

УДК 620.17:620.184.6:004.932.2

ФРАКТОГРАФІЧНИЙ КРИТЕРІЙ ДОСЯГНЕННЯ ВУГЛЕЦЕВИМИ СТАЛЯМИ КРИТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

О. З. СТУДЕНТ, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА, Г. М. НИКИФОРЧИН, І. М. КУРНАТ

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

Запропоновано мікрофрактографічний метод оцінювання технічного стану тривало експлуатованих вуглецевих сталей профільного прокату, який базується на побудові кореляційної залежності між зміною опору крихкому руйнуванню, зокрема ударною в'язкістю, і співвідношенням площ фрактографічних елементів окрихчення і в'язкого рельєфу. Критичний стан експлуатованих сталей обґрунтовано якісною зміною елементів окрихчення на зламах, а саме: розшарування, властиві їх докритичному стану, змінюються на кризьеренні відколи. Це відбувається в точці біфуркації на кореляційній залежності, спільній для низки сталей незалежно від умов їх експлуатації.

Ключові слова: *фрактографія, механічні властивості, діагностика, кореляційні залежності, корозійно-воднева деградація.*

Вступ. Розширення застосування мікрофрактографії для діагностування стану металів пов'язане з можливостями виявляти ознаки їх експлуатаційної деградації, які спричиняють руйнування елементів конструкцій. Воно відбувається, зазвичай, за траєкторією з найнижчим опором, яку визначають експлуатаційні мікроструктурні зміни та розпорошені в об'ємі металу пошкодження. Тому комплексне оцінювання мікроструктурних (за металографічними оцінками) [1], фрактографічних [2] та механічних [3] показників досягнення критичного стану сталей створює основу для обґрунтування діагностичних ознак їх експлуатаційної деградації. А виявлення відповідних елементів на зламах зразків, зруйнованих у контрольованих лабораторних умовах, та на реальних зламах конструкційних елементів, дає змогу обґрунтувати їх зв'язок з експлуатаційною деградацією металу. Тоді на основі встановлених кореляційних залежностей між фрактографічними ознаками та фізико-механічними характеристиками до різної міри деградованих сталей можна оцінити їх технічний стан (стосовно критичного) за результатами випроб зразків-свідків або виготовлених з вирізок. Актуальність такого підходу зростає за експлуатації об'єктів у корозивно-наводнювальних середовищах, які інтенсифікують і мікроструктурні зміни [4–6], і формування розпорошених пошкоджень [7].

Об'єкт та методики досліджень. Аналізували профільний прокат конструкційних елементів водонапірної вежі у Миколаєві (1906 р.) зі старовинної (№ 1, табл. 1) і ремонтної (№ 2, 1944 р.) сталей, Аджигольського маяка (№ 3, 1911 р.), об'єктів у Вроцлаві (№ 4 – Головний залізничний вокзал, 1855–1870 рр.; № 5, 6 – Пісковий (1861 р.) та Центрально-Поморський (1885 р.) мости) з пудлінгових сталей та порталних кранів зі сталі типу Ст3 (№ 7). Загалом за вмістом вуглецю це низько- і середньовуглецеві сталі, тому для порівняння як прототипи використали також сучасні неексплуатовані сталі № 8, 9.

Технічний стан металу оцінювали за твердістю НВ, стандартними механічними характеристиками міцності та пластичності під час розтягу гладких циліндричних зразків $\varnothing 5$ mm і довжиною робочої частини 25 mm на машині УМЕ-10Т.

Контактна особа: О. З. СТУДЕНТ, e-mail: student@ipm.lviv.ua

Робочу їх частину полірували і випробували на повітрі і в середовищі синтетичного кислотного дощу (g/l: 3,19 H₂SO₄; 3,2 Na₂SO₄; 1,58 HNO₃; 2,12 NaNO₃; 8,48 NaCl, за pH 4,4 і мінералізації – 0,3%) та за швидкості їх активного деформування відповідно 3·10⁻³ та 1,7·10⁻⁷ s⁻¹ (з визначенням характеристик за корозійного розтріскування зразків за їх повільного навантаження [7]). Ударну в'язкість KCV зразків Шарпі визначали на маятниковому копрі типу ИО-5003. Металографічні та фрактографічні дослідження виконували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP. Для кількісного оцінювання фрактографічних ознак деградації сталей використали програмні продукти ФМІ НАН України для комп'ютерної обробки півтонових зображень шляхом автоматизованого виділення об'єктів аналізу та кількісної оцінки їх площі [9].

Таблиця 1. Хімічний склад досліджених сталей

№ сталі	Вміст елементів, mass%				
	C	Si	Mn	S	P
1	0,28	0,006	0,48	0,043	0,019
2	0,34	0,27	0,64	0,066	0,038
3	0,1	0,002	0,46	0,02	0,004
4	0,07	0,52	0,15	0,028	>0,156
5	0,29	1,17	0,35	0,025	>0,156
6	0,40	1,17	0,45	0,111	>0,156
7	0,20	0,17	0,51	0,03	0,03
8	0,22	0,07	0,06	0,026	0,035
9	0,38	0,26	0,64	0,023	0,028

Металографічні особливості деградації. Експлуатовані сталі № 1 та № 2 з водонапірної вежі мали феритно-перлітну структуру з ланцюжками неметалевих включень, орієнтованими у напрямі вальцювання. На шліфах старовинної сталі № 1 замість включень в основному спостерігали сліди від них, що вважали за металографічну ознаку ослаблення їх зв'язку з матрицею внаслідок експлуатації. У ремонтній сталі № 2 кількість слідів від включень на шліфах була істотно менша (до 35% від загальної кількості), а в неексплуатованих сталях № 8, 9 майже всі включення зберігали зв'язок з матрицею. За співвідношенням кількості слідів і включень на шліфах встановили, що структурно обумовлених розпорощених пошкоджень, вдвічі більше в сталі № 1, ніж в сталі № 2.

Спектр мікроструктур пудлінгових сталей з елементів конструкцій у Вроцлаві змінювався від практично феритної (№ 4) до феритно-перлітної (№ 5) та феритно-карбідної (№ 6), що зумовлено різним вмістом вуглецю в них (рис. 1). Спільна їх ознака – велика кількість довгих (50...300 μm) шлакових включень, орієнтованих у напрямі вальцювання, та їх довільний розподіл у перерізі елементів конструкцій, що пов'язано з тогочасною технологією виготовлення сталей. Великі розміри, лінзоподібна геометрія та ослаблена когезія з матрицею цих включень як структурних концентраторів напружень вплинули на механічні характеристики пудлінгових сталей.

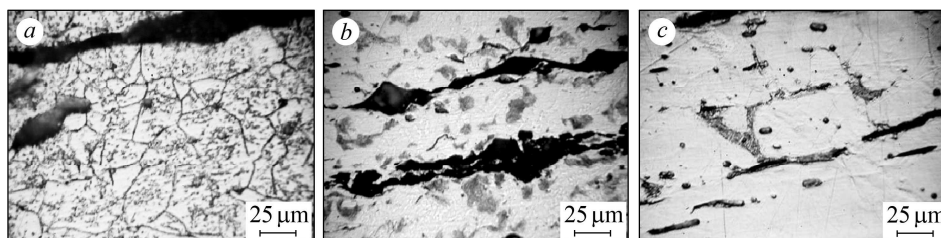


Рис. 1. Структура пудлінгових сталей № 4 (a), № 5 (b) та № 6 (c).

Fig. 1. Structure of the puddling steels № 4 (a), № 5 (b) and № 6 (c).

Механічні характеристики сталей, деградованих за впливу кліматичних чинників. Зі зростанням тривалості експлуатації середні значення твердості сталей № 1 і № 2 були відповідно 83 і 118 НВ проти 132 НВ для неексплуатованої сталі № 8. При цьому розкид значень НВ зростав від $\pm 2\%$ для сталі № 8 до $\pm 5\%$ для ремонтної сталі № 2 і до $\pm 12\%$ для № 1. Це пов'язали зі збільшенням кількості розсіяних у них пошкод за тривалого (~ 65 і понад 100 років) впливу кліматичних чинників. Отримане зростання розкиду значень НВ зі збільшенням тривалості експлуатації сталей узгоджується з раніше описаною оцінкою деградації трубних сталей за зростанням коефіцієнта варіації характеристик твердості металу [10].

Аналізуючи механічні характеристики сталі з горизонтального обода Аджигольського маяка (табл. 2), вирізняли вертикальні (поз. 3.1 та 3.2) та горизонтальні (3.3 та 3.4) полицки кутника, а також поздовжню (3.1, 3.3) та поперечну (3.2, 3.4) орієнтації зразків стосовно напрямку вальцювання. Ударну в'язкість Поморського мосту визначали на поздовжніх (6.1) і поперечних (6.2) зразках. Стан металу елементів порталного крана аналізували з урахуванням робочих напружень під час їх експлуатації (позначенням 7.1 і 7.2 відповідають напруження 50 і 120 МПа) [11].

Таблиця 2. Механічні характеристики за випроб на повітрі вуглецевих сталей з різних елементів конструкцій після їх тривалої експлуатації за впливу кліматичних умов

Механічні характеристики	№ сталі згідно з табл. 1													
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4	5	6.1	6.2	7.1	7.2	8	9
σ_{UTS} , МПа	482	637	453	460	452	452	335	483	414	–	440	427	497	653
σ_{YS} , МПа	310	424	264	288	260	266	205	275	241	–	330	271	310	430
δ , %	26,3	22,4	27,1	26,0	26,9	24,1	11,3	21,0	27,9	–	29,0	24,0	28,3	23,4
ψ , %	41,0	41,7	61,0	52,5	60,6	51,4	23,0	33,0	31,8	–	60,0	53,0	61,5	54,5
KCV , MJ/m ²	0,15	0,3	0,61	0,38	0,51	0,26	0,06	0,45	0,25	0,09	0,95	0,45	0,98	0,46

Отримані характеристики проаналізували з позиції відмінностей експлуатованих сталей від сучасних неексплуатованих, беручи до уваги, що вони відображають як зміну технології виготовлення сталевого прокату впродовж понад ~ 100 років, так і експлуатаційну деградацію сталей за сумісної дії механічних навантажень та кліматичних чинників. Для цього використали показник λ , за яким оцінили зміну характеристик експлуатованих сталей відносно відповідних характеристик неексплуатованих сталей-прототипів (рис. 2). Мінусові значення λ свідчать про зниження характеристик експлуатованих сталей (рис. 2a). Причому, якщо характеристики міцності сталей № 1–3 з водонапірної вежі і маяка майже не змінилися, то для пудлінгових сталей № 4–6 вони стали істотно нижчими (максимально на 33%) порівняно з неексплуатованими сучасними сталями.

Чутливішими до деградації виявилися характеристики пластичності та опір крихкому руйнуванню. Загалом відносно видовження зразків усіх сталей слабше реагує порівняно з відносним звуженням. Проте ударна в'язкість найчутливіша до зміни стану експлуатованих сталей (рис. 2a). Наднизький опір крихкому руйнуванню усіх сталей, виготовлених понад 100 років тому, не можна пояснити лише недосконалістю технології виготовлення тогочасного металопрокату. Вважали, що це зумовлено також деградацією сталей під час їх тривалої експлуатації, оскільки характеристики пластичності та опір крихкому руйнуванню ремонтної сталі № 2, експлуатованої впродовж 65 років в елементах з водонапірної вежі, ви-

явилися значно вищими, ніж старовинної сталі № 1, експлуатованої за ідентичних умов, але впродовж тривалішого періоду.

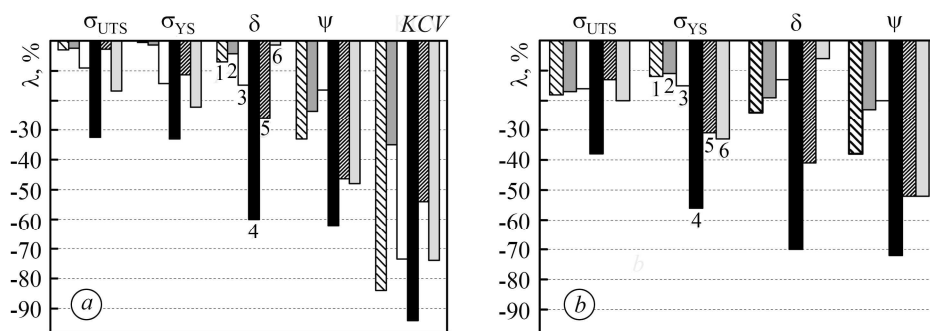


Рис. 2. Ранжування ударної в'язкості KCV та характеристик міцності (σ_{UTS} , σ_{YS}) і пластичності (δ , ψ) за випроб на повітрі (a) та в модельному середовищі кислотного дощу (b) для експлуатованих сталей за їх відносною зміною λ стосовно відповідних характеристик неексплуатованих сталей (сучасних прототипів з відповідним вмістом вуглецю, № 8; 9). Позначення сталей відповідає прийнятому в табл. 1.

Fig. 2. Ranking of the impact toughness of KCV , strength (σ_{UTS} , σ_{YS}) and plastic (δ , ψ) characteristics of the operated steels tested in air (a) and in artificial acid rain environment (b) using the coefficient λ characterizing the relative change of these characteristics with respect to corresponding characteristics of the unexploited steels (modern prototypes with a corresponding carbon content, № 8; 9). The steels designations correspond to that in Table. 1.

За випроб на корозійне розтріскування під навантаженням за повільного розтягу у модельному середовищі кислотного дощу зниження характеристик міцності і пластичності усіх старовинних сталей стало ще очевиднішим (рис. 2b). Зокрема, за впливу середовища характеристики міцності сталей з водонапірної вежі і маяка знизилися значно сильніше, ніж на повітрі (до 9 разів), а сталей з елементів конструкцій у Вроцлаві – несуттєво (до 15%). Максимальне зниження характеристик пластичності за впливу середовища ≤ 4 разів (в основному це стосується відносного видовження сталей з вежі і маяка). В усіх інших випадках зміна не перевищувала 20%.

Зниження характеристик пластичності за випроб у кислотному дощі зв'язали зі сприятливими умовами для локалізації руйнування. Також фрактографічно підтвердили, що руйнування усіх сталей у середовищі розпочиналося від поверхні гладких зразків вздовж меж між феритними і перлітними зернами чи ламелями фериту і цементиту у перліті, що є доказом локалізації цього процесу. Водночас на повітрі руйнування починалося в центрі перерізу зразків, а в околі бічної їх поверхні – відбувалася його завершальна стадія за типовим для конусної частини зламів механізмом з формуванням параболічних ямок зсуву. Істотніше зниження характеристик міцності сталей у середовищі пов'язали з тим, що енергозатрати на початок руйнування вздовж міжфазних меж менші, ніж зародження порожнин у центрі перерізу зразків за випроб на повітрі.

Проаналізувавши фрактограми зразків, випробуваних на удар, як півтонові відбитки поверхонь, сформованих поширенням руйнування за шляхом з найнижчим опором (рис. 3), встановили діагностичні ознаки, пов'язані із деградацією старовинних сталей за їх тривалої експлуатації. До них належать: практично неструктуровані поверхні розшарувань, перетинки між якими руйнувалися за типовим в'язким механізмом внаслідок формування ямок відриву (рис. 3a); фасетки кризьеренних відколів з класичними річковими візерунками на них (рис. 3c); їх

суміш у вигляді розшарувань, перетинки між якими руйнуються або за в'язким (ямковим), або за крихким (відкольним) механізмом (рис. 3b).

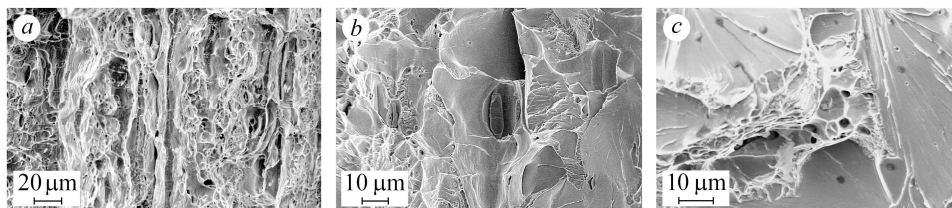


Рис. 3. Типові елементи окрихчення сталей з портального крана (а, розшарування), Адзигольського маяка (b, кризьзеренний відкол праворуч від розшарування) і водонапірної вежі (с, домінування кризьзеренного відколу).

Fig. 3. Typical embrittlement elements of steels from a gantry crane (a, delaminations), Adzhigol lighthouse (b, transgranular cleavage to the right of the delamination) and a water tower (c, transgranular cleavages dominate).

Попри найвищу чутливість ударної в'язкості до деградації важко описати її зміну внаслідок тривалості експлуатації єдиною залежністю (рис. 4a), оскільки характеристики експлуатованих сталей залежать не лише від часу, але ще й від низки інших експлуатаційних чинників. Зокрема, попри однакову тривалість експлуатації сталі в різних елементах одного портального крана різниця між ними за ударною в'язкістю перевищила 50% і залежала від робочих напружень [11].

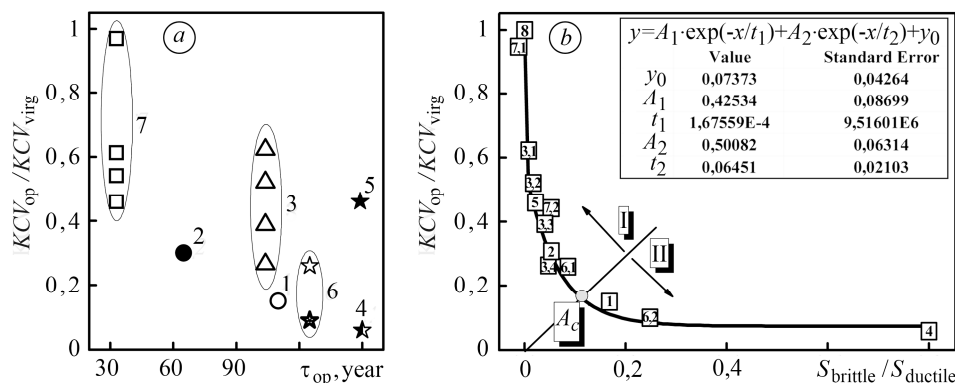


Рис. 4. Відносна зміна опору крихкому руйнуванню KCV_{op} / KCV_{virgin} низки вуглецевих сталей в часі експлуатації τ_{op} (a) та кореляційна залежність між цією зміною та показником $S_{brittle} / S_{ductile}$ (b): I та II – зони докритичного і закритичного стану експлуатованих сталей; A_c – точка біфуркації, яка розмежує сталі з якісно різною природою окрихчення внаслідок експлуатації (розшарування змінюються на кризьзеренний відкол).

Позначення сталей відповідає прийнятому в табл. 1; 2.

Fig. 4. Relative change of the brittle fracture resistance KCV_{op} / KCV_{virgin} of the carbon steels versus the operation time τ_{op} (a) and correlation dependence between its variable and index $S_{brittle} / S_{ductile}$ (b): I and II are the sub- and over critical states of the operated steels; A_c – the bifurcation point separating steels with qualitatively different fractographic embrittlement elements, resulting from operation (delaminations change to transgranular cleavages). The steels designations correspond to that in Tables 1; 2.

Водночас незалежно від дії різних експлуатаційних чинників на стан тривало експлуатованих сталей (відмінності кліматичних умов, напруженого стану елементів тощо) їх сукупна дія спричинила появу на зламах різної кількості характерних фрактографічних ознак окрихчення сталей (розшарування, кризьзеренні відколи або їх суміш). Міру деградації сталей запропонували оцінювати за від-

ношенням площі фрактографічних елементів окрихчення S_{brittle} на зламах до площі в'язкого рельєфу S_{ductile} . Тоді незалежно від умов експлуатації аналізованих сталей їх можна розташувати в ряд за фрактографічним показником $S_{\text{brittle}} / S_{\text{ductile}}$. При цьому вважали, що він характеризує реальний технічний стан сталей після тривалої дії на них сукупності всіх експлуатаційних чинників.

Оскільки запропонований фрактографічний показник визначали на зламах ударних зразків, то очікували його кореляцію з однією з найчутливіших до деградації сталей механічною характеристикою – опором крихкому руйнуванню. На цій основі для сталей, експлуатованих у різних кліматично-силових умовах, побудували кореляційну залежність між зміною, з одного боку, ударної в'язкості, а з іншого – фрактографічного показника стану металу $S_{\text{brittle}} / S_{\text{ductile}}$ (рис. 4b). На цій залежності виділили дві ділянки: I і II. На першій відбувається стрімке зниження ударної в'язкості експлуатованих сталей, пов'язане зі зростанням площі елементів окрихчення у вигляді розшарувань на зламах, які не проявлялися на зламах неексплуатованих сталей. Але завдяки ямковому рельєфу на перетинках між розшаруваннями злам загалом має в'язкий характер (як і в неексплуатованих сталях). Звідси зробили висновок, що саме розшарування спричиняють стрімке зниження ударної в'язкості. Це свідчить про те, що їх потрібно сприймати або як готові дефекти, що виникли за експлуатації, або як локальні зони ослаблення зв'язків між включеннями і матрицею. Але у будь-якому разі вони знижують опір крихкому руйнуванню експлуатованих сталей. На другій ділянці кореляційної залежності стрімко зростає площа елементів окрихчення у вигляді кризьзерених відколів за практично незмінного опору крихкому руйнуванню. Взавши до уваги низьку енергоємність руйнування за таким механізмом, вважали, що поява вже перших фрагментів кризьзереного відколу (чи від розшарувань, чи на фоні в'язкого підростання від вершини надрізу) відповідає початку швидкого зменшення здатності металу чинити опір крихкому руйнуванню. Поява якісно інших елементів окрихчення на зламах досягалася для вуглецевих сталей у точці біфуркації A_c , яку пропонуємо вважати за ознаку досягнення критичного рівня деградації. При цьому докритичний стан сталей I змінювався на близький до критичного II, коли крихке руйнування стає неконтрольованим.

ВИСНОВКИ

На прикладі вуглецевих сталей (старовинних і сучасних) профільного прокату показано, що їх тривала експлуатація спричиняє зниження характеристик міцності, пластичності і найсильніше ударної в'язкості. За випроб на корозійне розтріскування під навантаженням характеристики міцності і пластичності цих сталей знижуються ще сильніше, ніж за випроб на повітрі. На зламах ударних зразків виявлені фрактографічні ознаки (розшарування і кризьзеренні відколи), відповідальні за зниження опору крихкому руйнуванню цих сталей. Побудовано кореляційну залежність між зміною ударної в'язкості та площі елементів окрихчення на зламах відповідних зразків, пов'язаних з деградацією сталей за тривалої (понад 100 років) експлуатації за різних кліматичних впливів. Точка біфуркації на цій залежності відповідає якісній зміні елементів окрихчення на зламах (розшарування на кризьзеренні відколи), що використали для фізичного обґрунтування критичного стану експлуатованих вуглецевих сталей.

РЕЗЮМЕ. Предложен микрофрактографический метод оценки технического состояния длительно эксплуатируемых углеродистых сталей, основанный на построении корреляционной зависимости между изменением сопротивления хрупкому разрушению, в частности ударной вязкости, и соотношений площадей фрактографических элементов охрупчивания и вязкого рельефа. Критическое состояние эксплуатируемых сталей обосновано качественным изменением элементов охрупчивания на изломах – расслоения, присутствующие им в докритическом состоянии, сменяются на трансзеренные сколы. Это происходит

в точке бифуркации на корреляционной зависимости, общей для ряда сталей независимо от условий их эксплуатации.

SUMMARY. The microfractography method for technical state estimation of the long-term operated carbon steels is proposed. The method is based on correlation dependence between brittle fracture resistance changes (particularly, impact toughness) and a ratio of fractographic brittle elements area and ductile relief. The critical state of operated steels is caused by the quality change of embrittlement elements on the fracture surfaces – from the delamination type typical of the subcritical state to transgranular cleavages which start at a bifurcation point on the correlation dependence that is common for numerous steels independent of their operation conditions.

1. Кречковська Г. В., Студент О. З., Никифорчин Г. М. Діагностування технічного стану парогонів ТЕС за твердістю і тріщиностійкістю // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 22–32.
2. Кречковська Г. В. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування водню в конструкційних сталях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 4. – С. 67–70.
(Krechkovska H. V. Fractographic signs of the mechanisms of transportation of hydrogen in structural steels // Materials Science. – 2016. – **51**, № 4. – P. 509–513.)
3. Кречковська Г. В., Студент О. З. Оцінювання деградації сталей парогонів за ударною в'язкістю на зразках з різною геометрією надрізу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 4. – С. 106–110.
(Krechkovska H. V., Student O. Z. Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches // Materials Science. – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.)
4. Features of the microstructural and mechanical degradation of long term operated mild steel / O. Student, H. Krechkovska, G. Lesiuk, J. Correia // Int. J. of Struct. Integr. – 2018. – **9**, № 3. – P. 296–306.
5. Структура і властивості тривало експлуатованих сталей сітчастих гіперболоїдних веж Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, О. І. Звірко, 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. Krechkovska, O. I. Zvirko, I. M. Kurnat // Materials Science. – 2014. – **49**, № 6. – P. 787–795.)
6. Lesiuk G. and 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. 76–81.
(Lesiuk G. and 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.)
7. 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. Tsyryl'nyk, N. V. Kret, V. A. Voloshyn, O. I. Zvirko // Materials Science. – 2018. – **53**, № 5. – P. 674–683.)
8. Henthorne M. The slow strain rate stress corrosion cracking test – A 50 year retrospective // Corrosion. – 2016. – **72**, № 12. – P. 1488–1518.
9. 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. Svirska, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2013. – **48**, № 4. – P. 474–481.)
10. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, С. А. Недосека // Проблемы прочности. – 2003. – № 2. – С. 29–36.
11. Немчук О. О. Вплив експлуатаційного навантаження на корозійну тривкість сталі морського порталного крана // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 121–125.

Одержано 24.01.2019