

УДК 624.07:620.18:004.932.2

СТРУКТУРНО-ФРАКТОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА^{1,2}

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізовано металографічні та фрактографічні особливості конструкційних сталей, тривало експлуатованих у кліматичних умовах (коливання температури, пориви вітру, кислотні дощі тощо). Встановлено, що спільною структурною ознакою деградації вуглецевих сталей є неметалеві включення, що втратили зв'язок з матрицею під час тривалої експлуатації, а фрактографічною – елементи окрихчення у вигляді кризьзерених відколів та розшарувань, виявлені на зламах ударних зразків. Встановлено, що фрактографічний показник (площа елементів окрихчення) виявився чутливішим до деградації сталей. Адже руйнування, як правило, відбувається по траєкторії найнижчого опору з максимальною густиною елементів окрихчення, а шліф для металографічних досліджень перетинає зразок уздовж довільно обраної площини, на якій густина неметалевих включень не обов'язково максимальна.

Ключові слова: конструкційні сталі, структура, фрактографія, експлуатаційна деградація, пошкодженість.

Metallographic and fractographic features of structural steels, after long-term operation in climatic conditions (temperature fluctuations, gusts of wind, acid rain, etc.) are analyzed. It is established that a common structural feature of carbon steel degradation is non-metallic inclusions that lost cohesion with the matrix during long-term operation and a fractographic feature are elements of embrittlement in the form the delaminations and transgranular cleavages on the fracture surfaces of the specimens under impact. The fractographic indicator (area of embrittlement elements) is found to be more sensitive to the operational degradation of steels, because fracture usually occurs along a path of the lowest resistance with a maximum density of embrittlement elements, and a surface for metallographic studies intersects the sample along an arbitrarily chosen plane, on which the density of non-metallic inclusions is not necessarily maximum.

Keywords: structural steels, structure, fractography, operational degradation, damage.

Вступ. Безпечна експлуатація об'єктів залежить від фактичного стану структури та фізико-механічних властивостей металу. Вплив корозійно-активних середовищ, зміна температури, робочих навантажень та напружень призводять до його експлуатаційної деградації [1–4]. У результаті поступово накопичуються мікропошкодження, які сприяють зародженню субмікротріщин, які, зливаючись, утворюють мікротріщини, а досягнувши критичного розміру, спричиняють незворотну пошкодженість матеріалу та руйнування конструкції [5, 6].

Для оцінювання поточного структурно-механічного стану сталей об'єктів тривалої експлуатації використовують комплекс чутливих до деградації характеристик. Дуже важливо всебічно вивчити структурні змін у конструкційних сталях під час тривалої експлуатації та механізми їх руйнування, а також дослідити особливості деградації, встановити найчутливіші до неї ознаки.

Контактна особа: Г. В. КРЕЧКОВСЬКА, e-mail: krechkovskahalyna@gmail.com

Мета роботи – виявити зв'язок між структурним і фрактографічним показниками деградації тривало експлуатованих сталей та обґрунтувати вибір найчутливішого з них.

Об'єкт та методи досліджень. Проаналізували елементи конструкцій кінця XIX–початку XX сторіч зі сталевого профільного прокату, зокрема з водонапірної вежі (позн. № 1 та 2), кутники якої виготовлені в 1906 та 1944 рр., відповідно, Аджигольського маяка (№ 3, 1911 р.) та об'єкти м. Вроцлава, зроблені з пудлингових сталей (№ 4 – Головний залізничний вокзал (1855–1870 рр); № 5 та 6 – Пісковий (1861 р.) та Центрально-Поморський (1885 р.) мости). За вмістом вуглецю – це низько- і середньовуглецеві сталі (див. таблицю), тому для порівняння як прототипи використали сучасну неексплуатовану сталь (№ 7).

Хімічний склад сталей

№ сталі	Вміст елементів, wt.%				
	C	Si	Mn	S	P
1	0,28	0,006	0,48	0,04	0,019
2	0,34	0,27	0,64	0,06	0,038
3	0,1	0,002	0,46	0,02	0,004
4	0,07	0,52	0,15	0,03	>0,156
5	0,29	1,17	0,35	0,03	>0,156
6	0,40	1,17	0,45	0,11	>0,156
7	0,22	0,07	0,06	0,03	0,035

Металографічні та фрактографічні дослідження виконували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP. Для оцінювання фрактографічних ознак деградації сталей використали програмні продукти Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України для комп'ютерного оброблення півтонових зображень, що полягало в автоматизованому виділенні об'єктів аналізу та кількісній оцінці їх площі [7].

Результати та їх обговорення. Металографічним аналізом виявили типову ферит-перлітну структуру вуглецевих сталей вежі Шухова (№ 1 та 2) та Аджигольського маяка (№ 3). Мікроструктура сталей елементів конструкцій Вроцлава змінювалася від феритної (№ 4) до ферит-перлітної (№ 5) та ферит-карбідної (№ 6). Спільною їх ознакою була велика кількість довгих (50...300 μm) включень, орієнтованих у напрямі вальцювання, та їх довільний розподіл у перерізі елементів конструкцій. Великі розміри, лінзоподібна геометрія та ослаблена когезія з матрицею цих включень вплинули на механічні властивості сталей [8].

У структурі сталей у вихідному стані неметалеві включення зберігають зв'язок з матрицею (рис. 1a). Тоді як за сумісної дії експлуатаційних чинників, зокрема механічних напружень, структурно-механічний стан експлуатованих вуглецевих сталей змінюється, що проявляється декогезією неметалевих включень від матриці (рис. 1b). Внаслідок цього, попри зовнішнє збереження цілісності елементів конструкцій, в “об'ємі матеріалу” формуються порожнини, розміри яких сумірні з розмірами включень, що послаблюють переріз конструкцій.

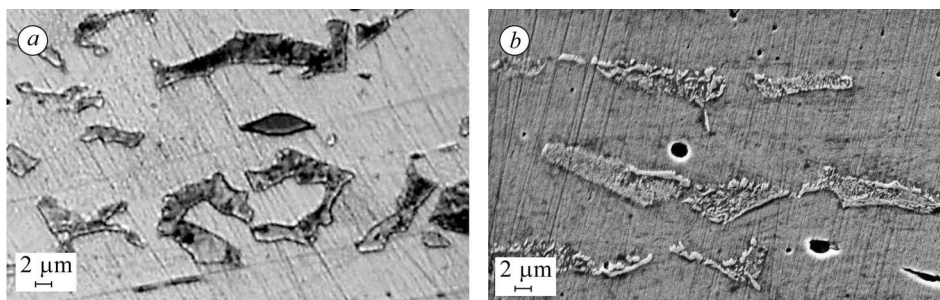


Рис. 1. Структура вуглецевої сталі у вихідному стані (a) і після тривалої експлуатації на Аджигольському маяку (b).

Fig. 1. Structure of carbon steel in the initial state (a) and after long-term operation at Adzhigolsky lighthouse (b).

Неметалеві включення виконують роль структурних концентраторів напружень, що зумовлюють зародження мікротріщин. Адже в їх околі виникають поля напружень, радіус дії яких досягає 4–5 радіусів включення. А за вмісту в сталі до 0,2% включень об'єм напруженого металу досягає 3...5%. Густина дислокацій, розташованих в околі включень, у 4,3 рази вища, ніж у навколишній матриці, а за деформації зразків розтягом на 1,5% цей показник зростає у 7 разів. Отже, під час пластичної деформації металу неметалеві включення перешкоджають руху дислокацій, стають осередками дислокаційних джерел, в околі яких можуть зароджуватися і в'язкі, і крихкі тріщини [9]. А за додаткового впливу водню ці процеси інтенсифікуються. Досліджуючи експлуатаційну деградацію конструкційних сталей, особливо увагу приділяють водню. Відомо [10–12], що за атмосферної корозії можливе наводнювання сталі. Через електрохімічну гетерогенність структури метал конструкцій особливо схильний до корозії. Під час електрохімічної взаємодії з воденьвмісним середовищем включення служать катодами і впливають на анодне розчинення металу. Інтенсивність корозії на поверхні кутників залежить від густини включень. Через локалізацію катодного процесу в околі міжфазних меж включень з матрицею метал наводнюється. Тому кліматичні умови експлуатації конструкційних сталей слід розглядати не тільки як чинник корозійних уражень поверхні кутників, але і як причину наводнювання металу [12–14]. Отже, метал деградує вже за дії і механічних напружень, і водню.

У праці [15] проаналізовано механічні характеристики вуглецевих сталей елементів вежі Шухова, Адзигольського маяка та елементів конструкцій Вроцлава, тривало експлуатованих за дії кліматичних умов. Виявили, що найчутливішою до зміни технічного стану сталей через деградацію є їх ударна в'язкість.

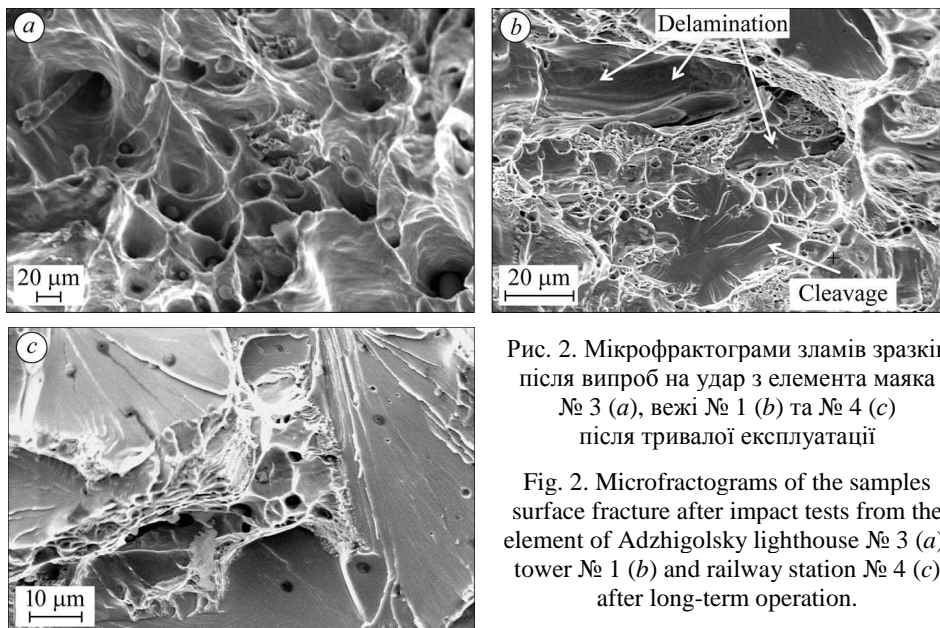


Рис. 2. Мікрофрактограми зламів зразків після випроб на удар з елемента маяка № 3 (а), вежі № 1 (b) та № 4 (c) після тривалої експлуатації

Fig. 2. Microfractograms of the samples surface fracture after impact tests from the element of Adzhigolsky lighthouse № 3 (a), tower № 1 (b) and railway station № 4 (c) after long-term operation.

Аналізували злами ударних зразків як півтонові відбитки поверхонь, сформованих через поширення руйнування траєкторією з найнижчим опором. Встановили фрактографічні ознаки, пов'язані з деградацією сталей конструкційних елементів. По-перше, практично неструктуровані поверхні розшарувань, перетинки між якими руйнувалися за типовим в'язким механізмом внаслідок формування ямок відриву (рис. 2а). Порожнини з включеннями чи без них сприяли накопиченню водню на міжфазних межах і полегшували руйнування перетинок між найближчими з них шляхом формування розшарувань. Причому, якщо включен-

ня перерізає поверхня шліфа, то руйнування, як правило, відбувається по траєкторії найменшого опору, яку визначає критична густина включень, що втратили когезію з матрицею. По-друге, об'єднання розшарувань, перетинки між якими руйнуються або за в'язким (ямковим), або за крихким (відкольним) механізмами (рис. 2b), і, по-третє, фасетки кризьзеренних відколів з класичними річковими візерунками на них (рис. 2c).

Отже, металографічні кількісні оцінки деградації вуглецевих сталей, визначені за площею відшарованих неметалевих включень C_p на одиницю площі шліфа C_t , могли бути заниженими, тоді як такі ж за замірами площі структурних елементів окрихчення на зламах сталі, ініційованих відшарованими від матриці включеннями, виявилися чутливішими до зміни його структурно-механічного стану.

За залежністю (рис. 3) між структурним C_p/C_t (площа відшарованих від матриці неметалевих включень на одиницю площі металографічного зображення) та фрактографічним S_{br}/S (площа фрагментів окрихчення на зламах зразків після випроб на удар на одиницю площі фрактографічного зображення) показниками стану тривало експлуатованих сталей виявили більшу (майже вдвічі) чутливість останнього до деградації цих сталей. Тому в подальших оцінках використали саме фрактографічний показник, який враховує особливості механізмів руйнування сталей, спричинені їх фактичним структурно-механічним станом. Крім того, він придатний для оцінювання деградації тривало експлуатованих сталей. Ступінь деградації аналізованих сталей запропоновано визначати за часткою елементів окрихчення S_{br} (розшарування на фоні типового в'язкого рельєфу з ямок відриву (рис. 2b), або їх суміші з кризьзеренними відколами з класичними річковими візерунками (рис. 2c)) на одиничній площі зламу S .

Отже, за результатами порівняння структурних і фрактографічних показників для оцінювання структурно-механічного стану експлуатованих вуглецевих сталей обґрунтували правомірність застосування саме фрактографічних ознак окрихчення експлуатованих сталей, які проявлялися на зламах зразків, випробуваних на ударну в'язкість. Саме з ними пов'язали високу чутливість опору крихкому руйнуванню до їх деградації.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано структурні та фрактографічні особливості експлуатаційної пошкодженості конструкційних сталей. Металографічною ознакою є декогезія неметалевих включень від матриці, а фрактографічною – частка елементів окрихчення (розшарувань та кризьзеренних відколів на зламах зразків після випроб на удар). Побудовано залежність між структурним C_p/C_t та фрактографічним S_{br}/S показниками стану тривало експлуатованих сталей. Встановлено, що металографічний параметр, який враховує лише пори у площині шліфа, менш чутливий до деградації, ніж фрактографічний, що бере до уваги частку крихких елементів. Траєкторія поширення руйнування пролягає по шляху найменшого опору, який залежить від критичної щільності розташування відокремлених від матриці включень.

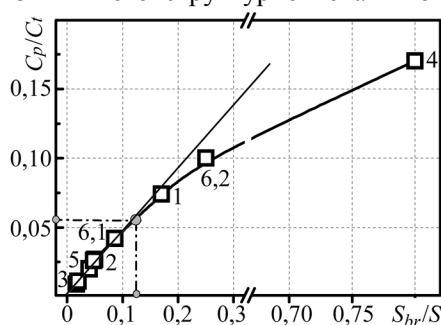


Рис. 3. Залежності між структурним C_p/C_t і фрактографічним S_{br}/S показниками деградації сталей.

Fig. 3. Relationships between structural C_p/C_t and fractographic S_{br}/S indicators of the steel degradation.

1. *Strain-life* and crack propagation fatigue data from several Portuguese old metallic riveted bridges / A. M. P. Jesus, A. L. L. Silva, M. V. Figueiredo, J. A. F. O. Correia, A. S. Riberio, and A. A. Fernandes // *Eng. Failure Analysis*. – 2011. – **18**, № 11. – P. 48–163.
2. Lesiuk G., Szata M. Aspects of structural degradation in steels of old bridges by means of fatigue crack propagation // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2011. – **47**, № 1. – С. 76–82.
(Lesiuk G., Szata M. Aspects of structural degradation in steels of old bridges by means of fatigue crack propagation // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 1. – P. 82–88.)
3. Греділь М. І. Роль розсіяної пошкодженості в експлуатаційній деградації сталей магістральних газопроводів // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2011. – **33**, Спецвип. – С. 419–426.
(Hredil M. I. Role of disseminated damages in operational degradation of steels of the main gas conduits // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2011. – **33**, Spec. Iss. – P. 419–426.)
4. Fatigue and failure of steel of offshore gas pipeline after the laying operation / L. Poberezhny, P. Maruschak, O. Prentkovskis, I. Danyliuk, T. Pyrig, and J. Brezinová // *Archives of Civil and Mech. Eng.* – 2016. – **16** (3). – P. 524–536.
5. Кречковська Г. В. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування водню в конструкційних сталях // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 4. – С. 67–70.
(Krechkovs'ka H. V. Fractographic signs of the mechanisms of transportation of hydrogen in structural steels // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 4. – P. 509–513.)
6. Experimental and computed stress distribution ahead of a notch in a pressure vessel: Application of T-stress conception / H. Moustabchir, Z. Azari, S. Hariri, and I. Dmytrakh // *Computational Mat. Sci.* – 2012. – **58**. – P. 59–66.
7. Комп'ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 4. – С. 53–60.
(Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, L. M. Svirs'ka, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 4. – P. 474–481.)
8. Degradation Theory of Long Term Operated Materials and Structures / G. Lesiuk, J. A. F. O. Correia, H. V. Krechkovska, G. Pekalski, A. M. P. de Jesus, and O. Student // *Structural Integrity*, 2021. – **15**. – 205 p.
9. Brooksbank D., Brooksbank D., and Andrews K. W. Stress field around inclusions and their relation to mechanical properties // *J. of the Iron and Steel Institute*. – 1972. – **210**, № 4. – P. 246–250.
10. Sri Hastuty and Hideki Katayama Hydrogen permeation of iron caused by atmospheric corrosion // *Conf. Proc.* – 2016. – **1778**. – P. 030063–030068.
11. Omura T., Kudo T., and Fujimoto S. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion // *Mat. Trans.* – 2006. – **47**, № 12. – P. 2956–2962.
12. Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process / T. Tsuru, Ya. Huang, Md. R. Ali, and A. Nishikata // *Corr. Sci.* – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
13. Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперболоїдних сіткових веж Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, О. І. Звір'ко, І. М. Курнат // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 6. – С. 70–78.
(Structure and properties of the steels of hyperboloid gridshell Shukhov's towers after long-term operation / H. M. Nykyforchyn, A. O. Kutnyi, O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, O. I. Zvirko, I. M. Kurnat // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 6. – P. 787–795.)
14. Захарчук В. Г., Цирульник О. Т., Никифорчин Г. М. Електрохімічні та корозійні властивості наводнених сталей 45 і 12X18H10T // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2005. – № 2. – С. 66–76.
(Zakharchuk V. H., Tsyryl'nyk O. T., Nykyforchyn H. M. Electrochemical and corrosion properties of hydrogenated 45 and 12KH18N10T steels // *Material Science*. – 2005. – **41**, № 2. – P. 223–229.)
15. Фрактографічний критерій досягнення вуглецевими сталями критичного технічного стану / О. З. Студент, Г. В. Кречковська, Г. М. Никифорчин, І. М. Курнат. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2019. – **55**, № 2. – С. 24–30.
(Fractographic criterion of attainment of the critical technical state by carbon steels / O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, H. M. Nykyforchyn, I. M. Kurnat // *Material Science*. – 2019. – **55**, № 2. – P. 160–167.)

Одержано 10.02.2021