

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

О. І. ЗВІРКО

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5.
E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

Представлено можливості використання електрохімічних підходів для діагностування деградації конструкційних сталей відповідальних конструкцій, спричиненої їх тривалою експлуатацією. Побудована кореляційна залежність для, з одного боку, експлуатаційного зниження ударної в'язкості як характеристики опору крихкому руйнуванню, а з іншого – зміни поляризаційного опору, який можна вимірювати у польових умовах. Така залежність дає можливість на основі електрохімічних характеристик прогнозувати поточні механічні властивості сталей. Бібліогр. 21, табл. 5, рис. 4.

Ключові слова: сталь, тривала експлуатація, агресивне середовище, електрохімічні характеристики, прогнозування механічних властивостей

Тривала експлуатація часто призводить до зниження механічних властивостей конструкційних матеріалів, які закладалися в інженерні розрахунки на стадії проектування. Найнебезпечнішим з огляду забезпечення цілісності конструкцій вважається зниження характеристик опору крихкому руйнуванню [1–3], які до того ж найчутливіші до експлуатаційної деградації матеріалів. У випадку дії на них агресивних корозивно-наводнювальних середовищ ризик неконтрольованого руйнування збільшується, на що вказує різкий спад характеристик корозійно-механічного руйнування [1, 2, 4, 5]. Відповідно актуальне діагностування поточного рівня механічних і корозійно-механічних властивостей тривало експлуатованих матеріалів. Останнім часом підвищена увага до цієї проблеми, розвивається низка методів діагностування їх деградації, це, зокрема, акустичні, вихрострумові, магнітні та електричні, а також метод індентування [6–10].

Нещодавно саме для діагностування деградації механічних властивостей металічних матеріалів конструкцій тривалої експлуатації запропоновано використовувати електрохімічні (ЕХ) підходи [11–13]. ЕХ показники характеризують систему «метал–середовище», тому зміни хоч би в одному складнику системи повинні викликати певну реакцію і в ЕХ поведінці металу. Якщо тривала експлуатація зумовлює зміну стану металу, на що вказують оцінки його механічних властивостей, то також можна очікувати і відповідної трансформації його ЕХ характеристик. Цей аспект можна використовувати в методі неруйнівного контролю технічного стану металу реальних об'єктів. Раніше на прикладі сталей нафтогазового комплексу

та енергетики, а також алюмінієвого сплаву авіабудування показано, що такі ЕХ показники, як поляризаційний опір і густина струму корозії, є достатньо чутливими до експлуатаційної деградації металу.

У роботі на прикладі ширшого кола об'єктів тривалої експлуатації подано подальший розвиток ЕХ підходів щодо прогнозування механічних властивостей конструкційних сталей.

Особливості застосування ЕХ методів для оцінювання експлуатаційної деградації металу за зміною його фізико-механічних властивостей. Основні наукові аспекти у застосуванні методу полягають в отриманні достатньої чутливості ЕХ відклику на експлуатаційну зміну стану металу та побудові кореляційної залежності між цим відкликом та механічною, корозійно-механічною чи іншою характеристикою, яка визначальна в забезпеченні роботоздатності конструкційного матеріалу. У приведеному аналізі це ударна в'язкість як найуживаніша та практично завжди регламентована характеристика опору крихкому руйнуванню і, відповідно, для неї отримано достатній масив даних. У ньому беруть до уваги експлуатаційне зниження ударної в'язкості, визначене відношенням її рівня KCV_{deg} для експлуатованого до величини KCV_{in} для вихідного матеріалу. Однак не менш важливе прогнозування і інших властивостей, таких як тріщиностійкість, втомна міцність, корозійно-механічна міцність, включаючи корозійну тріщиностійкість, тощо. Саме вони найчастіше використовуються для обґрунтування граничного навантаження, витривалості та ресурсу елементів конструкцій.

Інший, інженерно-технічний, аспект проблеми полягає у забезпеченні можливості ЕХ вимірю-

вань безпосередньо на об'єкті. Для цього потрібні не тільки портативні потенціостати, часто з автономним живленням, доступ до діагностованого металу, але і спеціальної конструкції ЕХ комірок [14], які треба кріпити до металевих поверхонь конструкцій, що можуть бути різної геометрії, похилими чи вертикальними.

Достатню чутливість методу забезпечують використанням корозивного середовища з депасиваційними властивостями. Для вуглецевих і низьколегованих сталей це можуть бути нейтральні хлоридні чи кислотні (для прикладу, з рН 2) розчини, коли на металі відсутні щільні захисні плівки. Це важливо враховувати, оскільки предметом оцінювання є саме стан металу, а поверхневі плівки можуть спотворювати ЕХ відклик.

Основу ЕХ аналізу складає поляризаційна крива в координатах «потенціал E –густина струму i ». Він дає можливість визначити низку параметрів, практично придатних для діагностування, зокрема, стаціонарний потенціал E_{sp} , густина струму корозії i_{corr} та поляризаційний опір R_p .

На рис. 1 на прикладі діагностування деградації вуглецевої сталі типу Ст3сп порталного крану, який експлуатувався впродовж 40 років в режимі циклічного навантаження, продемонстровано відмінність у поляризаційних кривих $E-I$ для вихідного та експлуатованого металу [14]. На їх основі визначили згадані показники E_{sp} , i_{corr} та R_p (табл. 1), з яких тільки i_{corr} та R_p виявилися чутливими в оцінюванні експлуатаційної деградації металу, на що вказує відношення рівня ЕХ показника експлуатованого до цього показника неексплуатованого металу, відповідно $i_{corr deg}/i_{corr in}$ та $R_{p deg}/R_{p in}$. Заміна нейтрального розчину хлориду на кислий з рН 2 додаванням хлоридної кислоти підвищила цю чутливість.

Наші експерименти показали також зростання чутливості оцінювання експлуатаційної деградації вуглецевих сталей при підвищенні температури корозивного середовища [15]. Відомо, що температура впливає не тільки на швидкість електродних реакцій, розчинність кисню (деполяризатора), але і на властивості поверхневих плівок. Можливо, що тут проявляється саме останній чинник через послаблення бар'єрних властивостей плівок, що і слугує підвищенню чутливості ЕХ методу.

Зазначимо, що діагностування фізико-механічних властивостей сталей особливо важливе у випадку їх експлуатації в корозивно-наводнювальних середовищах, які прискорюють процес

деградації через наводнювання металу. Однак це не означає, що саме робочі умови за складом середовища чи температури слід витримувати при ЕХ оцінках зміни стану металу. Робочі середовища певним чином впливають на деградацію металу, але при виборі електроліту для ЕХ діагностування її ступеня слід керуватися вище викладеним аналізом.

Окремо вирішується зазначена проблема стосовно неіржавних сталей, корозійна тривкість яких забезпечується високими захисними властивостями поверхневих плівок. На перший погляд ЕХ підхід для прогнозування експлуатаційної деградації механічних властивостей таких сталей непридатний, оскільки вона супроводжується підвищенням їх корозійної тривкості [3]. Однак якщо створити умови для корозії такого типу сталей в активному стані, а це можливо в розчині хлоридної кислоти [16], то отримуємо загальну для всіх сталей закономірність зниження упродовж експлуатації корозійної тривкості неіржавної сталі з відповідною зміною і ЕХ властивостей (рис. 2).

Розвиток ЕХ підходів стосовно діагностування сталей низки об'єктів тривалої експлуатації. На рис. 3, а приведена раніше побудована для експлуатованих газопровідних сталей кореляційна залежність «відносна зміна поляризаційного опору R_p – відносна зміна ударної в'язкості KCV » [13], для якої за вихідний вважали стан труб запасу. Дані отримані при ЕХ вимірюваннях у різних середовищах (модельне середовище водного кон-

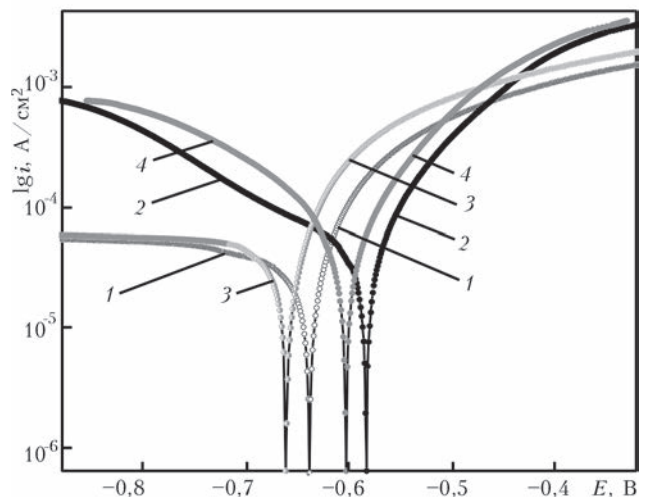


Рис. 1. Поляризаційні криві $E-I$ сталі типу Ст3сп у вихідному (1, 2) та експлуатованому (3, 4) станах, побудовані для 0,3%-го розчину NaCl з рН 6,5 (1, 3) та рН 2 (2, 4)

Таблиця 1. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у 0,3%-му розчині NaCl з рН 6,5 (перед косяю) і рН 2 (після косяю) та на ударну в'язкість сталі типу Ст3сп

Стан	E_{sp} , В	i_{corr} , А/см ²	R_p , Ом·см ²	KCV , Дж/см ²	$i_{corr deg}/i_{corr in}$	$R_{p deg}/R_{p in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний	-0,64/-0,58	1,48·10 ⁻⁵ /1,90·10 ⁻⁵	925/780	109	–	–	–
Експлуатований	-0,66/-0,60	1,75·10 ⁻⁵ /2,37·10 ⁻⁵	780/625	80	1,18/1,25	0,84/0,80	0,73

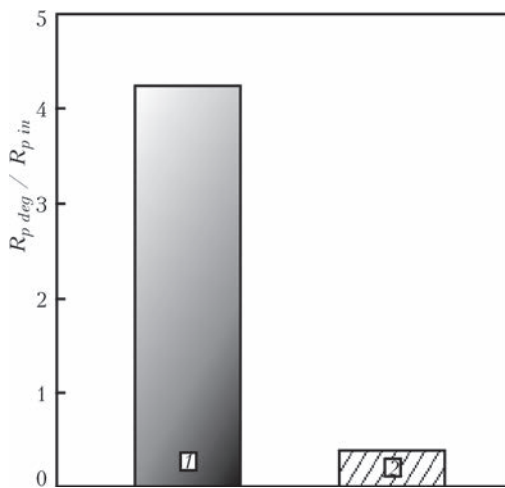


Рис. 2. Відношення $R_{p\ deg} / R_{p\ in}$ при корозії сталі 20X13 у розчинах: 3 % NaCl (1) та 20 % HCl (2)

денсату та розчин NS-4), що й зумовило значний розкид даних, які, однак, описали прямою залежністю. Наведені дані нижче збагатили подібним аналізом і стосовно вуглецевих і низьколегованих сталей інших об'єктів тривалої експлуатації.

Сталь магістрального нафтопроводу. У цьому випадку слід порівнювати не тільки вихідний та експлуатований стани, але окремо виділяти «верх» та «низ» експлуатованої труби, оскільки можна очікувати інтенсивнішої деградації металу нижньої частини труби через деструктивну дію

наводнювання внаслідок ЕХ взаємодії з металом залишкової (підтоварної) води [15].

У табл. 2 приведені результати ЕХ вимірювань з урахуванням такої специфіки, а також випробувань на ударну в'язкість. Зазначимо підвищення чутливості ЕХ методу при підвищенні температури корозивного середовища з 20 до 40 °С. Стосовно визначення KCV металу «низ» виникли проблеми через поворот на 90° площини руйнування під час ударного навантаження (зразки вирізали вздовж осі труби), що зумовлено експлуатаційним ослабленням адгезії між матрицею та витягнутими включеннями. Зразки повністю не руйнувалися (рис. 4), тому кількісно визначити опір крихкому руйнуванню не вдалося. Для металу «верх» цього не спостерігали, KCV експлуатованої сталі було вдвічі менше, ніж для вихідного стану. Однак, згідно ЕХ оцінок, експлуатація нафтопроводу призвела до сильнішої деградації сталі ділянки «низ».

Кутникова сталь гіперболоїдних сіткових веж. Так звані вежі Шухова будували на межі XIX і XX сторіч, відповідно, минуло більше 100 років від введення їх в експлуатацію. Досліджували властивості старовинних сталей водонапірної вежі у Черкасах та Аджигольського маяка, розташованого у гирлі р. Дніпро [18]. Такий метал порівняли із сучасною вуглецевою сталлю Ст.3. І хоч металур-

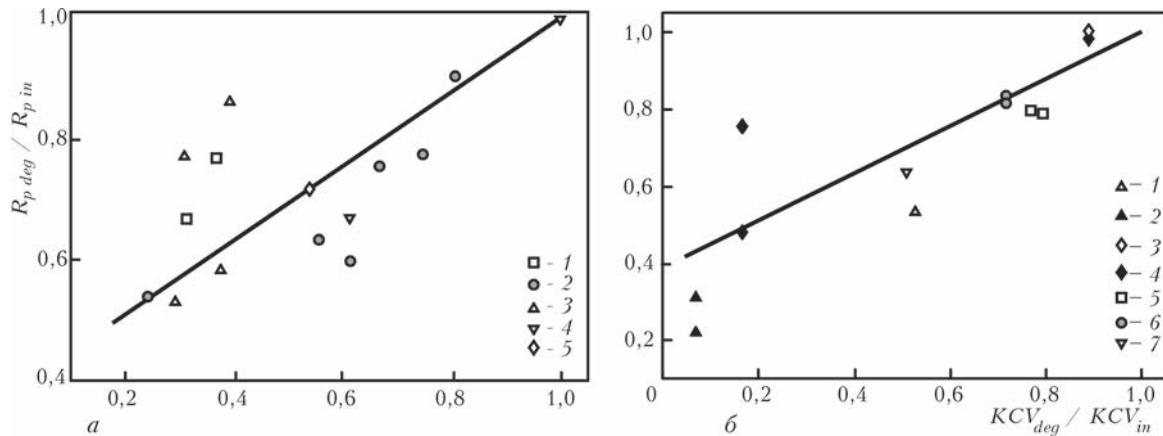


Рис. 3. Кореляція між відношеннями KCV_{deg} / KCV_{in} та $R_{p\ deg} / R_{p\ in}$ для експлуатованих газопровідних сталей (а): низьковуглецевої (1), 17Г1С (2), Х52 (3), Х60 (4), Х70 (5) у модельному розчині водного конденсату (1–3) та розчині NS-4 (4, 5) та для вуглецевих і низьколегованих сталей інших об'єктів тривалої експлуатації (б): 10ГС «верх» (1) та «низ» (2), Ст.3 вежі у Черкасах (3), маяка (4) та буртоукладника (5), Ст3сп поргальних кранів (6) та 25Х1М1Ф роликів машин неперервного лиття заготовок (7) у модельній залишковій воді (1, 2) та у 0,3 % (3–5) і 3% (3, 4, 7) розчинах NaCl

Т а б л и ц я 2. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у модельній залишковій воді та ударну в'язкість сталі типу 10ГС магістрального нафтопроводу

Стан металу	$T, ^\circ\text{C}$	$E_{st}, \text{В}$	$i_{corr}, \text{А/см}^2$	$R_p, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	$KCV, \text{Дж/см}^2$	$i_{corr\ deg} / i_{corr\ in}$	$R_{p\ deg} / R_{p\ in}$	KCV_{deg} / KCV_{in}
Вихідний	20	-0,51	$2,2 \cdot 10^{-5}$	1217	180	-	-	-
	40	-0,59	$2,5 \cdot 10^{-5}$	911		-	-	-
Експлуатований («низ»)	20	-0,58	$3,9 \cdot 10^{-5}$	382	12*	1,77	0,31	0,07*
	40	-0,60	$4,8 \cdot 10^{-5}$	201		1,92	0,22	
Експлуатований («верх»)	20	-0,56	$3,0 \cdot 10^{-5}$	644	95	1,36	0,53	0,53

* Приведені дані прогнозування з використанням ЕХ підходу

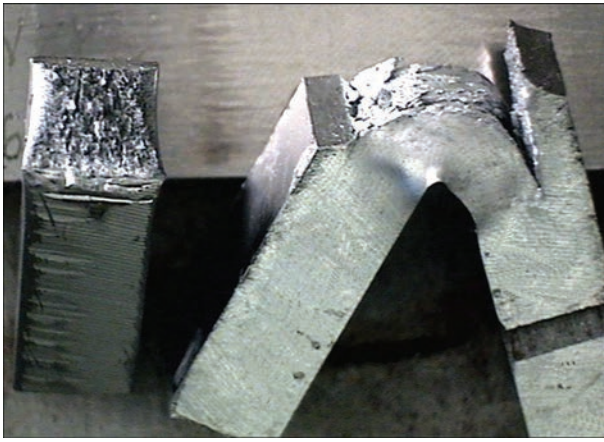


Рис. 4. Зразок, вирізаний з нижньої частини експлуатованого нафтопроводу, після випробувань на ударну в'язкість [17]

гійна якість сучасних і старовинних сталей принципово різна, порівняння за ЕХ ознаками лише останніх, однак експлуатованих за різних умов (табл. 3), дає можливість вважати виявлені значні відмінності результатом, в першу чергу, саме різного ступеня експлуатаційної деградації.

Не виявлено відмінностей в ЕХ показниках для вежі в Черкасах та сучасної сталі, що узгоджується з приблизно однаковим рівнем ударної в'язкості. Однак сталь маяка вирізняється у п'ять разів нижчим KCV , чому відповідають істотні відмінності і в ЕХ поведінці цього металу. Навіть потенціал E_{st} , який загалом малочутливий до деградації металу, в цьому випадку на 0,145 В негативніший. Не відкидаючи можливості значного розкиду даних для старовинних сталей одного класу, такі різючі відмінності у властивостях сталей сіткових веж слід пояснювати саме з позицій експлуатаційної деградації металу. Її висока інтенсивність у випадку сталі маяка зумовлена, очевидно, тривалим контактуванням з високоагресивним середовищем (морське повітря) з високою вологістю та вмістом солей, у тому числі хлоридів. Зазначимо, що за умов атмосферної корозії можливе наводнювання металу [19] і тоді зміна ста-

ну сталей проходить вже за сумісної дії експлуатаційних напружень і водню.

Кутникова сталь підіймально-транспортних механізмів. Такі конструкції експлуатуються в режимі сумісної дії циклічного навантаження та атмосферного середовища, яке, як зазначалося, можна розглядати і як наводнювальне [19]. Проаналізовано важливість діагностування поточних механічних властивостей сталей порталних кранів [14] і буртоукладника [20] та обґрунтована можливість використання для цього ЕХ підходів.

Окрім ділянки таких механізмів можуть експлуатуватися і у режимі циклічного навантаження стиском. Як виявилось [20], такі напруження зумовлюють втрату механічних властивостей сталі Ст.3 рами стріли буртоукладника практично в такій же мірі, як і розтягувальні (табл. 4, KCV нижче на $\sim 20\%$). ЕХ властивості, визначені за показниками i_{corr} та R_p , змінилися на $\sim 25\%$ і для ділянки стиску, що корелює зі спадом механічних властивостей, зумовленим експлуатаційною деградацією металу.

Сталь роликів машин неперервного лиття металургійних заготовок. Вони експлуатуються за циклічної зміни температури поверхневих шарів, спричиненої періодичним контактом зі слябом та примусовим повітряно-водяним охолодженням крізь внутрішній отвір. У праці [21] досліджували механічні властивості сталі 25X1M1Ф двох протилежних ділянок виведеного з експлуатації ролика (діаметром 320 мм): зовнішнього приповерхневого шару з інтенсивним термоцикуванням (експлуатаційна температура $t = 375 \dots 600\text{ }^\circ\text{C}$) та внутрішнього, з зони охолодження ($t = 40 \dots 60\text{ }^\circ\text{C}$). Метал останньої ділянки умовно вважали вихідним, тобто, що експлуатація ролика не вплинула на його властивості. У табл. 5 приведені дані ударної в'язкості [21], а також ЕХ властивостей металу цих ділянок.

Порівняння властивостей сталі різних ділянок ролика підтвердило загальну закономірність нижчої корозійної тривкості того металу, якому вла-

Таблиця 3. ЕХ параметри у 0,3-му % (перед косою) та 3-му % (після косої) водних розчинах NaCl та ударна в'язкість сталей сіткових веж

Сталь	E_{st} , В	i_{corr} , А/см ²	R_p , Ом·см ²	KCV , Дж/см ²	$i_{corr\ deg}/i_{corr\ in}$	$R_{p\ deg}/R_{p\ in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Сучасна Ст.3	-0,525/-0,535	$1,27 \cdot 10^{-5}/0,84 \cdot 10^{-5}$	1156/1283	159	—	—	—
Вежа в Черкасах	-0,540/-0,535	$1,20 \cdot 10^{-5}/0,66 \cdot 10^{-5}$	1149/1202	141	0,95/0,78	0,99/0,94	0,89
Маяк	-0,670/-0,675	$1,56 \cdot 10^{-5}/1,40 \cdot 10^{-5}$	884/489	27	1,23/1,67	0,76/0,38	0,17

Таблиця 4. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у 0,3%-му розчині NaCl та ударну в'язкість Ст3 буртоукладника

Стан	E_{st} , В	i_{corr} , А/см ²	R_p , Ом·см ²	KCV , Дж/см ²	$i_{corr\ deg}/i_{corr\ in}$	$R_{p\ deg}/R_{p\ in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний	-0,524	$7,86 \cdot 10^{-6}$	2074	159	—	—	—
Експлуатований	розтяг	-0,533	$9,82 \cdot 10^{-6}$	1660	123	1,25	0,80
	стиск	-0,548	$9,89 \cdot 10^{-6}$	1648	127	1,26	0,79

Таблиця 5. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у 3%-му розчині NaCl та ударну в'язкість сталі 25X1M1Ф ролика

Стан	E_{st} , В	i_{corr} , А/см ²	R_p , Ом·см ²	KCV , Дж/см ²	$i_{corr deg}/i_{corr in}$	$R_{p deg}/R_{p in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний	-0,583	$9,13 \cdot 10^{-6}$	1786	125	–	–	–
Експлуатований	-0,612	$12,50 \cdot 10^{-6}$	1118	64	1,37	0,63	0,51

стивий менший опір крихкому руйнуванню.

Побудова універсальної кореляційної залежності для діагностування експлуатаційної деградації вуглецевих і низьколегованих сталей. Отримані дані, з одного боку, зміни ударної в'язкості, а з іншого – поляризаційного опору, наклали на залежність «відносна зміна R_p – відносна зміна KCV » стосовно газопровідних сталей (див. рис. 3, а) і виявили узгодження з попередніми результатами (рис. 3, б). Це означає загальною універсальністю такої залежності для даного типу сталей незалежно від об'єкту діагностування та експлуатаційних умов. Вони впливають на ступінь деградації механічних властивостей, але цьому відповідає певний ступінь зміни ЕХ характеристик. Це полегшує набір бази даних у цьому напрямі, оскільки можна використовувати широке коло об'єктів, обмеження стосуються тільки типу сталей. А розкид даних можна зменшити, якщо їх селекціонувати за складом середовищ для ЕХ вимірювань та їх температурою. Яскравий цьому приклад: відношення $R_{p deg}/R_{p in}$, яке характеризує ЕХ відклик (за поляризаційним опором) на експлуатаційну зміну стану металу, змінилося для сталі Аджигольського маяка від 0,76 до 0,48 при підвищенні концентрації NaCl у водному розчині від 0,3 до 3 % (див. табл. 3). Стосовно неіржавних сталей питання відкрите, необхідний набір ЕХ даних при їх корозії в активному стані. Перспективна також побудова подібної залежності і для інших механічних чи корозійно-механічних характеристик, прогнозування яких може вважатися важливішим за ударну в'язкість при інженерних розрахунках міцності та довговічності, у тому числі залишкового ресурсу.

Зазначимо, що в кореляційній залежності приведені не величини R_p і KCV , а їх зміни впродовж експлуатації. Тому для практичного використання цієї залежності для діагностування поточного стану механічних властивостей необхідні дані про механічний стан металу до експлуатації та його ЕХ характеристики до і після експлуатації. За наявності металу у вихідному стані (наприклад, труба запасу) проблема формально усувається, хоч необхідно враховувати розкид даних і в цьому випадку. За відсутності такого металу слід вишукувати в конструкції ділянки з мінімальним рівнем експлуатаційних напружень, як це було зроблено у випадку діагностування сталі стріли буртоу-

кладника [20], і умовно, для порівняння, вважати такий метал вихідним.

Розвинутий ЕХ підхід може бути корисним і для прогнозування механічних чи інших властивостей, які важко оцінити традиційно в лабораторних умовах. Для прикладу, ударну в'язкість проблематично визначати на тонколистових матеріалах. У нашому випадку неможливо було встановити рівень KCV для сталі нафтопроводу через переорієнтацію під час випробувань площини руйнування на 90° (див. рис. 4). Однак, використовуючи залежність $KCV_{deg}/KCV_{in} - R_{p deg}/R_{p in}$, вдалося спрогнозувати рівень KCV , який склав ~ 12 Дж/см² (див. табл. 2). Це надзвичайно низький рівень ударної в'язкості, співмірний з KCV сталей з мартенситною структурою та чавуном і вказує на високий ступінь деградації металу, яка й зумовила схильність металу до макророзшарування.

Висновки

Розвинуто електрохімічний підхід для прогнозування поточних механічних властивостей тривало експлуатованих конструкційних сталей. Важливим є вибір корозивного середовища для ЕХ вимірювань, яке повинно характеризуватися депасувальними властивостями, що можна досягти використанням хлоридів, підвищенням кислотності електроліту та температури випробувань. На прикладі експлуатованих сталей низки відповідальних об'єктів встановлено, що кореляційна залежність $KCV_{deg}/KCV_{in} - R_{p deg}/R_{p in}$, яка є основою для прогнозування рівня KCV_{deg} , є універсальною і незалежною від об'єкту та умов експлуатації, однак може залежати від типу сталі та умов ЕХ вимірювань. Проаналізований ЕХ підхід може бути корисним і для прогнозування ударної в'язкості експлуатованого металу у випадку неможливості його визначення традиційним шляхом.

1. Nykyforchyn H. M. Hydrogen degradation of steels in long term service conditions / H. M. Nykyforchyn, K.-J. Kurzydowski, E. Lunarska // Environment-induced cracking of materials. Vol. 2: Prediction, industrial developments and evaluations / ed. by S. Shipilov. – Elsevier, 2008. – P. 349–361.
2. Красовский А. Я. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов / А. Я. Красовский, И. В. Лохман, И. В. Орьяк // Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С. 23–43.
3. Деградація сталей в агресивних середовищах, залишковий ресурс обладнання і корозійний моніторинг / О. Г. Архипов, В. А. Борисенко, М. С. Хома [та ін.]. – Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2016. – 203 с.

4. Крижанівський Є. І. Оцінювання робоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності / Є. І. Крижанівський, Р. С. Грабовський, О. М. Мандрик // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 1. – С. 105–110.
5. Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas trunkline / Н. Nykyforchyn, Е. Lunarska, О. Tsurulnyk [et al.] // Eng. Failure Analysis. – 2010. – 17. – Р. 624–632.
6. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос.: у 3 т. – Т. 2.: Методологія акустико-емісійного діагностування / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К.: Наукова думка, 2009. – 263 с.
7. Безлюдько Г. Я. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы / Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужижкий, В. Б. Ремезов // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 6. – С. 7–10.
8. Криничний П. Я. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГ-МА-5Т / П. Я. Криничний, І. А. Молодецький // Методи та прилади контролю якості. – 1998. – № 2. – С. 9–10.
9. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання / М. О. Карпаш, І. С. Кісіль, О. М. Карпаш [та ін.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 2. – С. 13–18.
10. Оцінювання експлуатаційної деградації сталі газопроводу руйнівними і неруйнівними методами / Ю. В. Мільман, Г. М. Никифорчин, К. Е. Грінкевич [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 5. – С. 13–18.
11. Електрохімічні показники експлуатаційної деградації сталей нафто- і газогонів / О. Цирульник, Г. Никифорчин, З. Слободян [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спецвип. № 5, т. 1. – С. 284–289.
12. Цирульник О. Т. Оцінка деградації властивостей як характеристика технічного стану матеріалів конструкцій тривалої експлуатації / О. Т. Цирульник // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 2. – С. 36–41.
13. Цирульник О. Т. Використання методів електрохімії в діагностуванні технічного стану конструкційних матеріалів / О. Т. Цирульник // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 4. – С. 29–39.
14. Пустовой В. Електрохімічний метод контролю експлуатаційної деградації механічних властивостей сталей морських порталних кранів / В. Пустовой, І. Рещенко, О. Звірко // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – Т. 77. – № 1. – С. 79–87.
15. Слободян З. В. Корозійна тривкість трубної сталі у нафтоводних середовищах / З. В. Слободян, Г. М. Никифорчин, О. І. Петрушак // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 3. – С. 93–96.
16. Похмурський В. І. Корозійна втома металів і сплавів // В. І. Похмурський, М. С. Хома. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
17. Окрихчення сталі магістрального нафтопроводу / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, О. І. Звірко [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 125–126.
18. Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперболоїдних сіткових веж Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, О. З. Студент [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 6. – С. 70–78.
19. Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process / Т. Tsuru, Ya. Huang, Md. R. Ali [et al.] // Corr. Sci. – 2005. – 47, № 10. – Р. 2431–2440.
20. Харченко Є. В. Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника / Є. В. Харченко, Л. К. Поліщук, О. І. Звірко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 4. – С. 77–82.
21. Ясній П. В. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів / П. В. Ясній, П. О. Марушак. – Тернопіль: Джур, 2009. – 231 с.

The paper present the possibilities of application of electrochemical methods for diagnostics of degradation of structural steels in critical structures, caused by their long-term operation. A correlation dependence was plotted, on the one hand, for operational lowering of impact toughness as a characteristics of brittle fracture resistance, and on the other hand for a change of polarization resistance which can be measured in the field conditions. Such dependence enables prediction of current mechanical properties of steels by the method of non-destructive monitoring of electrochemical characteristic. 21 Reference, 5 Tables, 4 Figures.

Keywords: steel, long-term service, aggressive environment, electrochemical characteristics, prediction of mechanical properties

Надійшла до редакції
07.09.2016

Российское Общество по неразрушающему контролю и технической диагностике



XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

1-3 МАРТА 2017 ГОДА
МОСКВА, ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

Научные направления конференции

- | | |
|---|----------------------------------|
| Магнитные методы НК | Вибродиагностика |
| Электромагнитные методы НК | Акустическая эмиссия |
| Акустические методы НК | Антитеррористическая диагностика |
| Радиационные методы НК | Обучение, сертификация |
| Оптические, тепловые, микроволновые методы НК | Промышленная безопасность |
| Течеискание, капиллярные, комбинированные методы НК | Техническая диагностика |
| Методы НК остаточного ресурса | Сертификация |

Полную информацию о программе конференции, требованиям к докладам и стоимости участия на сайте www.conf.ronktd.ru