

Аналіз ознак деградації тривало експлуатованих елементів вежі Шухова**Г. М. Никифорчин^а, Г. В. Кречковська^а, А. І. Кутний^б, О. З. Студент^{а,1}**^а Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна^б Технічний університет Мюнхена, Мюнхен, Німеччина¹ student@ipm.lviv.ua

Проаналізовано технічний стан старовинної та ремонтної сталей елементів вежі Шухова, експлуатованих відповідно ~110 і 70 років. Для їх оцінки використовували ряд механічних характеристик (твердість, міцність, пластичність, ударна в'язкість). Показано, що для обох сталей властиві наднизькі значення твердості та опору крихкому руйнуванню, що не можна пояснити лише якістю тогочасного металопрокату. При цьому механічні характеристики старішої сталі нижчі, ніж ремонтної. Припустили, що під час експлуатації відбувається деградація механічних характеристик сталей внаслідок розвитку розсіяної пошкодженості. На це вказує також максимальне відносне подовження старовинної сталі за більш низьких значень твердості та ударної в'язкості. Виявлено, що характеристики міцності та пластичності обох сталей, визначені в середовищі синтетичного кислотного дощу, нижчі, ніж на повітрі. Фрактографічно підтверджено наявність експлуатаційних пошкоджень в об'ємі металу, які за можливості наводнювання зразків із дослідного середовища ініціюють крихке руйнування в центральній частині їх перерізу.

Ключові слова: вежа Шухова, експлуатаційна деградація, фрактографічний аналіз пошкодженості, механічні характеристики, синтетичний кислотний дощ.

Вступ. Збереження старовинних об'єктів, зокрема металевих конструкцій, як інженерних пам'яток передбачає діагностування технічного стану конструктивних елементів щодо наявності в них дефектів та оцінку властивостей металу, які деградують при експлуатації і все в меншій мірі забезпечують їх конструктивну міцність. Із цією метою досліджують фізико-механічні властивості, зокрема, сталей старовинних мостів і шляхопроводів, збудованих у XVIII–XIX ст. [1–3], на основі чого прогнозують їх залишковий ресурс.

У 1899 р. інженер В. Шухов запатентував принцип побудови гіперболоїдних сіткових конструкцій на основі однопорожнинного гіперболоїда (двічі лінійної поверхні, через будь-яку точку якої можна провести дві прямі, що перетинаються і повністю належать їй). Встановлення вздовж цих прямих балок, що формують сіткову поверхню, забезпечує збереження форми конструкції за дії зовнішніх сил (навіть, якщо балки з'єднані між собою шарнірами). Причому за сумірної висоти та несівної здатності металомісткості такої конструкції в три рази менша, ніж традиційних старовинних конструкцій (наприклад, Ейфелева вежа). Цей принцип донині використовують для зведення сучасних висотних споруд і конструкцій, зокрема Kobe Port Tower в Японії, телевежі в Австралії, Jested в Чехії, Гуанчжоу в Китаї, торговельно-розважальний центр Хан Шатир у Казахстані, Aspire Tower у Катарі тощо. Зі збудованих веж Шухова в Україні до нашого часу збереглися два діючих маяки в Дніпровському лимані (Аджигольські) та кілька водонапірних башт у Миколаєві, Черкасах, Білій Церкві, Конотопі та Помошні, які вже не використовують для водопостачання, але їх важливо зберегти як пам'ятки індустріальної архітектури [4, 5].

Під час монтажу веж кутники з маловуглецевої сталі з'єднували між собою заклепками. Внаслідок тривалої експлуатації на кутниках, особливо в місцях їх з'єднань, з'явилися різні за інтенсивністю корозійні пошкодження [6]. При ремонті

веж у повоєнний час для заміни критично пошкоджених елементів використовували існуючі на той час сталі (далі – ремонтні), а для з'єднання елементів – технологію зварювання. Це зумовило появу додаткового чинника впливу на міцність конструкції, пов'язаного з наявністю зварних з'єднань.

Разом із тим дослідження технічного стану конструкційних сталей для відповідальних об'єктів, що тривало експлуатувалися (зокрема, в енергетиці [7–11], авіації [12], хімічній [13], нафто- і газовидобувній галузях та в системах транспортування маркетингових вуглеводнів [14–18]), свідчать про істотну деградацію властивостей металу внаслідок впливу різних експлуатаційних чинників. Відповідно ця проблема може стосуватися і сталевих веж Шухова.

З урахуванням важливості збереження веж Шухова як інженерних пам'яток мета роботи полягала в оцінюванні технічного стану старовинних і ремонтних сталей елементів водонапірної башти у Николаєві, побудованої у 1906 р.

Матеріали і методи досліджень. Досліджували старовинну сталь (кутник розміром 120×120×10 мм) та ремонтну, використану під час реконструкції вежі в 1944 р. (150×150×10 мм). Кутники з'єднані між собою горизонтально розташованими кільцеподібними ободами зі сталевих смуг або кутників.

Хімічний склад металу оцінювали на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Для оцінювання стану деградованого металу використовували значення твердості HB (як усереднене 50 замірів переносним універсальним твердоміром NOVOTEST), дані випробувань на ударну в'язкість зразків Шарпі (згідно з ГОСТ 9454-78) та на розтяг на машині УМЕ-10Т гладких призматичних зразків із робочим перерізом 4×5 мм для визначення характеристик міцності і пластичності. Зразки по-різному орієнтували стосовно напрямку вальцювання, а концентратор на них нарізали з боку внутрішньої поверхні полицки кутників, що була більше корозійно пошкоджена, або з їх торця (рис. 1,а). Випробування зразків на розтяг проводили на повітрі та в середовищі синтетичного кислотного дощу за швидкості деформації $3 \cdot 10^{-3}$ та $1,7 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ відповідно. Склад кислотного дощу вибирали на основі даних аналізу атмосферних опадів у промислових регіонах України: H_2SO_4 (3,19); Na_2SO_4 (3,2); HNO_3 (1,58); NaNO_3 (2,12); NaCl (8,48 г/л), рН 4,4, рівень мінералізації – 0,3%.

Фрактографічні дослідження проводили на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

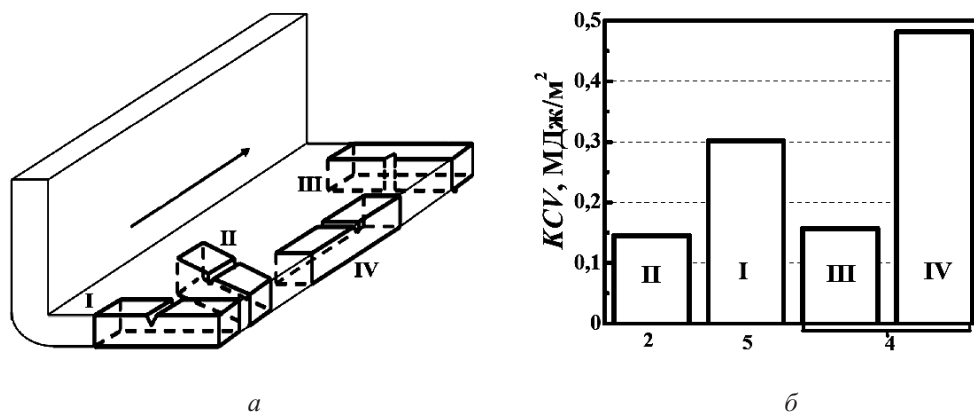


Рис. 1. Схема вирізання зразків з елементів вежі, орієнтованих під кутом 90 (I, III), 70° (II) і 0 (IV) стосовно вказаного стрілкою напрямку їх вальцювання (а), та ударна в'язкість KCV старовинної (№ 2) і ремонтної (№ 4, 5) сталей, визначена на зразках, орієнтованих вздовж (I, II, III) і поперек (IV) напрямку вальцювання (б).

Результати та їх обговорення. Старовинна (в табл. 1 № 1–3) і ремонтна (№ 4, 5) сталі відрізнялися за хімічним складом, в основному за вмістом вуглецю. Причому його вміст в першій сталі коливався від кутника до кутника сильніше, ніж у другій. Загалом їх склад відповідає сучасним низько- і середньовуглецевим сталям [19].

Т а б л и ц я 1

Хімічний склад (мас. %) і твердість НВ сталей елементів вежі Шухова

№ зразка сталі	C	Mn	Si	Cu	S	P	НВ
1	0,28	0,48	0,006	0,013	0,043	0,019	83
2	0,34	1,49	0,030	0,008	0,012	0,052	79
3	0,16	0,40	0,005	0,015	0,062	0,057	71
4	0,40	0,62	0,230	0,108	0,030	0,028	117
5	0,34	0,64	0,270	0,104	0,066	0,038	118

Твердість ремонтної сталі теж стабільніша і коливалася від 112 до 123 НВ, а її середнє значення становили 117 і 118 НВ. Твердість старовинної сталі була істотно нижчою і змінювалася від 64 до 92 НВ, а її середнє значення – від 71 на кутнику 3 до 83 НВ на кутнику 1. Це в першу чергу зумовлено нижчим вмістом вуглецю. Але це могло бути спричинено і розсіяною пошкодженістю, сформованою під час 100-річної деградації металу, що також знижує твердість [20, 21].

Результати випробувань на удар. Попри однаковий вміст вуглецю в зразках № 2 і № 5 ударна в'язкість *KCV* першого, визначена практично на поперечних зразках II (орієнтовані під кутом 70° до напрямку вальцювання – рис. 1,а), вдвічі нижча, ніж зразка № 5 (0,15 і 0,3 МДж/м² відповідно – рис. 1,б). З урахуванням нахилу зразків № 2 до напрямку вальцювання слід сподіватися на ще нижчі значення *KCV* при випробуваннях чисто поперечних зразків. Отже, опір крихкому руйнуванню старовинної сталі може стати навіть ще нижчим, ніж ремонтної. Окрім того, значення *KCV* зразка № 2 практично таке ж (0,15 і 0,16 МДж/м²), як і № 4, орієнтованого поперек (III) напрямку вальцювання (рис. 1,а). Для всіх сталей зразки руйнувалися в площині, перпендикулярній до внутрішньої полиці кутників, але зразки № 2 і 5 – поперек її товщини, а № 4 (III) – у напрямку вальцювання.

На прикладі ремонтної сталі підтверджено, що енерговитрати на руйнування вздовж напрямку вальцювання менші (III, 0,16 МДж/м²), ніж поперек (IV, 0,48 МДж/м², рис. 2,б). Співвідношення ударної в'язкості *KCV*, отриманої на зразках із сучасного металопрокату, орієнтованих вздовж і поперек напрямку вальцювання, змінюється від 1,1 до 1,4 [22]. Після 60 років експлуатації це співвідношення зросло у три рази, що свідчить про збільшення схильності експлуатованого металу до розшарування вздовж напрямку вальцювання. Звідси для оцінювання стану експлуатованого сталевого прокату рекомендовано використовувати зразки, поперечної орієнтації типу III, як такі, що забезпечують найконсервативнішу оцінку опору крихкому руйнуванню.

Фрактографічний аналіз руйнування зразків Шарні. Загалом макрозломи зразків сталей № 2 і № 5 неглибокі і без губ витягування. Це макроознаки крихкого руйнування, яке розпочинається в центральній (по товщині) частині зразка і віялоподібно поширюється від місця зародження, формуючи на зломах макрогребені відриву.

За вищої роздільної здатності руйнування сталі № 2 на стартовому етапі від вершини концентратора напружень відбувалося за механізмом зсуву. Про це свідчать витягнені у напрямку руйнування параболічні ямки (рис. 2,а). Подальший ріст відбувався за в'язким механізмом шляхом утворення доволі неглибоких ямок, їх росту та руйнування перетинок між ними внаслідок відриву, іноді перемежованих ямками

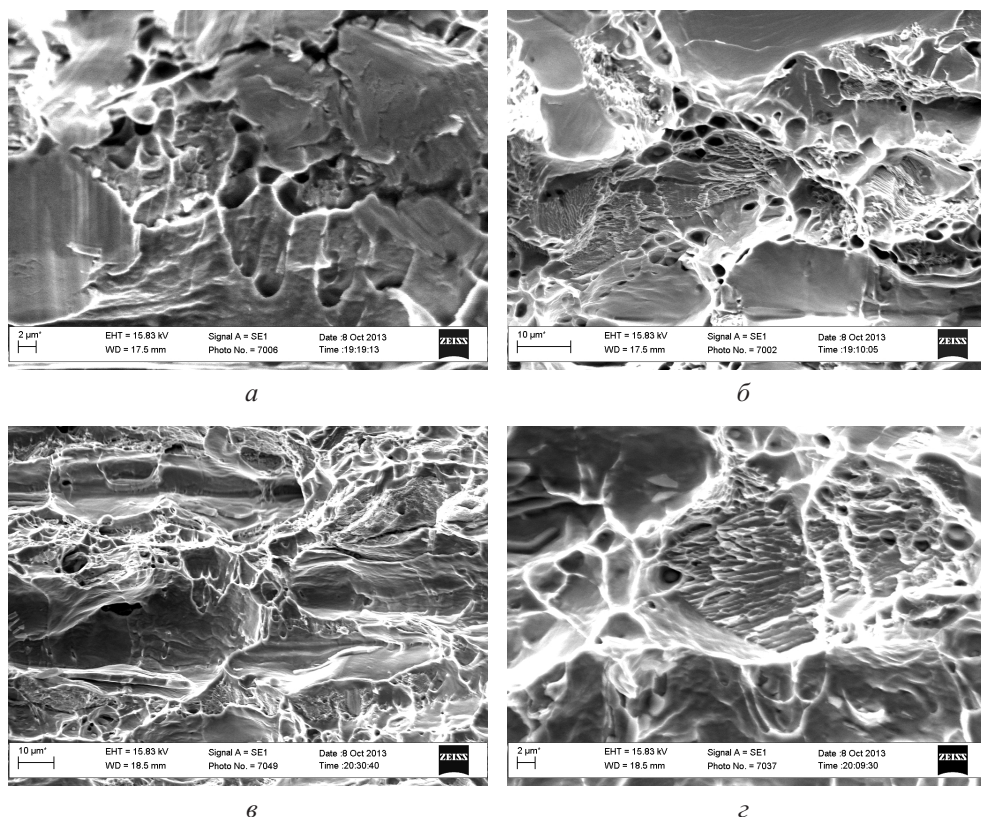


Рис. 2. Мікрофрактограми зони в'язкого підростання тріщин від концентратора напружень на поверхнях руйнування ударних зразків старовинної (а, б) та ремонтної (в, з) сталей.

зсуву (рис. 2,б). В'язке руйнування на глибину до 50 мкм завершилося домінуванням на зломі крихких фасеток міжзеренного відколу з характерними гребенями відриву у вигляді річкових візерунків. Міжзеренний відкол переважав у межах феритних зерен, тоді як у перлітних зернах пластини цементиту відокремлювалися від фериту з утворенням характерного структурно зумовленого смугастого рельєфу (рис. 2,б). Окрім того, особливістю руйнування старовинної сталі є сліди від неметалевих включень на зломах. Самі включення, як правило, відсутні, що є доказом їх слабкої когезії з матрицею внаслідок експлуатації.

Особливістю руйнування сталі № 5 була набагато ширша (до 0,5 мм) безперервна вздовж фронту тріщини зона в'язкого рельєфу. Характерні смужки відшарувань вздовж меж неметалевих включень із матрицею пов'язували з їх низькою когезією (рис. 2,в). Їхні залишки іноді спостерігали на дні таких продовгуватих елементів рельєфу. Порівняно з старовинною сталлю для ремонтної характерна більша кількість і рельєфність, але менші за розмірами ямки відриву, утворені внаслідок витягування перетинок між паралельними рядами ямок навколо неметалевих включень. Окрім того, на зломі чітко видно перлітні зерна з пластинчастою будовою з розшаруваннями вздовж меж пластин цементиту і фериту (рис. 2,з). Необхідно відзначити також більшу кількість поліедричних зерен перліту, що узгоджується з результатами металографічної експертизи структури обох сталей [23]. По мірі поширення руйнування на зломах переважають фасетки крихкого міжзеренного відколу. Спільним для обох сталей є вторинне розтріскування вздовж меж структурних складових (пластини цементиту та фериту) у перлітних зернах навіть на етапі відкольного руйнування.

Отже, фрактографічно підтверджено, що старовинна сталь порівняно з ремонтною має значно нижчий запас пластичності. Про це свідчать менша протяжність зони в'язкого руйнування, менша рельєфність ямок відриву та менша кількість включень на дні ямок через порушення їх зв'язку з матрицею.

Механічні властивості при випробуваннях на розтяг. Характеристики міцності ($\sigma_{0,2}$ та σ_B) сталі № 4 і 5 значно вищі, ніж сталі № 1–3, що пов'язували з різним вмістом вуглецю в них. Нижча міцність сталі № 1–3 узгоджується з її вищими характеристиками пластичності. Як і очікували, характеристики, визначені на поздовжніх зразках сталі № 4, виявилися вищими, ніж на поперечних № 5 (табл. 2), адже енергоємність руйнування кутників поперек напрямку вальцювання вища, ніж вздовж.

Т а б л и ц я 2

Механічні характеристики сталей елементів вежі при розтязі

№ зразка сталі	Орієнтація зразків у напрямку вальцювання	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Вміст вуглецю, мас. %
1	Поперечна	482	310	26,3	45,8	0,28
2	Під кутом 70°	383	220	30	47,6	0,34
3	Поздовжня	420	227	25,6	66	0,16
4	Поздовжня	651	416	23	48,4	0,40
5	Поперечна	637	424	22,4	41,7	0,34

Старовинні сталі з різних елементів вежі істотно відрізнялися за вмістом вуглецю, що спричинило значний розкид даних при визначенні їх характеристик. Разом із тим у цих сталях відмічали протилежну тенденцію зміни характеристик міцності в залежності від орієнтації зразків. Зокрема, найвище значення міцності має сталь № 1 із чітко поперечною орієнтацією зразків. На поздовжніх зразках сталі № 3 вона значно нижча (можливо, у зв'язку з істотно нижчим вмістом вуглецю). Однак у сталі № 2 з навіть дещо вищим вмістом вуглецю, ніж у сталі № 1, і при відхиленні зразків від поперечної орієнтації всього на 20° теж зафіксували відчутне зниження характеристик міцності. Таким чином, тривало експлуатованій старовинній сталі властива протилежна відомій тенденція зміни характеристик міцності в залежності від орієнтації зразків. Що ж стосується характеристик пластичності сталі № 1 із поперечною і сталі № 3 з поздовжньою орієнтацією зразків, то за практично однакових δ значення ψ сталі № 3 було більшим (через найнижчий вміст вуглецю). Попри найвищий вміст вуглецю в сталі № 2 (із майже поперечною орієнтацією зразків) її характеристики міцності найнижчі, а пластичності найвищі (за винятком ψ , яке в сталі № 3 було найвищим через низький вміст вуглецю).

Під час тривалої експлуатації елементи вежі зазнавали атмосферного впливу (рис. 3). Внаслідок цього на їх поверхні виникли корозійні виразки та розшарування металу в напрямку вальцювання (особливо на стику двох елементів, з'єднаних заклепками, де корозійні процеси досить активні через застій середовища) [5]. Окрім того, в старовинній сталі виявили велику кількість неметалевих включень, які створюють електрохімічну гетерогенність на мікроструктурному рівні [23]. Вони виконують роль ефективних катодів за електрохімічної взаємодії металу з водним середовищем. Локалізація катодного процесу на неметалевих включеннях з утворенням водню як одного з продуктів реакції сприяє наводнюванню матриці в околі включень [24]. З одного боку, водень суттєво знижує опір корозії сталі [25], з іншого – абсорбова-

ний металом водень може дифундувати до неметалевих включень, сприяти їх декогезії від матриці та молізуватися в порах вздовж меж їх розділу, створюючи в них тиск. Локальні напруження, зумовлені тиском водню в таких порожнинах, та концентрація напружень в околі неметалевих включень, особливо лінзоподібної форми, можуть навіть призвести до розтріскування сталі за механізмом водневої крихкості, адже після понад столітньої експлуатації її опір крихкому руйнуванню суттєво знизився.

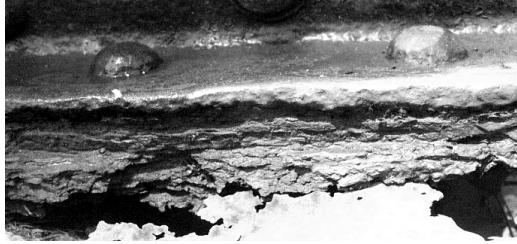


Рис. 3. Типові корозійні пошкодження елемента вежі Шухова внаслідок атмосферного впливу.

Із урахуванням того, що електрохімічна гетерогенність на мікроструктурному рівні в елементах вежі сприяє їх наводнюванню, порівнювали механічні характеристики при розтязі поперечних зразків старовинної та ремонтної сталей за впливу синтетичного кислотного дощу (рис. 4). Таким чином моделювали наслідки атмосферного впливу на напружений стан металу елементів вежі. Аналіз отриманих даних показав, що за впливу середовища характеристики міцності та пластичності обох сталей стають нижчими, ніж на повітрі. Раніше [26, 27] відмічався негативний вплив наводнювання на механічні характеристики теплотривких сталей після їх експлуатаційної деградації, тобто за високої температури. Для підвищення чутливості стандартних механічних характеристик до деградації сталей рекомендувалося наводнювати зразки в корозійному середовищі перед випробуваннями на розтяг на повітрі.

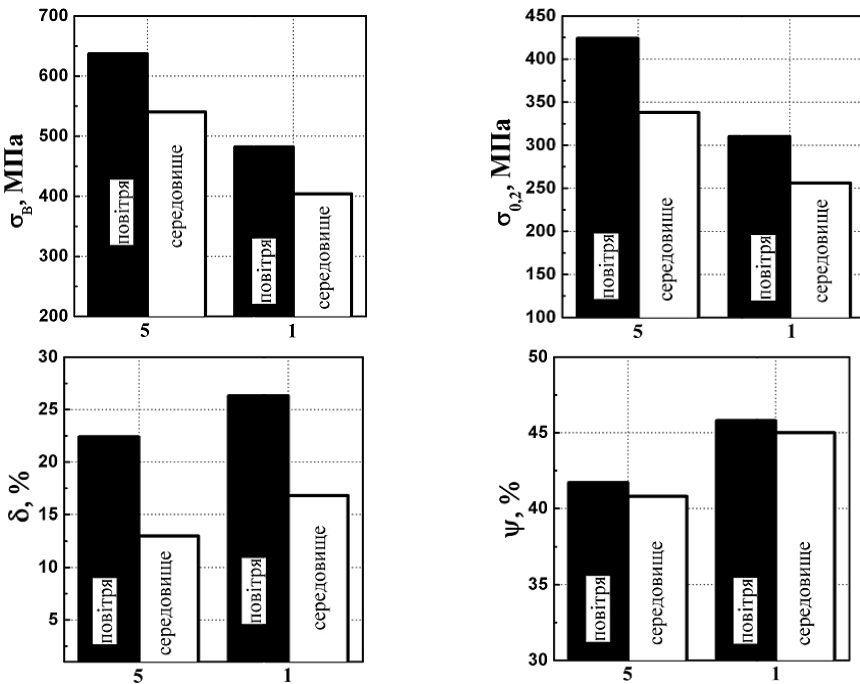
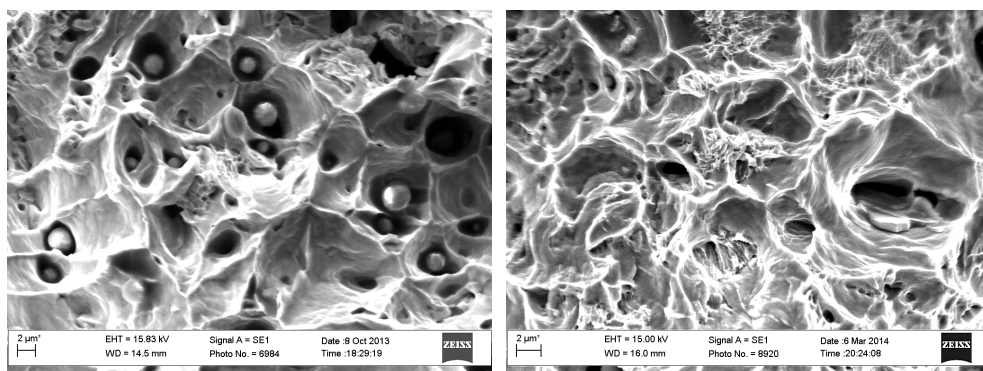


Рис. 4. Механічні характеристики після випробувань на розтяг поперечних зразків на повітрі та в корозійному середовищі сталей № 1 і 5.

Відзначалося також, що як на повітрі, так і в середовищі всі механічні характеристики старовинної сталі нижчі, ніж ремонтної. Це може бути наслідком не тільки досконалішої технології виготовлення ремонтної сталі із забезпеченням їй кращих характеристик, а й сильнішої деградації старовинної сталі впродовж тривалішого терміну експлуатації. А нетиповий (протилежний) ефект зміни характеристик пластичності тривало експлуатованого металу, особливо за наводнювання, відзначався неодноразово, зокрема, для металу зварного шва [20] та основного металу [26] головних парогонів ТЕС, сталей газо- та нафтогонів [28]. Його пов'язували зі зростанням макровидовження зразків внаслідок розкриття розпорошених в їх перерізі пошкоджень, які розкриваються вже на етапі рівномірного подовження. Оскільки за впливу будь-яких інших чинників обидві характеристики пластичності змінюються якісно подібно, протилежну тенденцію їх зміни пов'язували із сильнішою деградацією старовинного металу.

Фрактографічний аналіз руйнування сталей за випробувань на розтяг. Макрозлами зразків старовинного металу за випробувань на повітрі мали характерний вигляд чашки. Конусна частина зломів поздовжніх зразків була ширшою, ніж поперечних. На макрозломах ремонтного металу незалежно від орієнтації зразків, випробуваних на повітрі, конусна частина практично відсутня, а на поперечному зразку проявилася ще й текстура. Фрактографічний аналіз руйнування як ремонтної, так і старовинної сталей у середовищі синтетичного кислотного дощу проводили при випробуваннях поперечних зразків. Їх макрозломи були практично нормально орієнтовані без очевидних конусних частин.

За вищої роздільної здатності в центральній частині всіх зломів зразків обох сталей на повітрі, де зазвичай розпочинається руйнування гладких зразків, переважає типове в'язке руйнування внаслідок зародження і росту мікропорожнин із деформуванням перетинок між ними аж до їх руйнування та формування ямкового рельєфу злому (рис. 5). Окрім того, порожнини в старовинній сталі зароджувалися на неметалевих включеннях діаметром 3...4 мкм (рис. 5,а), а в ремонтній – діаметром 0,3...1,5 мкм (рис. 5,б). Це зумовило значно більші за розмірами ямки на зломах старовинної сталі. Після випробувань на повітрі поздовжніх зразків обох сталей неметалеві включення залишалися в ямках, утворених під час деформування навколо них.



а

б

Рис. 5. Мікрофрактограми центральної частини зломів поздовжніх зразків № 3 (а) і поперечних № 4 (б) сталей після випробувань на розтяг на повітрі.

У межах перлітних зерен руйнування обох сталей, як і за випробувань на удар, відбувалося вздовж меж розділу феритних і перлітних зерен з утворенням характерного смугастого або дрібноямкового рельєфу, спричиненого пластинами цемент-

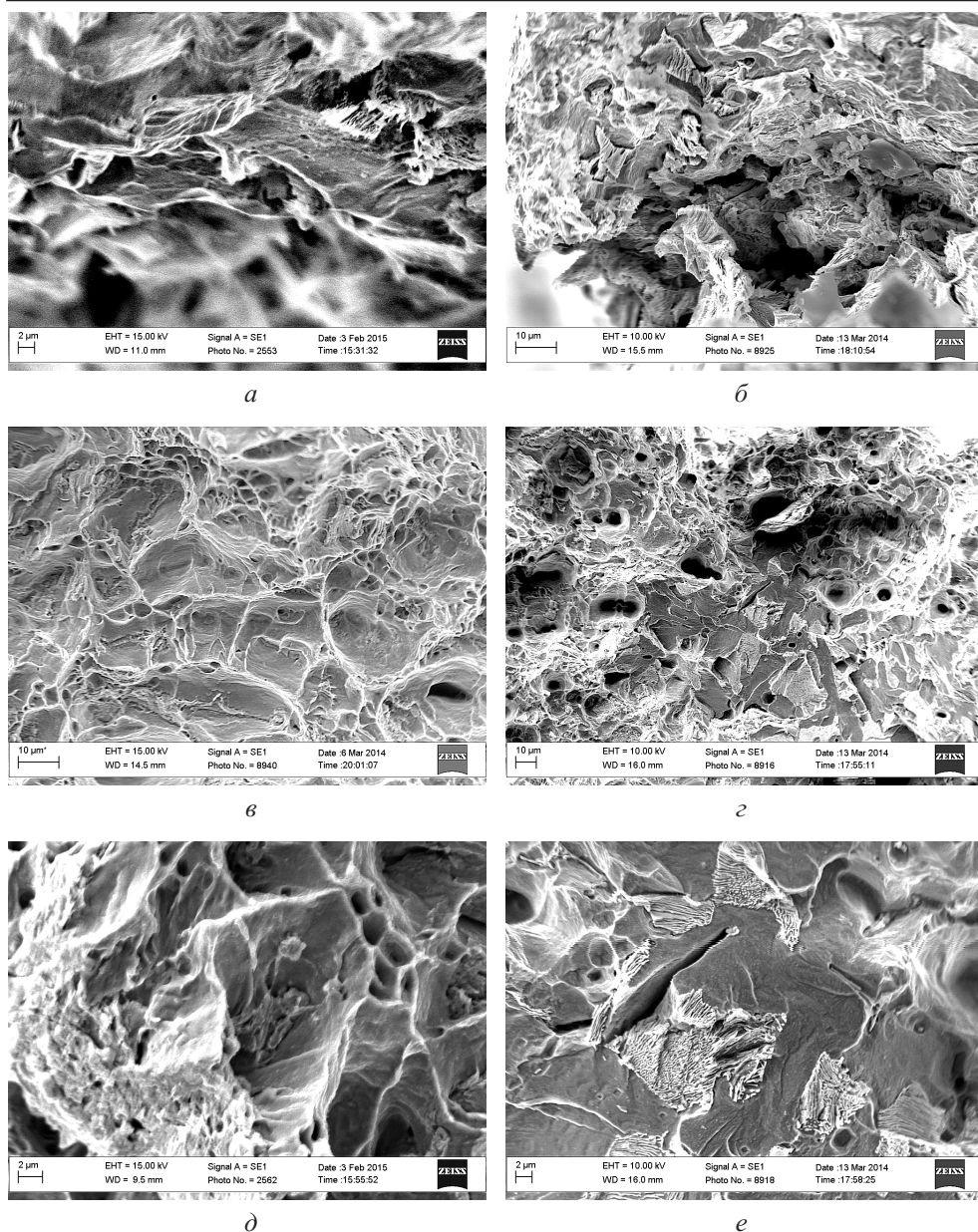


Рис. 6. Мікрофрактограми зломів поперечних зразків № 1 (а, в, д) і № 5 (б, г, е) сталей після їх повільного розтягу в середовищі синтетичного кислотного дощу в околі підповерхневих пошкоджень (а, б) та в центральній частині зломів (в-е).

титу і фериту. Макротекстурування рельєфу поперечних зразків зумовлено смугами продовгуватих ямок навколо неметалевих включень, орієнтованих у напрямку вальцювання. В околі бічних поверхонь усіх зразків, що випробовувались на повітрі, зафіксували рельєф із параболічних ямок, який є типовим для конусної частини зломів гладких зразків і свідчить про завершальний етап їх руйнування за механізмом зсуву.

Після випробувань у середовищі тріщин в старовинні і ремонтні сталі зароджувались не лише в центрі перерізу зразків, як це відбувалося на повітрі, а й в декількох місцях на їх бічних поверхнях із подальшим розповсюдженням по пери-

метру (рис. 6,а, б). Руйнування розпочиналося вздовж меж розділу фериту і перліту в місцях із високою густиною перлітних зерен, що виходили на бічну поверхню зразків. При цьому в обох випадках фіксували вторинне розтріскування вздовж цих меж та чітке окреслення міжфазних меж між пластинами цементиту і фериту в околі перліту. На основі цього зробили висновок, що саме міжфазні межі є найбільш схильними до впливу середовища, яким моделювали вплив атмосферних опадів. Наявність таких поверхневих пошкоджень на зразках сприяє локалізації деформаційних процесів і пришвидшує руйнування в цілому.

Через вплив середовища в центральній частині зломів обох сталей фрактографічно було виявлено пошкодження, що могло виникнути під час експлуатації (рис. 6,в,г). У ремонтній сталі – це округлі фрагменти з чітким розмежуванням феритних і цементитних пластин у перліті та гладким рельєфом із характерними (хоча і невисокими) елементами відколу в межах феритних зерен (рис. 6,г).

У старовинній сталі – це великі і водночас неглибокі ямки з гребенями відриву вздовж їх периметра, на дні яких чітко проглядається пластинчастий рельєф перліту (рис. 6,в знизу). Еліптична форма цих ямок зумовлена витягнутою геометрією перлітних зерен. Руйнування, скоріш за все, розпочиналося вздовж меж розділу фериту з перлітними зернами (можливо, навіть на етапі тривалої експлуатації). Внаслідок активного навантаження пошкодження розвивалися з формуванням порожнини за деформаційним механізмом. Причому в обох сталях навколо крихких елементів злому в центральній його частині знаходяться класичні рівновісні ямки відриву. Оскільки за випробувань на повітрі цих сталей таких особливостей не спостерігали, їх візуалізацію пов'язували з дифузією і накопиченням водню в дефектах, утворених під час експлуатації, та локальним полегшенням руйнування в їх околі. Подібне окрихчення в центрі перерізу гладких зразків, які перед випробуваннями на одно-вісний розтяг попередньо наводнювали, описано раніше [29]. Його пов'язували з накопиченням водню в дефектах, що виникли на етапі експлуатації сталі, за сприяння якого відбувалося локальне крихке руйнування в центрі перерізу зразка.

Висновки

1. Середнє значення твердості за Брінеллем ремонтної сталі різних елементів вежі становить 117 НВ, старовинної – 71...83 НВ. Більший розкид значень НВ має старовинна сталь.

2. Виявлено особливо низькі значення ударної в'язкості KCV старовинної та ремонтної сталей (0,15 і 0,3 МДж/м² відповідно) порівняно з сучасними сталями відповідного складу. Наднизький опір крихкому руйнуванню сталей, виготовлених ~110 і 70 років тому, не можна пояснити лише якістю тогочасного металопрокату. Скоріш за все це зумовлено ще й їх деградацією за час тривалої експлуатації.

3. Показано, що запас пластичності обох сталей в значній мірі вичерпаний. Проте більше це стосується старовинної сталі. Руйнування за в'язким механізмом в старовинній сталі спостерігали на глибині до 50 мкм від концентратора напружень, тоді як в ремонтній – на 500 мкм.

4. Установлено, що, по-перше, характеристики міцності та пластичності обох сталей в середовищі синтетичного кислотного дощу нижчі, ніж на повітрі, по-друге, відносно подовження старовинної сталі як на повітрі, так і в середовищі більше, ніж ремонтної, що пов'язують з розкриттям пошкоджень у металі під час експлуатації.

5. Підтверджено наявність експлуатаційних пошкоджень, які розкриваються при розтязі в середовищі й ініціюють крихкі елементи в центральній частині зломів. У ремонтній сталі – це фрагменти міжзеренного відколу, а в старовинній – міжзеренного руйнування вздовж меж фериту та перліту, перетинки між якими руйнуються

внаслідок зсуву в фериті. Розкриття цих пошкоджень пов'язують із наводнюванням, якому сприяла електрохімічна гетерогенність на мікроструктурному рівні обох сталей.

Резюме

Проаналізовано технічне состояние старинной и ремонтной сталей элементов башни Шухова, эксплуатируемых ~110 и 70 лет соответственно. Для их оценки использовали ряд механических характеристик (твердость, прочность, пластичность, ударная вязкость). Показано, что обеим сталям свойственны сверхнизкие значения твердости и сопротивления хрупкому разрушению, что нельзя объяснить только качеством существовавшего в то время металлопроката. При этом механические характеристики старинной стали ниже, чем ремонтной. Полагали, что во время эксплуатации происходит деградация механических характеристик сталей, вызванная развитием рассеянной поврежденности. Об этом свидетельствует также максимальное относительное удлинение старинной стали при более низких значениях твердости и ударной вязкости. Установлено, что характеристики прочности и пластичности обеих сталей, определенные в среде синтетического кислотного дождя, ниже, чем на воздухе. Фрактографически подтверждено наличие эксплуатационных повреждений в объеме металла, которые при возможности наводороживания образцов из испытательной среды инициируют хрупкое разрушение в центральной части их сечения.

1. *Granat K., Pekalski G., Pigiel M., and Rabiega J.* Microstructures and selected properties of cast irons used for bridge structures at the late 18th and beginning of the 19th century // *Arch. Foundry Eng.* – 2010. – **10**, No. 1. – P. 107–112.
2. *Lesiuk G. and Szata M.* Aspects of structural degradation in old bridge steels by means of fatigue crack propagation // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2011. – **47**, № 1. – С. 76–81.
3. *De Jesus A. M. P., Figueiredo M. A. V., Ribeiro A. S., et al.* Residual lifetime assessment of an ancient riveted steel bridge // *Strain.* – 2011. – **47**. – P. E402–E415.
4. *Kutnyi A. und Becker K.* Raffinierter noch als der Eiffelturm // *Deutsch. Ing. Blatt.* – 2011. – **12**. – S. 38–39.
5. *Никифорчин Г. М., Кутний А. О., Кремьні Т. Д., Цирульник О. Т.* Діагностування стану експлуатованих понад 100 років сіткових гіперболоїдних веж В. Г. Шухова // *Машинознавство.* – 2013. – № 1-2. – С. 15–19.
6. *Nykyforchyn H. M., Kutnyi A. I., Student O. Z., et al.* Structure and properties of the steels of hyperboloid gridshell Shukhov's towers after long-term operation // *Mater. Sci.* – 2014. – **49**, No. 6. – P. 787–795.
7. *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 // *Ibid.* – 2012. – **48**, No. 2. – P. 239–246.
8. *Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Dzioba I. R., et al.* Degradation of welded joints of steam pipelines of thermal electric power plants in hydrogenating media // *Ibid.* – 2004. – **40**, No. 6. – P. 836–843.
9. *Krechkovska H. and Markov A.* Account of the change of the metal state of the steam pipeline of heat power plant after service in manoeurable mode of operation // *Proc. of 14th Int. Conf. Mechanika (April 2–3, 2009, Kaunas).* – Kaunas: Technologija, 2009. – P. 226–230.

10. *Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Krechkovs'ka H. V., and Markov A. D.* Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants // *Mater. Sci.* – 2010. – **46**, No. 2. – P. 177–189.
11. *Ostash O. P., Vol'demarov O. V., and Hladysh P. V.* Cyclic crack resistance of the steels of bends of steam pipelines after long-term operation // *Ibid.* – 2013. – **48**, No. 4. – P. 427–437.
12. *Ostash O. P., Andreiko I. M., and Holovatyuk Yu. V.* Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation // *Ibid.* – 2006. – **42**, No. 4. – P. 427–429.
13. *Архипов О. Г., Зінченко О. В., Ковальов Д. О., Заїка Р. Г.* Оцінка деградації сталей обладнання нафтопереробних і хімічних виробництв // *Металеві конструкції.* – 2009. – **15**, № 2. – С. 115–122.
14. *Babii L. O., Student O. Z., Zagorski A., and Markov A. D.* Creep of degraded 2.25Cr–Mo steel in hydrogen // *Mater. Sci.* – 2007. – **43**, No. 5. – P. 701–707.
15. *Красовский А. Я., Лохман И. В., Орыняк И. В.* Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов // *Пробл. прочности.* – 2012. – № 2. – С. 23–43.
16. *Цирульник О. Т., Волошин В. А., Петрина Д. Ю. та ін.* Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магистрального газопроводу // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 5. – С. 55–58.
17. *Цирульник О. Т.* Використання методів електрохімії в діагностуванні технічного стану конструкційних матеріалів // *Там же.* – 2013. – **49**, № 4. – С. 29–39.
18. *Крижанівський С. І., Никифорчин Г. М.* Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання / Під ред. В. В. Панасюка. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 457 с; Т. 2: Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – 2011. – 447 с; Т. 3: Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. – 2012. – 432 с.
19. *Кречковська Г. В., Студент О. З., Кутний А. І. та ін.* Опір крихкому руйнуванню металу сіткової гіперболоїдної вежі Шухова // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 4. – С. 87–93.
20. *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 // *Mater. Sci.* – 2007. – **43**, No. 1. – P. 77–84.
21. *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 // *Ibid.* – 2011. – **47**, No. 2. – P. 127–138.
22. *Еремин К. И., Науменко В. Д., Шапко Б. А. и др.* Исследование хладноломкости сталей 09Г2С и ВСтЗсп // *Металловедение и терм. обраб. металлов.* – 1990. – № 2. – С. 82–83.
23. *Никифорчин Г. М., Кутний А. О., Студент О. З., Кречковська Г. В.* Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперболоїдних сіткових веж Шухова // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – **49**, № 6. – С. 70–78.
24. *Старчак В. Г., Олексієнко С. О., Іваненко К. М., Цибуля С. Д.* Небезпека впливу неметалевих включень на водневу деградацію сталі // *Вісн. УМТ.* – 2008. – № 1 (1). – С. 122–141.
25. *Захарчук В. Г.* Електрохімічні та корозійні властивості наводнених сталей 45 і 12Х18Н10Т // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2005. – № 4. – С. 66–76.

26. Студент О. З., Кречковська Г. В. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15Х1М1Ф після її експлуатації на парогонях ТЕС // Там же. – 2011. – 47, № 5. – С. 19–26.
27. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д. Аномальний прояв високо-температурної деградації металу зварного з'єднання ошадно легованої сталі // Там же. – 2007. – 43, № 1. – С. 73–79.
28. Gabetta G., Nykyforchyn H. M., Lunarska E., et al. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel // Там же. – 2008. – 44, № 1. – С. 88–99.
29. Студент О. З., Никифорчин Г. М., Марков А. Д. Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС // Там же. – 2006. – 42, № 4. – С. 26–35.

Поступила 22. 09. 2015