

УДК 624.074:620.17

## ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ МЕТАЛУ СІТКОВОЇ ГІПЕРБОЛОЇДНОЇ ВЕЖІ ШУХОВА

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА<sup>1</sup>, О. З. СТУДЕНТ<sup>1</sup>, А. І. КУТНИЙ<sup>2</sup>,  
Г. М. НИКИФОРЧИН<sup>1</sup>, П. Я. СИДОР<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Технічний університет Мюнхена, Німеччина

Визначено ударну в'язкість та досліджено фрактографічні особливості зламів старовинної та ремонтної сталей (1906 і 1944 рр. виробництва відповідно) гіперболоїдної сіткової водонапірної вежі Шухова в Миколаєві, окремі елементи якої відновили після війни. Істотно нижча ударна в'язкість обох сталей проти їх сучасних прототипів пов'язана не лише з принциповими змінами у технології металургійного процесу впродовж сторіччя, але і з деградацією металу за час тривалої експлуатації. Виявлено, що запас пластичності старовинної сталі і за результатами випроб на удар, і за фрактографічними особливостями руйнування нижчий, ніж ремонтної.

**Ключові слова:** вежа Шухова, сталь, ударна в'язкість, фрактографічний аналіз, механізм руйнування.

Конструкції типу гіперболоїдних веж інженера В. Г. Шухова – це пам'ятки оригінального інженерного вирішення завдання, спрямованого на мінімізацію металоємності висотних сіткових споруд. Сьогодні такі вежі в Україні, збудовані понад сто років тому, потребують технічного обстеження з визначенням переліку заходів для їх збереження як пам'яток промислової архітектури. Встановлені вразливі місця конструкції водонапірних веж унаслідок дії навколишнього корозивно-агресивного середовища, досліджені дефектність, хімічний склад та структура старовинних сталей, проаналізовано їх деякі механічні та корозійні характеристики (твердість та корозійна тривкість) [1–3]. Ця праця має на меті оцінити опір крихкому руйнуванню та особливості механізму руйнування за ударних випроб зразків старовинної та ремонтної сталей елементів водонапірної вежі у Миколаєві.

**Об'єкт досліджень, матеріали та методи.** Вивчали старовинну (вежу змонтовано в 1906 р.) та ремонтну (окремі її елементи відновлено в 1944 р.) сталі. Зразки для випроб на ударну в'язкість виготовляли з металу ненавантажених частин декількох опорних кутників (поблизу їх торців), прикріплених заклепками до нижнього обруча вежі з внутрішнього його боку.

Ударну в'язкість металу визначали на зразках Шарпі згідно з ГОСТ 9454-78. Зразки вирізали, орієнтуючи їх під різними кутами до напрямку вальцювання, а концентратор нарізали від внутрішньої поверхні полицки кутників, або з їх торця (рис. 1). Хімічний склад металу оцінювали на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Вміст елементів у металі розраховували як усереднене значення трьох замірів. Фрактографічні особливості руйнування зразків досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

**Результати та їх обговорення.** Кутники виготовляли з різного за хімічним складом металу (див. таблицю). Метал зі старовинного кутника позначено як 1, а з двох ремонтних – як 2 та 3. Старовинна сталь 1 найближча за хімічним складом

до сучасної сталі Ст5Гпс, ремонтна 2 – до сталі 30, а 3 – до сталі 35. В сталі 1 виявили значно вищий (ніж у сталі прототипу) вміст марганцю і сірки, що неминуче спричинить появу в ній значної кількості неметалевих включень [3]. Обидва варіанти ремонтної сталі практично відповідали за складом сучасним сталям, за винятком дещо завищеного вмісту сірки у металі 2 порівняно з регламентованим для сталі 30 [4].

Хімічний склад металу кутників, mass. %

Позначення металу	C	Mn	Si	Cu	S	P
1	0,34	1,49	0,03	0,008	0,012	0,052
2	0,34	0,64	0,27	0,104	0,066	0,038
3	0,40	0,62	0,23	0,108	0,030	0,028

Зразки для випроб на ударну в'язкість з металу 1 орієнтували під кутом 70° (тип II), з 2 – поперек (I), а з 3 – поперек (III) та вздовж (IV) напрямку вальцювання (рис. 1). Ударна в'язкість старовинного металу 1, визначена на практично поперечних зразках, виявилася вдвічі нижчою за отриману для ремонтної сталі 2 (0,15 і 0,3 MJ/m<sup>2</sup> відповідно; рис 2), але практично такою самою (0,15 і 0,16 MJ/m<sup>2</sup>), як і за випроб поперечних зразків зі сталі 3, однак, з іншим розташуванням концентратора (тип III). Зразки зі сталей 1 (тип II), 2 (I) і 3 (III) руйнувалися шляхом розшарування вздовж текстури металу (сталі 1 (II) і 2 (I) – поперек товщини полочки кутника, а 3 (III) – вздовж його довжини). Підтвердили, що енергозатрати на розшарування залежать від орієнтації площини руйнування до текстури металу. Якщо взяти до уваги відхилення на 20° орієнтації зразків зі старовинного металу від поперечної, то слід сподіватися на ще нижчі значення *KCV* за випроб повністю поперечних зразків з цього металу. Але у будь-якому випадку опір крихкому руйнуванню старовинного металу виявився найнижчим. Зокрема, за незмінності вмісту вуглецю в сталях 1 і 2 (0,34 mass.%), який суттєво впливає на ударну в'язкість металу, їх значення *KCV* відрізняються вдвічі.

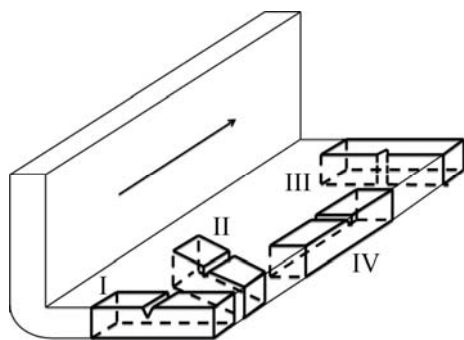


Рис. 1. Схема вирізання зразків, орієнтованих під кутом 90° (I, III); 70° (II) та 0° (IV) до напрямку вальцювання (вказано стрілкою) кутників.

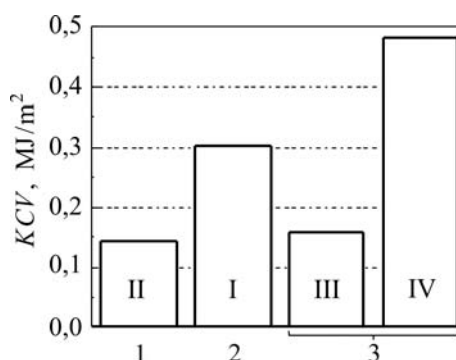
Fig. 1. The scheme of cutting the specimens oriented at angle 90° (I, III); 70° (II) and 0° (IV) to the rolling direction (indicated by arrow) of triangles.

Порівняли також ударну в'язкість ремонтної сталі 3 залежно від орієнтації зразків (типи III та IV). Значення *KCV* поперечних зразків (за руйнування, спричиненого розшаруванням металу вздовж напрямку вальцювання) втричі нижчі (0,16 і 0,48 MJ/m<sup>2</sup> відповідно), ніж за руйнування поздовжніх зразків (поперек текстури металу). Співвідношення між значеннями *KCV* сучасного сталевого металопрокату, визначене на поздовжніх і поперечних зразках, змінюється від 1,1 до 1,4 [5]. У нашому випадку воно досягло рівня 3, що вказує на особливо полегшену схильність металу руйнуватися вздовж волокон вальцювання. Тому для оцінювання стану сталевого прокату, виготовленого в першій половині 20-го сто-

річчя, можна рекомендувати зразки поперечної орієнтації типу III, як такі, що забезпечують найконсервативнішу оцінку опору крихкому руйнуванню.

Рис. 2. Ударна в'язкість  $KCV$  старовинної 1 та ремонтної 2, 3 сталей, визначена на зразках, орієнтованих поперек (I, II, III) та вздовж (IV) напрямку вальцювання.

Fig. 2. Impact toughness  $KCV$  of the ancient 1 and repair 2, 3 steels, determined on the specimens oriented across (I, II, III) and along (IV) the rolling direction.



**Фрактографічні особливості руйнування за ударних випроб.** Макрозлами зразків старовинної 1 та ремонтної 2 сталей, випробуваних ударом, плиткі і без губ витягування, що притаманно крихкому руйнуванню. В старовинній сталі руйнування розпочиналося за в'язким механізмом всередині перерізу зразків (по їх товщині) (рис. 3а) і крихко поширювалося навсібіч, полишаючи макрогребені, що віялом розходились від осередку зародження руйнування.

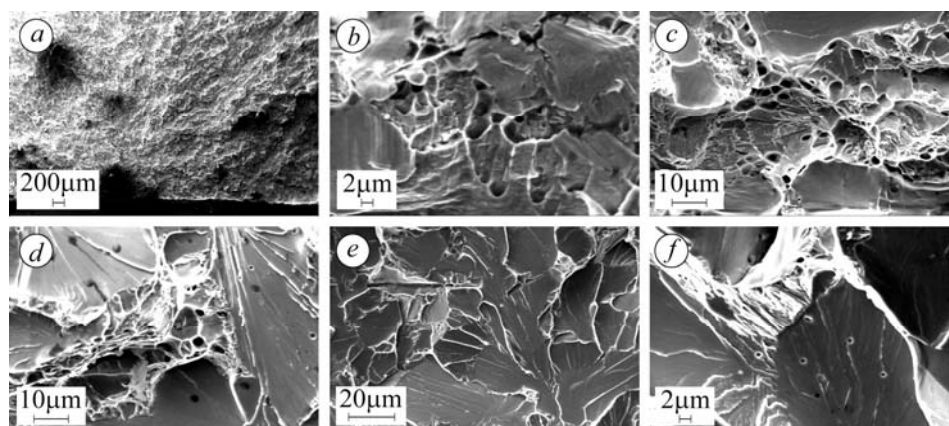


Рис. 3. Макро- (а) і мікрофрактограми (b-f) з різних ділянок поверхні руйнування зразка старовинної сталі після випроб на удар.

Fig. 3. Macro- (a) and microfractograms (b-f) from the different parts of fracture surface of specimen from the ancient steel after impact test.

За вищої роздільної здатності на початковому етапі руйнування рельєф старовинного металу формували зсувні процеси в околі концентратора напружень. Ознакою цього є витягнені у напрямі руйнування параболічні ямки (рис. 3b). З поширенням руйнування вглиб перерізу зразка в'язке руйнування шляхом утворення ямок відривного характеру, їх росту та руйнування перетинок між ними чергувалося з розшаруванням через зсув (рис. 3c). На дні ямок досить часто фіксували включення, які спричинили їх зародження. На завершальному етапі незначного (до 50  $\mu\text{m}$ ) в'язкого підростання з'являлися крихкі фасетки кризьзеренного відколу (рис. 3d), які досить швидко ставали переважальним елементом зламу (рис. 3e). Якщо кризьзеренний відкол з утворенням характерних річкових візерунків з гребенів відриву в межах окремих зерен є типовим механізмом руйнування в межах феритних зерен, то перлітні руйнуються розшаруванням уздовж меж поділу фериту і цементиту з формуванням характерного смугастого рельєфу

(рис. 3f). Особливістю руйнування старовинного металу є також невеликі округлі сліди на зламах від різного типу неметалевих включень (рис. 3d, f), за перетину фронту тріщини з якими гребінь річкового візерунку дещо відхилявся від прямолінійності, що є ознакою їх незначної стримувальної дії.

Особливістю зламу ремонтної сталі 2 була широка (глибиною до 0,5 mm), неперервна вздовж фронту тріщини початкова зона в'язкого руйнування з характерними ознаками розшарування вздовж меж структурних складників (рис. 4a), що передувала крихкому руйнуванню. Оскільки в ній доволі високий вміст сірки (до 0,067%), то зафіксовані витягнені поперек напрямку поширення руйнування поперечних зразків ямки вважали за сліди від сульфідів марганцю, які у вигляді переривчастих стрічок розташувалися вздовж напрямку вальцювання. Дослідження за вищої роздільної здатності підтвердили, що смугастість рельєфу зламу на початковому етапі руйнування справді пов'язана зі стрічковістю розташування неметалевих включень, втратою їх когезивного зв'язку з матрицею та формуванням розшарувань внаслідок зсуву, які ініційовані цими включеннями (рис. 4b). Адже їх залишки часто спостерігали на дні таких продовгуватих елементів рельєфу. На завершальному етапі переважно вже крихкого руйнування подібну смугастість виявляли лише у вигляді стрічок з неметалевих включень на фоні крихких фасеток крізьзеренного відколу.

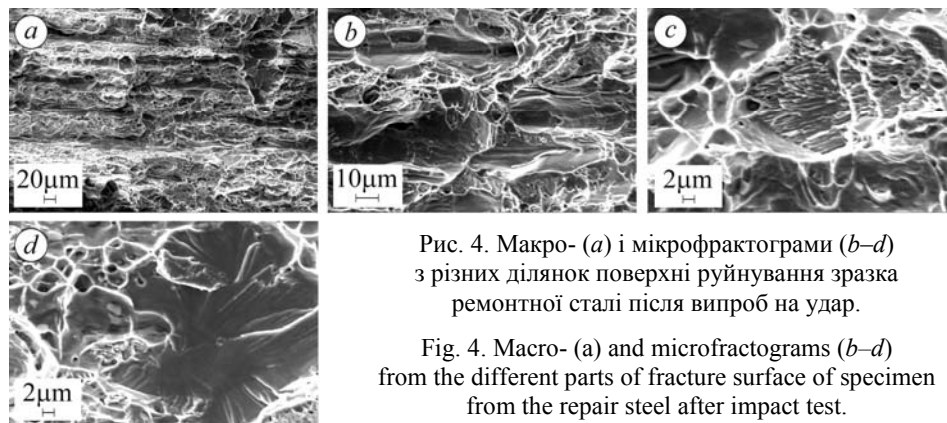


Рис. 4. Макро- (a) і мікрофрактограми (b–d) з різних ділянок поверхні руйнування зразка ремонтної сталі після випроб на удар.

Fig. 4. Macro- (a) and microfractograms (b–d) from the different parts of fracture surface of specimen from the repair steel after impact test.

Крім того, на зламі чітко ідентифікували зерна перліту через декогезію вздовж меж фериту і цементиту з формуванням рельєфу з пластинчастою будовою (рис. 4c). При цьому зерна перліту розташовувалися вздовж меж зерен фериту і часто мали неправильну продовгувату форму. Разом з тим зафіксували значно більшу, ніж у старовинному металі, кількість поліедричних за формою зерен перліту, що узгоджується з результатами металографічної експертизи структури обох сталей [3]. З поширенням руйнування на зламі з'являлися спочатку поодинокі фасетки крихкого крізьзеренного відколу (рис. 4d), які поступово ставали переважальним його елементом.

Попри домінування на завершальному етапі руйнування обох (старовинної та ремонтної) сталей крізьзеренного відколу, зауважили спільну для них особливість – чітко окреслені межі структурних складників (між цементитом та феритом) всередині перлітних зерен (рис. 3f і 4c). Це спричинено розтріскуванням уздовж міжфазних меж складників перліту з утворенням вторинних тріщин.

Як особливість виявили також істотно більшу кількість елементів в'язкого рельєфу шляхом зародження та росту порожнин на включеннях з пошкодженням перетинок між ними навіть на пізніх етапах руйнування ремонтної сталі. У вигляді витягнених у напрямку поширення руйнування смуг ці елементи часто виникали внаслідок злиття двох зміщених у просторі частин поверхні руйнування на різних

ділянках фронту тріщини. Загалом ремонтній сталі властива більша рельєфність зламу, що, безумовно, є ознакою вищої енергоємності руйнування і узгоджується з результатами механічних випроб.

На основі порівняльного фрактографічного аналізу механізмів руйнування старовинної та ремонтної сталей дійшли висновку, що запас пластичності першої істотно нижчий. Про це свідчать: значно менше підростання тріщини в старовинній сталі за в'язким механізмом формування мікропорожнин у зоні передруйнування з руйнуванням перетинок між ними внаслідок зсуву чи розтягу; нижча енергоємність її руйнування на етапі крихкого крізьзеренного відколу за практичної відсутності перепаду рельєфу між суміжними зернами чи локальними ділянками руйнування вздовж фронту тріщини. Отже, об'єднання цих фронтів відбувалося без суттєвої пластичної деформації перетинок між ними, а на поверхні зламу не виникали гребені з ямковим в'язким руйнуванням, які властиві ремонтній сталі.

**Обговорення результатів.** Дослідженим сталям фасонного прокату притаманний особливо низький опір крихкому руйнуванню, який зазвичай отримують після гартування та низького відпуску, тобто у високоміцному низькопластичному стані. Серед можливих причин такого стану металу слід виділити дві найвірогідніші. Перша полягає у різній якості металу, виготовленого в різні часові періоди: ~110 і 70 років тому та на сучасному етапі. З розвитком технології металургійного процесу якість фасонного прокату підвищувалася, в тому числі і внаслідок зниження в сталях вмісту шкідливих домішок та неметалевих включень. Через це зменшувалась імовірність розшарування вздовж меж витягнутих у напрямі вальцювання неметалевих включень, а отже, підвищувалась опірність сталей руйнуванню. Водночас вже в першій половині 20-го сторіччя значну увагу приділяли опорі крихкому руйнуванню конструкційних матеріалів. Тому важко уявити, що промислово випускали металопродукт з такою низькою ударною в'язкістю. Очевидно, що слід врахувати іншу причину, зокрема, втрату металом механічних властивостей упродовж тривалої експлуатації (починаючи з часу монтажу чи реконструкції вежі), тобто його деградацію порівняно з вихідним станом.

Підставою для такого припущення слугують численні сучасні порівняльні дослідження фізико-механічних властивостей сталей у вихідному стані та після тривалої (до 50 років) експлуатації в різних конструкціях та технологічних процесах, зокрема в теплоенергетиці [6, 7], нафтопереробній промисловості [8] та транспорті [9], в підйомно-транспортних механізмах [10, 11], на нафто- та газопроводах [12] тощо. Вони чітко вказують на істотну експлуатаційну деградацію металу, в першу чергу, за опором крихкому руйнуванню.

Виділимо деякі особливості в оцінках стану металу вежі, які вважають [6–12] проявом саме експлуатаційної деградації сталей тривалої експлуатації. В першу чергу це нетипове поєднання, з одного боку, низької міцності та твердості [3], а з іншого – невисокої ударної в'язкості, що пояснюють розвитком в об'ємі металу розсіяної пошкодженості. Проте мікрофрактографічним аналізом виявлені численні декогезивні мікроруйнування, причому не лише вздовж меж матриці з неметалевими включеннями, але і вздовж міжфазних меж фериту і цементиту в перлітних зернах. Ці фрактографічні особливості могли виникнути внаслідок розвитку впродовж експлуатації розсіяної пошкодженості. Тому можна очікувати не просто крихкого крізьзеренного руйнування експлуатованого металу, а декокування мікроскладників перліту в межах перлітних зерен, спровоковане такою пошкодженістю, що підтвердила фрактографія (див. рис. 3f і 4c).

У дослідженнях експлуатаційної деградації конструкційних сталей тривалої експлуатації, коли розглядають розсіану пошкодженість в об'ємі металу, особливу роль відводять водню. Адже його концентрація, що досягається на міжфазних

межах, вища, ніж на межах зерен [13]. Виявлене в нашому випадку розшарування вздовж міжфазних меж є типовим фрактографічним проявом водневого впливу на низькопластичні сталі [14, 15]. Тому можна припустити, що кліматичні умови експлуатації веж Шухова спричиняють не лише атмосферну корозію (як чинник корозійних уражень на поверхні кутників), але і уможливають наводнювання металу [3, 16]. Виходячи з цих позицій, найімовірніше, метал вежі деградував також під дією наводнювання, що й спричинило його особливо низький опір крихкому руйнуванню.

### ВИСНОВКИ

Виявлено особливо низькі значення ударної в'язкості *KCV* старовинної та ремонтної сталей (0,15 і 0,3 МДж/м<sup>2</sup> відповідно) вежі Шухова у Миколаєві. Порівняльним фрактографічним аналізом зламів зразків, отриманих за випроб на удар, встановлено, що запас їх пластичності істотно вичерпаний. Проте це більше стосується старовинної сталі, в якій в'язкий механізм руйнування на стартовому етапі в околі концентратора напружень поширюється максимум на глибину 50 мкм, тоді як в ремонтній – на 0,5 мм.

Низький рівень опору крихкому руйнуванню металу кутників вежі, виготовлених в різні часові періоди (~110 і 70 років тому), не можна пояснити тільки недостатньою якістю тогочасного металопрокату, яка не відповідає сучасним вимогам. Фрактографічно зафіксовано, що технічний стан металу міг погіршитися під час тривалої експлуатації внаслідок розвитку розсіяної пошкодженості, що знизила когезивну міцність міжфазних меж. Наводнювання металу може додатково сприяти цьому.

*РЕЗЮМЕ.* Исследована ударная вязкость и фрактографические особенности изломов старинной и ремонтной сталей (1906 и 1944 гг. производства соответственно) гиперболоидной сетчатой водонапорной башни Шухова в Николаеве, отдельные элементы которой заменены после войны. Существенное снижение ударной вязкости обеих сталей по сравнению с их современными прототипами связали не только с принципиальными изменениями технологии металлургического процесса в течение столетия, но и с деградацией металла вследствие длительной эксплуатации. Показано, что запас пластичности старинной стали как за результатами ударных испытаний, так и за фрактографическими особенностями разрушения ниже, чем ремонтной.

*SUMMARY.* The impact toughness of the ancient and repair steels from the Shukhov's hyperboloid lattice water tower in Mykolayiv (of 1906 and 1944 production respectively), some elements of which were replaced after the war, was investigated. The fractographical peculiarities of fracture surfaces were investigated. A significant reduction in impact toughness values of both steels compared to their modern prototypes is related not only with the principal changes in metallurgy process in the 20<sup>th</sup> century but also with the degradation of metal during long-term operation. The plasticity margin of the ancient steel was shown to be lower than of the repair one by the results of impact test data and fractography features of fracture.

1. Kutnyi A. and Becker K. Raffinierter noch als der Eiffelturm // Deutsches Ingenieur Blatt. – 2011. – 12. – S. 38–39.
2. Діагностування стану експлуатованих понад 100 років сіткових гіперboloїдних веж В. Г. Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, Т. Д. Кремінь, О. Т. Цирульник // Машинознавство. – 2013. – № 1–2. – С. 15–19.
3. Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперboloїдних сіткових веж Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, О. З. Студент та ін. / 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 et al. // Materials Science. – 2014. – 49, № 6. – P. 787–795.)

4. *ГОСТ 1050-88*. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 30 с.
5. *Исследование хладноломкости сталей 09Г2С и ВСтЗсп* / К. И. Еремин, В. Д. Науменко, Б. А. Шашко и др. / *Металловедение и терм. обработка*. – 1990. – №2. – 82–83.
6. *Ткачук Ю. М., Студент О. З.* Оцінювання деградації лопаткової сталі 20Х13 після експлуатації в паровій турбіні за тріщиностійкістю // *Машинознавство*. – 2011. – №1–2. – С. 37–43.
7. *Студент О. З., Свірська Л. М., Дзіоба І. Р.* Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 2. – С. 111–118.  
(*Student O. Z., Svirs'ka L. M., and Dzioba I. R.* Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics // *Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 239–246.)
8. *Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr–Mo* / Л. О. Бабій, О. З. Студент, А. Загурський, А. Д. Марков // Там же. – 2007. – **43**, № 5. – С. 91–96.  
(*Babii L. O., Student O. Z., Zagorski A., and Markov A. D.* Creep of degraded 2.25 Cr–Mo steel in hydrogen // *Materials Science*. – 2007. – **43**, № 5. – P. 701–707.)
9. *Остап О. П., Андрейко І. М., Головатюк Ю. В.* Деградація матеріалів і втомна довговічність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Там же. – 2006. – **42**, № 4. – С. 5–17.  
(*Ostas O. P., Andreiko I. M., and Holovatyuk Yu. V.* Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation // *Materials Science*. – 2006. – **42**, № 4. – P. 427–429.)
10. *Харченко Є. В., Полищук Л. К., Звірко О. І.* Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника // Там же. – 2013. – **49**, № 4. – С. 77–83.  
(*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.)
11. *Пустовой В. М., Рещенко І. О.* Моделювання експлуатаційної деградації сталей вантажних морських портових конструкцій // Там же. – 2012. – **48**, № 5. – С. 7–15.  
(*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.)
12. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М.* Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. у 3-х т. / Під ред. В. В. Панасюка. Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 458 с. Т. 2: Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – 2011. – 448 с. Т. 3: Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. – 2012. – 432 с.
13. *Шаповалов В.И.* Легирование водородом. – Днепропетровск: Журфолд, 2013. – 385 с.
14. *Hredil M. I., Student O. Z.* Effect of hydrogenating environment on crack growth and fractography peculiarities of the RPV steel // *Proc. of 19<sup>th</sup> Eur. Conf. on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, ECF-19*. – Kazan, Russia, 26–31 August, 2012. – Paper 159. CD-ROM (ISBN 978-5-905576-18-8).
15. *Effect of hydrogenation on fracture mode of a reactor pressure vessel steel* / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyrlunyk, and O. Z. Student // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – **45**, № 5. – С. 5–16.  
(*Effect of hydrogenation on the fracture mode of a reactor pressure-vessel steel* / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyrlunyk, and O. Z. Student // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 5. – P. 613–625.)
16. *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.

Одержано 07.04.2014