротивление деформационному старению: Автореф. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Москва, 2006. – 20 с.
7. *Dislocation structure evolution during plastic deformation of low-carbon steel* / G. I. Raab, Yu. M. Podrezov, M. I. Danylenko, K. M. Borysovska, G. N. Aleshin, and L. N. Shafigullin // *Int. Electronic J. of Math. Education*. – 2016. – **11**, № 6. – P. 1563–1576.
8. *Nechaev Yu. S.* Metallic materials for the hydrogen energy industry and main gas pipelines: complex physical problems of aging, embrittlement, and failure // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. – 2008. – **51**, № 7. – P. 681–697.

9. Nykyforchyn H. M. Environmentally assisted degradation of the physical and mechanical properties of long-term exploited structural steels // *ESIS Newsletter*. – 2013. – № 52. – P. 20–24.
10. Goltsov V. A. Fundamentals of hydrogen treatment of materials and its classification // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 1997. – № 2–3. – P. 119–124.
11. Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко, М. І. Греділь, Г. М. Никифорчин, Д. Габетта // *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. Tsyrunyk, Z. V. Slobodyan, O. I. Zvirko, M. I. Hredil', H. M. Nykyforchyn, and G. Gabetta // Materials Science*. – 2008. – **44**, № 5. – P. 619–629.)
12. Pipe steel degradation during operation and brittle failure resistance / G. A. Filippov, O. V. Livanova, O. N. Chevskaya, and I. P. Shabalov // *Metallurgist*. – 2013. – **57**, № 7–8. – P. 612–622.
13. Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel / H. Nykyforchyn, O. Tsyrunyk, O. Zvirko, and M. Hredil // *Proc. Struct. Integrity*. – 2020. – **28**. – P. 896–902.
14. Han X. and Sakairi M. Hydrogen Permeation behavior of steel under wet/dry corrosion with changes in relative humidity at the dry period // *ISIJ International*. – 2021. – **61**, № 4. – P. 1194–1200.
15. Atom probe tomographic observation of hydrogen trapping at carbides/ferrite interfaces for high strength steel / Y.F. Jiang, B. Zhang, Y. Zhou, J.Q. Wang, E.-H. Han, and W. Ke // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2018. – **34**, № 8. – P. 1344–1348.
16. Numerical interpretation of hydrogen thermal desorption spectra for iron with hydrogen-enhanced strain-induced vacancies / Ki. Ebihara, Y. Sugiyama, R. Matsumoto, K. Takai, and T. Suzudo // *Metall Mater Trans A*. – 2021. – **52**. – P. 257–269.
17. Nagumo M. Hydrogen related failure of steels – a new aspect. Overview // *Mater. Sci. and Technol.* – 2004. – **20**. – P. 940–950.
18. Identification of hydrogen trapping sites, binding energies, and occupation ratios at vacancies, dislocations and grain boundaries in iron of varying carbon content / N. Abe, H. Suzuki, K. Takai, N. Ishikawa, and H. Sueyoshi // *Mater. Sci. and Technol. Conf. and Exhibition 2011, MS and T'11*. – 2011. – P. 1277–1284.
19. Non-destructive evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis / H. Nykyforchyn, O. Tsyrunyk, O. Zvirko, and H. Krechkovska // *Engng Failure Analysis*. – 2019. – **104**. – P. 617–625.
20. Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь, О. І. Звірко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2010. – **46**, № 5. – С. 55–58.  
(*Degradation of properties of the metal of welded joints in operating gas mains / O. T. Tsyrunyk, V. A. Voloshyn, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil', and O. I. Zvirko // Materials Science*. – 2011. – **46**, № 5. – P. 628–632.)
21. Assessment of corrosion and mechanical properties degradation of pipeline steel after long term service in high sour gas-field environments / C. Zhang, Q. Zhang, W. Chen, D. Liu, T. Ou, X. Huang, C. Chen, and Ch. Chen // *IPTC 2013: Int. Petroleum Technology Conf.*, 2013. Paper Number: IPTC-16607-MS. – 10 p.
22. Харченко Є. В., Поліщук Л. К., Звірко О. І. Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 77–82.  
(*Kharchenko E. V., Polishchuk L. K., and Zvirko O. I. Estimation of the in-service degradation of steel shapes for the boom of a clamp-forming machine // Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 501–507.)
23. Assessment of in-service degradation of gas pipeline steel taking into account susceptibility to stress corrosion cracking / O. Zvirko, G. Gabetta, O. Tsyrunyk, and N. Kret // *Proc. Struct. Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 121–125.
24. Крет Н. В., Свірська Л. М., Венгрюнок Т. П. Корозійно-втомний ріст тріщини в експлуатованих насосних штангах зі сталі 20Н2М // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 2. – С. 130–134.

- (Kret N. V., Svirska L. M., and Venhrynyuk T. P. Corrosion-fatigue crack propagation in exploited pump rods made of 20N2M steel // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 2. – P. 279–283.)
25. *Методи оцінювання корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів* / О. І. Звірко, Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин, Г. В. Кречковська // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 5. – С. 7–14.
  26. *Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation* / P. O. Maruschak, I. M. Danyliuk, R. T. Bishchak, and T. Vuherer // *Central Europ. J. of Engng.* – 2014. – **4**. – P. 408–415.
  27. *Вплив текстури та наводнювання на механічні властивості і характер руйнування трубої сталі* / П. О. Марущак, Н. В. Крет, Р. Т. Біщак, І. М. Курнат // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2019. – **55**, № 3. – С. 75–79.  
(*Influence of texture and hydrogenation on the mechanical properties and character of fracture of pipe steel* / P. O. Marushchak, N. V. Kret, R. T. Bishchak, and I. M. Kurnat // *Materials Science*. – 2019. – **55**, № 3. – P. 381–385.)
  28. *Nemchuk O. O. and Nesterov O. A. In-service brittle fracture resistance degradation of steel in a ship-to-shore portal crane* // *Strength of Materials*. – 2020. – **52**, № 2. – P. 275–280.
  29. *Вплив текстури експлуатованих сталей газопроводів на їх опір крихкому руйнуванню* / О. І. Звірко, Н. В. Крет, О. Т. Цирульник, Т. П. Венгринюк // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2018. – **54**, № 3. – С. 101–106.  
(*Influence of textures of pipeline steels after operation on their brittle fracture resistance* / О. І. Zvirko, N. V. Kret, О. Т. Tsyurulnyk, and Т. P. Vengrynyuk // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 3. – P. 400–405.)
  30. *Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipelines* / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko, A. Menou, and J. Brezinová // *Materials Science Forum*. – 2014. – **782**. – P. 279–283.
  31. *Вплив особливостей структури сталей обсадних труб на їх механічні властивості та водневу крихкість* / О. І. Звірко, О. Т. Цирульник, І. Дзіоба, Н. В. Крет, С. Ліпєц // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 6. – С. 24–29.
  32. *Dzioba I., Zvirko O., and Lipiec S. Assessment of operational degradation of pipeline steel based on true stress-strain diagrams* / G. Bolzon, G. Gabetta, H. Nykyforchyn (Eds) // *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. Lecture Notes in Civil Engineering*. – Cham: Springer, 2021. – **102**. – P. 175–187.
  33. *Corrosion degradation of steel of long-term operated gas pipeline elbow with large-scale delamination* / О. І. Zvirko, А. В. Mytsyk, О. Т. Tsyurulnyk, G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 6. – С. 104–108.  
(*Corrosion degradation of steel of an elbow of gas pipeline with large-scale delamination after long-term operation* / О. І. Zvirko, А. В. Mytsyk, О. Т. Tsyurulnyk, G. Gabetta, and H. M. Nykyforchyn // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 6. – P. 861–865.)
  34. *Zvirko O. and Tsyurulnyk O. Non-destructive electrochemical evaluation of pipeline degradation* / G. Bolzon, G. Gabetta, H. Nykyforchyn (Eds) // *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. Lecture Notes in Civil Engineering*. – Cham: Springer, 2021. – **102**. – P. 31–44.
  35. *Оцінювання залишкової довговічності ділянки магістрального газопроводу “Уренгой–Помари–Ужгород”* / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 2. – С. 103–110.  
(*Evaluation of the residual lifetime of a section of a main gas pipeline after long-term operation* / О. Е. Andreikiv, О. V. Hembara, О. Т. Tsyurul'nyk, and L. I. Nyrkova // *Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 231–238.)
  36. *Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination* / H. Nykyforchyn, О. Tsyurulnyk, О. Zvirko, and N. Kret // *Engng Failure Analysis*. – 2017. – **82**. – P. 364–377.
  37. *Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Звірко О. І. Оцінювання експлуатаційної деградації сталей газопроводів за критерієм механічної стабільності* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 6. – С. 55–59.

- (Meshkov Yu. Ya., Shyyan A. V., and Zvirko O. I. Evaluation of the in-service degradation of steels of gas pipelines according to the criterion of mechanical stability // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 6. – P. 830–835.)
38. Balueva A. V., Dashevskiy I. N., and Magana J. A new model for hydrogen-induced crack (HIC) growth in metal alloy pipelines under extreme pressure // *Proc. Struct. Integrity*. – 2020. – **28**. – P. 873–885.
  39. Волошин В. А. Циклічна корозійна тріщиностійкість експлуатованого зварного з'єднання трубної сталі 17Г1С // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 1. – С. 112–117.  
(Voloshyn V. A. Cyclic corrosion crack resistance of an exploited welded joint of 17G1S pipe steel // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 1. – P. 119–124.)
  40. Поліщук Л. К., Харченко Г. В., Звірко О. І. Корозійно-циклічна тріщиностійкість сталі стріли буртоукладника // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 2. – С. 77–82.  
(Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., and Zvirko O. I. Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine / *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 2. – P. 229–234.)
  41. Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength / O. I. Zvirko, S. F. Savula, V. M. Tsependa, G. Gabetta, and H. M. Nykyforchyn. // *Proc. Struct. Integrity*. – 2016. – **2**. – P. 509–516.
  42. Студент О. З. Прискорений метод водневої деградації конструкційних сталей // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. – 1998. – **34**, № 4. – С. 45–52.  
(Student O. Z. Accelerated method for hydrogen degradation of structural steel // *Materials Science*. – 1998. – **34**, № 4. – P. 497–507.)
  43. Метод лабораторної деградації конструкційних сталей / О. Т. Цирульник, Н. В. Крет, В. А. Волошин, О. І. Звірко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 5. – С. 85–93.  
(A procedure of laboratory degradation of structural steels / O. T. Tsyurulnyk, N. V. Kret, V. A. Voloshyn, and O. I. Zvirko // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 5. – P. 674–683.)
  44. Badidi Bouda A., Benchaala A., and Alem K. Ultrasonic characterization of materials hardness // *Ultrasonics*. – 2000. – **38**, № 1–8. – P. 224–227.
  45. Дослідження лазерним методом просторового розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль у пластично деформованій сталі / В. В. Кошовий, О. М. Мокрий, М. І. Греділь, І. М. Романишин // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 56–61.  
(Investigation of the space distribution of the velocity of surface acoustic waves in plastically deformed steel by the laser method / V. V. Koshoviy, O. M. Mokryi, M. I. Hredil, and I. M. Romanyshyn // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 478–484.)
  46. Nazarchuk Z., Skalskyi V., and Serhiyenko O. Acoustic emission. Methodology and application. Foundations of engineering mechanics. – Cham: Springer, 2017. – XIV. – 283 p.
  47. Nazarchuk Z., Skalsky V., and Rudavskyy D. Influence of the hydrogen factor on the variation of barkhausen effect parameters in ferromagnetic materials // *Proc. of ECF'18*. – Dresden, 2010. – 8 p.
  48. Davut K. and Gür C. Monitoring the microstructural evolution in spheroidized steels by magnetic barkhausen noise measurements // *J. of Nondestructive Evaluation*. – 2010. – **29**, № 4. – P. 241–247.
  49. Застосування методу магнетопружної акустичної емісії для оцінювання технічного стану тривало експлуатованої на нафтогоні сталі 19Г / В. Р. Скальський, Є. П. Почапський, Б. П. Клим, М. О. Рудак, П. П. Великий // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 3. – С. 81–84.  
(Application of the method of magnetoelastic acoustic emission for the analysis of the technical state of 19G steel after long-term operation in an oil pipeline / V. R. Skal's'kyi, E. P. Pochaps'kyi, B. P. Klym, M. O. Rudak, and P. P. Velykyi // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – P. 385–389.)
  50. Магнитные методы оценки упругой и пластической деформации при циклическом нагружении сталей / Э. С. Горкунов, Р. А. Саврай, А. В. Макаров, С. М. Задворкин // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2015. – № 2. – С. 6–15.

51. *Davis C. L., Strangwood M., and Peyton A. J.* Overview of non-destructive evaluation of steel microstructures using multifrequency electromagnetic sensors // *Ironmaking & Steelmaking*. – 2011. – **38**, № 7. – P. 510–517.
52. *Карпаш О. М., Доценко Є. Р., Карпаш М. О.* Комплексний метод контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2011. – **47**, № 5. – С. 40–47.  
(*Karpash O. M., Dotsenko E. R., and Karpash M. O.* Complex method for checking physico-mechanical characteristics of materials of metalworks // *Materials Science*. – 2012. – **47**, № 5. – P. 613–620.)
53. *Bolzon G.* Non-destructive mechanical testing of pipelines / G. Bolzon, G. Gabetta, H. Nykyforchyn (Eds) // *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. Lecture Notes in Civil Engineering*. – Cham: Springer, 2021. – **102**. – P. 3–14.
54. *Instrumented* microindentation studies on long-term aged materials: work-hardening exponent and yield ratio as new degradation indicators / J. I. Jang, Y. Choi, Y. H. Lee, and D. Kwon // *Mater. Sci. & Eng. A*. – 2005. – **395**, № 1–2. – P. 295–300.
55. *Monitoring* of current state of pipe metal in active gas pipelines. experimental method and results / A. A. Lebedev, N. R. Muzyka, N. L. Volchek, and S. A. Nedoseka // *Strength of Materials*. – 2003. – **35**. – P. 122–127.
56. *Haggag F. M.* In-situ nondestructive measurements of key mechanical properties of oil and gas pipelines. residual stress measurement and general nondestructive evaluation // *ASME*. – 2001. – **PVP-Vol. 429**. – P. 99–104.
57. *Yang Y., Wang W. Q., and Song M. D.* The measurement of mechanical properties of pipe steels in service through continuous ball indentation test // *Procedia Engng*. – 2015. – **130**. – P. 1742–1754.
58. *Цирульник О. Т.* Використання методів електрохімії в діагностуванні технічного стану конструкційних матеріалів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 103–110.  
(*Tsyryl'nyk O. T.* Application of the electrochemical methods in the diagnostics of the engineering state of structural materials // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 449–460.)
59. *Звірко О. І.* Розроблення методології діагностування корозійно-водневої деградації конструкційних сталей тривалої експлуатації: Автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук зі спец. 05.02.10. – Львів, 2018. – 40 с.
60. *Haeseldonckx D. and D'haeseleer W.* The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2007. – **32**, № 10–11. – P. 1381–1386.
61. *Никифорчин Г. М.* Проблеми цілісності трубопроводів при транспортуванні водню газорозподільною мережею // *Нафтогазова галузь України*. – 2020. – № 5. – С. 35–40.
62. *Influence* of specimen thickness with rectangular cross-section on the tensile properties of structural steels / W. J. Yuan, Z. L. Zhang, Y. J. Su, L. J. Qiao, and W. Y. Chu // *Mater. Sci. & Eng. A*. – 2012. – **532**. – P. 601–605.

Одержано 14.04.2021