

УДК 621.867:620.17:620.193

ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ПРОФІЛЬНОЇ СТАЛІ СТРІЛИ БУРТОУКЛАДНИКА

С. В. ХАРЧЕНКО¹, Л. К. ПОЛИЩУК², О. І. ЗВІРКО³

¹ Вармінсько-Мазурський університет, Ольштин, Польща;

² Вінницький національний технічний університет;

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Порівнянням механічних властивостей сталі кутників рамної конструкції тривало експлуатованого буртоукладника з вихідним станом металу виявлено, що міцність та пластичність істотно не змінилися, однак, погіршилася ударна в'язкість металу, причому практично незалежно від знака змінних напружень. Для оцінювання експлуатаційної деградації властивостей використано електрохімічні підходи і встановлено, що достатньо чутливим інформативним параметром є поляризаційний опір.

Ключові слова: профільна сталь, технічний стан конструкції, ударна в'язкість, електрохімічні методи, фрактографічний аналіз.

Внаслідок тривалої експлуатації металевих конструкцій за жорстких силових умов та дії корозивно-агресивних середовищ можуть не тільки розвинутися макродефекти, але й значно деградувати вихідні фізико-механічні властивості матеріалу, зокрема, знизитися опір крихкому руйнуванню [1–4]. Зі силових чинників особливо небезпечне циклічне навантаження [5], через яке в металі накопичуються мікропластичні деформації, а отже, знижується його опірність крихкому руйнуванню. В таких умовах експлуатуються різні види підйимально-транспортувальних механізмів [6]. До них належать і машини неперервної дії, які виконують різні складальні операції та є ефективними засобами механізації на кар'єрах відкритого видобування корисних копалин, а також під час складування насипної сільськогосподарської продукції, зокрема буряків на цукрових заводах. Таке обладнання оснащено стрілоподібною конструкцією, що утримується під заданим кутом за допомогою відтяжок, закріплених на вантовій опорі. На стрілі улаштовано стрічковий конвеєр, який транспортує вантаж.

Останнім часом загострилась проблема прогнозування методами неруйнівного контролю деградації механічних властивостей конструкційних матеріалів. Запропоновано [7–9] для цього використовувати електрохімічні показники, які виявилися чутливими до зміни стану тривало експлуатованого металу.

Нижче досліджено вплив тривалої експлуатації на характеристики міцності та пластичності, ударну в'язкість сталі рами стріли буртоукладника, а також електрохімічну поведінку металу, щоб виділити інформаційні ознаки зміни його стану.

Особливості методик експериментальних випроб. Досліджували раму стріли буртоукладника марки БУМ-65М2Б3-К, виготовленого з кутника 45×45 mm сталі Ст3. Вивчали три стани металу: № 1 – вихідний (з елемента рами, на який практично не діяли експлуатаційні навантаження); № 2 і 3 – експлуатований за дії розтягальних та стискальних циклічних напружень. Зразки вирізали з полочки експлуатованого кутника, момент опору якої був менший проти робочого зги-

нального. Для визначення характеристик міцності та пластичності використовували плоскі зразки ($2 \times 10 \times 40$ mm), які розтягували зі швидкістю $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Експерименти на ударну в'язкість KCV зразків Шарпі виконували в діапазоні температур від кімнатної до -60°C , будуючи температурні залежності $KCV-T$ (криві холодноламокості).

Фрактографічні особливості зламів після випроб зразків на ударну в'язкість досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP. Електрохімічні характеристики (стаціонарний потенціал E_{st} , густину струму корозії i_{cor} , густину граничного дифузійного струму i_d , константи Тафеля b_c і b_a катодної та анодної реакції відповідно) визначали у 0,3%-му водному розчині NaCl, знімаючи поляризаційні потенціодинамічні криві на потенціостаті IPC-Pro за швидкості розгортки потенціалу 1 mV/s . Застосовували стандартну триелектродну термостатовану електрохімічну комірку з насиченим хлоросрібляним електродом порівняння та допоміжним платиновим. Температура корозивного середовища $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Графічно-аналітичним методом за рівнянням Стерна-Гірі [10] розраховували поляризаційний опір R_p : $\Delta E/\Delta i = R_p = K/i_{cor}$, де $K = b_a \cdot b_c / [2,3 \cdot (b_a + b_c)]$ – константа.

Таблиця 1. Механічні властивості сталі

№ стану	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
1	434	305	31,9	72
2	436	295	28,1	64,4
3	450	298	28,0	58,2

Механічні властивості сталі. В результаті експлуатації характеристики міцності і пластичності металу змінилися неістотно (табл. 1), однак, спостерігали чітку тенденцію зниження пластичності. Ці властивості металу елементів, що циклічно деформувалися розтягом чи стиском, суттєво не різнилися. Найчутливішим до зміни стану металу виявилось відносне звуження ψ .

До експлуатаційної зміни стану металу достатньо чутливими виявились ударна в'язкість KCV і температура крихко-в'язкого переходу (рис. 1). За кімнатної температури опір крихкому руйнуванню металу всіх станів високий, однак, знижується від 160 до 120 J/cm^2 внаслідок експлуатації, незалежно від знака робочих циклічних напружень.

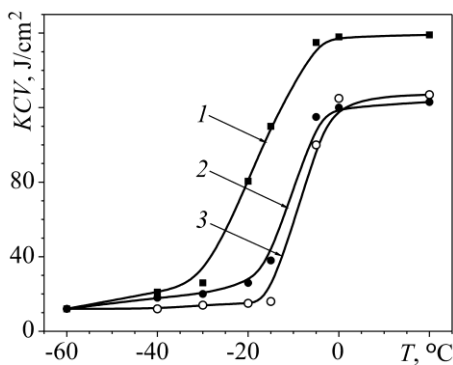


Рис. 1. Залежності $KCV-T$ для сталі Ст3 різних станів (криві 1–3 відповідають номеру стану).

Fig. 1. Dependences $KCV-T$ for steel St3 in different states (curve 1–3 relatively to the states number).

Експлуатованому металу властивий істотний зсув кривих $KCV-T$ в область підвищених температур. Гранично низькі значення KCV ($\sim 8 \text{ J/cm}^2$) отримано за температур випроб -40 та -60°C для всіх станів сталі.

Фрактографічний аналіз. Головну увагу приділяли ділянці старту тріщини від вершини надрізу. За випроб ударом при 20°C на зламах металу у вихідному стані та після експлуатації на макро- і мікрорівнях переважає в'язкий ямковий рельєф внаслідок зародження порожнин, їх росту та руйнування перетинок між ними. Однак у вихідному металі переважають рівноосні ямки відриву (рис. 2a), а в експлуатованому – ямки зсуву (рис. 2b).

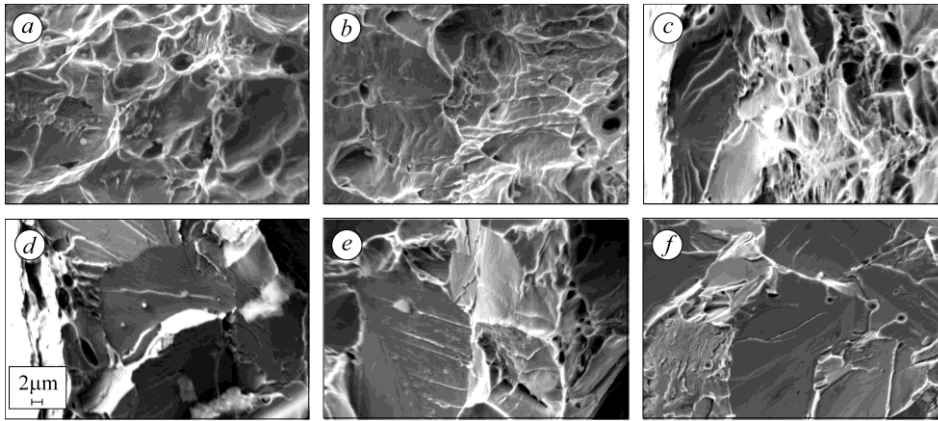


Рис. 2. Фрактографічні особливості руйнування сталі Ст3 у станах № 1 (а, с, е) та № 2 (b, d, f) за випроб на ударну в'язкість KCV за температури +20°C (а, b) та -60°C (с-f) поблизу вершини надрізу (а-d) та на віддалі 5 mm від нього (е, f).

Fig. 2. Fractography peculiarities of the Charpi tests KCV of steel St3 in as-received state № 1 (a, c, e) and after service № 2 (b, d, f) at the temperature +20°C (a, b), and -60°C (c-f) near the notch tip (a-d) and at the distance of 5 mm from it (e, f).

Зниження температури випроб до температур крихко-в'язкого переходу не спричинило якісних змін рельєфу зламів, однак, зменшилась площа в'язкого підростання і швидше реалізувалось крихке кризьзеренне руйнування. З її спадом до -60°C змінився механізм руйнування металу. У вихідному стані спостерігали невеличкі ділянки крихкого кризьзеренного руйнування, які передували локальному в'язкому росту тріщини (рис. 2с). В експлуатованому металі руйнування в околі вершини надрізу відбувалося або відразу за крихким кризьзеренним механізмом, або ж у вигляді острівків ямкового рельєфу на локальних ділянках вздовж фронту надрізу (рис. 2d). Для всіх варіантів сталі характерне крихке кризьзеренне руйнування з річковими візерунками на фасетках відколювання, яке подекуди перемежовувалося вузькими ділянками з елементами в'язкого рельєфу (рис. 2e, f). Однак протяжність і стартового, і подальших елементів в'язкого рельєфу, що відповідають зупинкам тріщини на межах, несприятливо орієнтованих для відколювання структурних елементів, виявилася істотно більшою в сталі у вихідному стані, ніж в експлуатованому.

Електрохімічні властивості сталі. Потенціодинамічні поляризаційні дослідження виявили (табл. 2) певні відмінності електрохімічних характеристик сталі залежно від її стану. Експлуатованому металу (стани № 2 і 3) властиве негативніше значення електродного потенціалу, а інтенсивність анодного процесу тут вища (рис. 3) проти вихідного стану, однак механізм анодної реакції однаковий для всіх станів, про що свідчить характер анодних поляризаційних кривих та однакові значення константи Тафеля b_a .

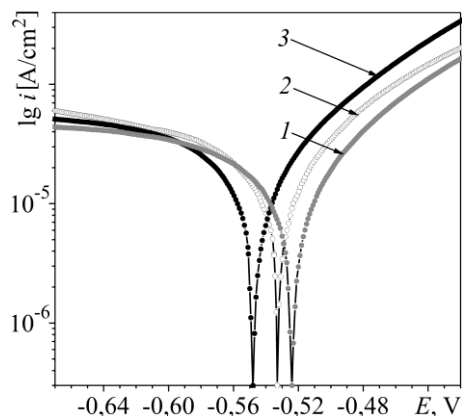


Рис. 3. Поляризаційні криві сталі Ст3 різних станів у 0,3%-му розчині NaCl (пояснення див. рис. 1).

Fig. 3. Polarization curves of steel St3 of different states in 0.3% NaCl solution (explanation in Fig. 1).

Обмежувальною стадією корозійного процесу є дифузія деполяризатора, на що вказують ділянки граничних дифузійних струмів на катодних вітках поляризаційних кривих. Експлуатованій сталі властиві вищі швидкості катодних реакцій (вища густина граничних дифузійних струмів). Механізм перебігу катодного процесу однаковий для всіх станів, про що свідчать константи Тафеля катодних реакцій.

Таблиця 2. Електрохімічні властивості сталі

№ стану	E_{st}, V , за експозиції τ , s			$i_{cor}, \mu A/cm^2$	$i_d \cdot 10^5, A/cm^2$	$-b_c$	b_a	$R_p, \Omega \cdot cm^2$
	0	15	1800					
1	-0,361	-0,408	-0,524	7,86	5,61	0,10	0,06	2074,3
2	-0,370	-0,453	-0,533	9,82	7,88	0,10	0,06	1660,3
3	-0,374	-0,454	-0,548	9,89	7,11	0,10	0,06	1648,6

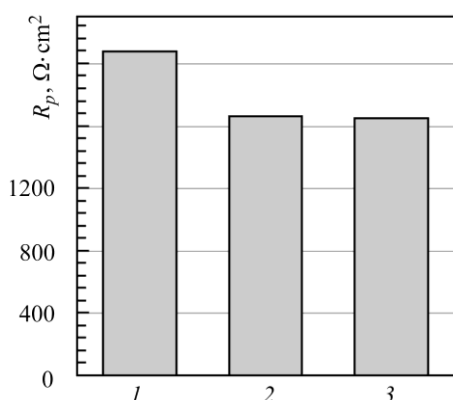


Рис. 4. Поляризаційний опір сталі Ст3 різних станів у 0,3%-му розчині NaCl (пояснення див. рис. 1).

Fig. 4. Polarization resistance of steel St3 of different states in 0.3% NaCl solution (explanation in Fig. 1).

Найчутливішою до експлуатаційної деградації металу виявилась ударна в'язкість, інші характеристики змінювались несуттєво. Зокрема, зростання міцності, зниження пластичності та ударної в'язкості відповідає загальним закономірностям їх зміни в результаті експлуатації [1–4, 9].

Зазначимо, що ударна в'язкість і температура крихко-в'язкого переходу експлуатованого металу чутливі до його експлуатаційної деградації. Але оскільки температура крихко-в'язкого переходу може зсуватися у бік додатних температур навіть за незмінного значення KCV для кімнатної температури випроб [11, 12], то вважали її чутливішою для оцінювання деградації металу.

Кількісним оцінкам KCV відповідають фрактографічні ознаки руйнування. За кімнатної температури випроб на зламах спонтанному руйнуванню вихідного та експлуатованого металу за крихким кризьзеренним механізмом передують підростання тріщини за в'язким ямковим механізмом. У вихідному металі в'язке підростання визначають критичні напруження відриву, а в експлуатованому – зсуву. Це вважали ознакою нижчих енергозатрат для старту тріщини.

Врахувавши встановлену за результатами механічних випроб при $-60^\circ C$ незалежність рівня KCV від експлуатаційної деградації, припустили, що низькі

Отже, експлуатовані за дії розтягальних чи стискальних напружень сталі володіють пониженою корозійною тривкістю порівняно зі сталлю у вихідному стані. Зокрема, густини струму їх корозії становлять 9,82 (стан № 2) та 9,89 $\mu A/cm^2$ (стан № 3), що перевищує цей показник для неексплуатованого стану на $\sim 25\%$ (7,86 $\mu A/cm^2$). Тому вищим поляризаційним опором володіє сталь у вихідному стані (рис. 4).

Обговорення результатів. Досліджувана рама стріли буртоукладника виготовлена винятково з кутника одного розміру, тому можна вважати, що використаний для цього метал однієї серії постачання, а це полегшує виокремлення різних його станів тільки за експлуатаційними навантаженнями.

енергозатрати на зародження тріщини в металі у вихідному стані (крізьзеренні фрагменти, які передують локальному в'язкому підростанню) компенсуються більшими затратами на її поширення. І, як наслідок, проявляється незалежність рівня *K_{ICV}* від експлуатаційної деградації.

Слабку чутливість деградації металу до характеру циклічних експлуатаційних напружень розтягу чи стиску можна пояснити тим, що експлуатаційні напруження нижчі за границю витривалості досліджуваної сталі, коли метал реверсивно пластично деформується в мікро- чи навіть нанооб'ємах. Тут не важливий знак змінних напружень, тобто пластичність матеріалу вичерпуватиметься навіть за циклічного стиску. Прикладом може слугувати ріст втомних тріщин від концентраторів напружень за віднульового стиску [13].

Зниження корозійно-електрохімічних характеристик експлуатованої сталі (стаціонарного потенціалу, густини струму корозії, густини граничного дифузійного струму та поляризаційного опору) також є проявом її деградації в об'ємі полочки кутника. Виявлене (рис. 3 і 4, табл. 2) пониження корозійної тривкості сталей, що довго експлуатувались за дії розтягальних чи стискальних напружень, очевидно, пов'язане зі збільшенням їх термодинамічної нестійкості, внаслідок чого полегшується перебіг анодного та катодного процесів, а також з механічним руйнуванням захисних плівок. Встановлено [14], що в умовах атмосферної корозії можливе наводнювання сталі: водень проникає у сталь внаслідок зміни рН та потенціалу поблизу поверхні металу, що кородує, під час висушування тонкої плівки води на сталевій поверхні. Оскільки механічні напруження посилюють проникнення водню [15], то можна припустити, що погіршення корозійно-електрохімічних характеристик експлуатованої сталі рами стріли буртоукладника є наслідком її корозійно-водневої деградації.

ВИСНОВКИ

Тривала експлуатація рами призвела до істотного зниження ударної в'язкості металу за незначного підвищення характеристик міцності та спаду пластичності. Експлуатаційне зниження опору крихкому руйнуванню узгоджується зі зменшенням енергоємності руйнування. Виявлено погіршення низки корозійно-електрохімічних характеристик експлуатованої сталі (стаціонарного потенціалу, густини струму корозії, густини граничного дифузійного струму та поляризаційного опору), що є проявом її експлуатаційної деградації. Встановлено, що достатньо чутливим інформативним параметром оцінювання експлуатаційної деградації сталі є поляризаційний опір.

РЕЗЮМЕ. Сравнением механических свойств стали уголков рамной конструкции длительно эксплуатированного буртоукладчика с исходным состоянием металла выявлено, что прочность и пластичность существенно не изменились, но ухудшилась ударная вязкость металла, причем практически независимо от знака переменных напряжений. Для оценки эксплуатационной деградации свойств использованы электрохимические подходы и установлено, что достаточно чувствительным информативным параметром является поляризационное сопротивление.

SUMMARY. The carriage structure angle bar steel properties of long-term exploited clamp packer with the metal in as-received state were compared. It was found that the strength and plasticity were not changed noticeably but the impact strength of the metal deteriorated practically independently of the cyclic stresses sign. The electrochemical approaches were used for evaluation of the properties degradation and it was established that polarization resistance was sensitive enough informative parameter.

1. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д. Аномальний прояв високотемпературної деградації металу шва зварного з'єднання оцаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 1. – С. 73–79.

- (Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D. Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints // *Materials Science*. – 2007. – **43**, № 1. – P. 77–84.)
2. *Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite–pearlite steel* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyryl'nyk et al. // *Mat. and Corr.* – 2009. – **60**, № 9. – P. 716–725.
 3. *Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyryl'nyk et al. // *Eng. Failure Analysis*. – 2010. – **17**. – P. 624–632.
 4. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2011. – **47**, № 2. – С. 11–20.
(*Kryzhaniv's'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs* // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 2. – P. 127–136.)
 5. *Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу* / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // Там же. – 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. Tsyryl'nyk, L. I. Nyrkova // *Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 31–238.)
 6. *Пустовой В. М., Реценко І. О. Моделювання експлуатаційної деградації сталей вантажних морських портових конструкцій у лабораторних умовах* // Там же. – 2012. – **48**, № 5. – С. 7–14.
(*Pustovoi V. M. and Reshchenko I. O. Modeling of the in-service degradation of steels of cargo seaport structures under the laboratory conditions* // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 5. – P. 561–568).
 7. *Електрохімічні показники експлуатаційної деградації сталей нафто- і газогонів* / О. Цирульник, Г. Никифорчин, З. Слободян і ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2006. – Спецвип. № 5, т. 1. – С. 284–289.
 8. *Nykyforchyn H. M. and Tsyryl'nyk O. T. In-service degradation diagnostics of low-alloyed steels and aluminium alloys properties by electrochemical methods* // *Ultrasound*. – 2009. – **64**, № 1. – P. 46–49.
 9. *Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т. Особливості експлуатаційної деградації конструкційних металічних матеріалів “в об'ємі” за дії агресивних середовищ* // *Проблеми прочності*. – 2009. – № 6. – С. 79–94.
(*Nykyforchyn H. M. and Tsyryl'nyk O. T. Specific features of the in-service bulk degradation of structural steels under the action of corrosive media* // *Strength of Materials*. – 2009. – **41**, № 6. – P. 651–663.)
 10. *Шрайер Л. Л. Коррозия: Справ.* – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.
 11. *Sour Service X65 Seamless Linepipe for Offshore Special Applications* / E. Anelli, D. Collettori, J. C. Gonzalez et al. // *Proc. of the 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. Stavanger, Norway, 2001*. – P. 242–249.
 12. *Изменение структуры и свойств трубной стали во время длительных выдержек под нагрузкой* / С. И. Ильин, М. А. Смирнов, Ю. И. Пашков и др. // *Изв. Челябинск. науч. центра*. – 2002. – Вып. 4 (17). – С. 42–46.
 13. *Романив О. Н., Ткач А. Н., Ленец Ю. Н. Рост усталостных трещин при сжатии и его использование для оценки циклической трещиностойкости* // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1987. – № 6. – С. 57–63.
(*Romaniv O. N., Tkach A. N., and Lenets Yu. N. Using fatigue crack growth in compression for evaluating cyclic cracking resistance* // *Soviet Materials Science*. – 1987. – **23**, № 6. – P. 587–593.)
 14. *Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process* / T. Tsuru, Y. Huang, M. R. Ali et al. // *Corr. Sci.* – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
 15. *Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування і довговічність матеріалів у водневмісних середовищах*. – К.: Наук. думка, 2008. – 345 с.

Одержано 26.06.2013