УДК 624.074:620.18:620.193

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ СТАЛЕЙ ГІПЕРБОЛОЇДНИХ СІТКОВИХ ВЕЖ ШУХОВА

Г. М. НИКИФОРЧИН[1], *А. О. КУТНИЙ*[2], *О. З. СТУДЕНТ*[1], *Г. В. КРЕЧКОВСЬКА*[1], *О. І. ЗВІРКО*[1], *І. М. КУРНАТ*[1]

[1] *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*
[2] *Технічний університет Мюнхена, Німеччина*

Досліджено хімічний склад, структуру, твердість, корозійну тривкість та електрохімічні властивості металу автентичних й відремонтованих конструктивних елементів водонапірних веж у містах Миколаєві і Черкасах та Аджигольського маяка, зведених на початку XX сторіччя за проектами В. Г. Шухова. Проаналізовано можливі причини руйнування ремонтних зварних з'єднань сталей, виготовлених за різними технологіями, та вплив складу корозивного середовища і температури випроб на корозійно-електрохімічні властивості автентичних сталей. Встановлено, що найнижча корозійна тривкість притаманна металу Аджигольського маяка, що, очевидно, пов'язано з тривалим наводнювальним впливом агресивнішого (хлоридовмісного) корозивного середовища.

Ключові слова: *вежа Шухова, хімічний склад сталі, структура, твердість, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.*

Останнім часом особлива увага наукової громадськості спрямована на збереження старовинних металевих конструкцій. Це передбачає діагностування технічного стану конструктивних елементів на наявність у них дефектів та властивостей металу, які погіршуються в часі експлуатації і можуть не відповідати вимогам до конструктивної міцності об'єкта. Зокрема, з цією метою досліджують фізико-механічні властивості сталей мостів і шляхопроводів, збудованих ще у XVIII–XIX сторіччях [1–3], і на цій основі прогнозують їх залишковий ресурс.

В Україні особливу увагу привернули інженерні конструкції у вигляді гіперболоїдних сіткових веж, збудованих на початку XX сторіччя за проектами інженера В. Г. Шухова [4, 5]. За однакової витримувальної здатності їх металоємність втричі менша порівняно з іншими тогочасними конструкціями. В основному, це діючі маяки в гирлі Дніпра та водонапірні вежі, які хоча вже не використовують у системі водопостачання, але важливо зберегти як пам'ятки індустріальної архітектури.

Головними конструктивними елементами веж Шухова є кутники з маловуглецевої сталі, вразливої до атмосферної корозії. Під час монтажних робіт окремі елементи веж з'єднували винятково заклепками. Під час тривалої експлуатації метал кутників і клепані з'єднання зазнали суттєвих корозійних ушкоджень, які відрізнялися і за характером, і за інтенсивністю. Для забезпечення роботоздатності та підтримування належного технічного стану конструкцій здійснювали ремонтні роботи з використанням сучаснішого металу та тогочасної технології зварювання. Це додатково ускладнило оцінювання міцності та довговічності зварних з'єднань автентичних сталей, до яких не висувалися вимоги щодо можливості їх зварювання, а також діагностування стану металу, яке вимагало окремого

Контактна особа: Г. М. НИКИФОРЧИН, e-mail: nykyfor@ipm.lviv.ua

підходу до кожної конструкції з урахуванням передісторії експлуатації та заходів для її зміцнення та протикорозійного захисту.

На сьогодні вже існує певний досвід оцінювання технічного стану тривало експлуатованих конструкційних сталей об'єктів відповідального призначення, зокрема в енергетиці [6–8], авіації [9], хімічній [10], нафто- і газовидобувній галузях та системах транспортування маркетингових вуглеводнів [11–13].

Нижче досліджено стан старовинних сталей сіткових веж Шухова за особливостями їх хімічного складу, структури, твердості та корозійної тривкості.

Об'єкт, матеріали та методи. Вивчали структуру і механічні властивості металу водонапірної вежі Шухова в Миколаєві, а також корозійну тривкість сталей водонапірної вежі в Черкасах та Аджигольського маяка. Конструктивно вежі виготовлено з прямих кутників (рис. 1), які зафіксовано з допомогою серії горизонтально розташованих кільцеподібних ободів, вигнутих зі сталевих смуг або кутників. Під час військових дій вежу в Миколаєві підірвали. У 1944 р. її відновили, замінивши частину пошкоджених елементів із допомогою зварювання. Тому вирізняли автентичні елементи конструкції, з'єднані заклепками, та елементи, додані під час ремонтних робіт, у тому числі з використанням тогочасної технології зварювання. Аналізували стан таких елементів конструкції (рис. 1*b*): несучі кутники, позначені як 10в, 11з, 14в, 28в, кутник горизонтального хомута обода нижнього ярусу в околі кутника 31в та метал зварного шва, який з'єднував несучий кутник 44в з нижнім ободом вежі. Буквою "в" позначено кутники, прикріплені до нижнього обода з внутрішнього, а "з" – з зовнішнього його боків. Метал кутників 10в, 11з та 31в відповідав автентичному (вежу змонтовано в 1906 р.), а 14в і 28в – заміненому на повоєнний прокат під час реконструкції вежі. Крім того, дослідили метал з кутників вежі в Черкасах та утримувальних елементів сходів всередині Аджигольського маяка.

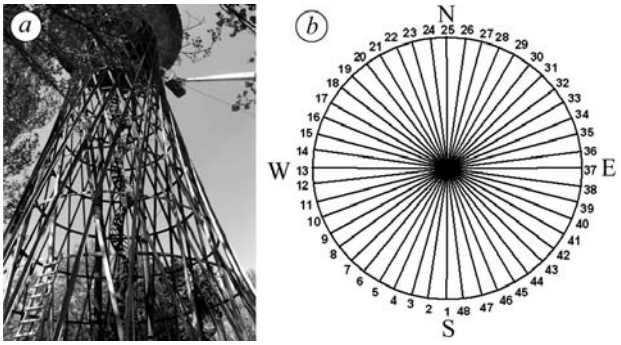


Рис. 1. Загальний вигляд (*a*) та схема розташування металевих несучих кутників (*b*) водонапірної вежі Шухова у Миколаєві.
Fig. 1. General view (*a*) and arrangement scheme of the metal bearing angles (*b*) from the Shukhov water tower in Mykolayiv.

Хімічний склад металу оцінювали на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Вміст елементів у металі кутників 11з, 14в та 31в визначали як усереднене значення двох замірів, а в металі зварного шва – чотирьох. Твердість за Брінелем HB вимірювали переносним універсальним твердоміром NOVOTEST (на принципі ультразвукового методу) як усереднене значення 50 замірів. Для металографічних досліджень використовували оптичний мікроскоп Neofot-21.

Корозійну тривкість металу вежі в Черкасах та Аджигольського маяка порівнювали за швидкістю корозії, визначеною гравіметричним методом, та за їх електрохімічними властивостями. Для електрохімічних випроб застосовували потенціостат IPC-Pro, знімаючи поляризаційні потенціодинамічні криві (швидкість розгортки потенціалу 1 mV/s, електрод порівняння – насичений хлоросрібляний, допоміжний – платиновий). За корозивні середовища використали водні розчини

NaCl: 0,3%-й, рівень мінералізації якого відповідає атмосферним опадам, та 3%-й, який імітує морську воду (так враховували наближеність маяка до моря). Корозійно-електрохімічні властивості металу оцінили за можливих в Україні у літній період температур T (291; 298 та 305 K). Базові електрохімічні характеристики матеріалу (потенціал корозії E_{st}, густину струму корозії i_{corr}, константи Тафеля анодної та катодної реакцій b_a, b_c) визначали графічно-аналітичним методом. Поляризаційний опір R_p розраховували за рівнянням Стерна–Гірі [14]: $\Delta E/\Delta i = R_p = K/i_{corr}$, де константа $K = b_a \cdot b_c / [2{,}3 \cdot (b_a + b_c)]$.

Результати та їх обговорення. В різних елементах вежі у Миколаєві використано сталі, які істотно відрізняються за хімічним складом (табл. 1). Зокрема, за вмістом вуглецю, кремнію та марганцю метал кутника 31в хомута обода нижнього ярусу відповідає сучасній маловуглецевій сталі 3кп. Вищий вміст вуглецю в металі кутників 11з та 14в (0,28 та 0,40 mass.%) – вже середньовуглецевим сталям, зварювання яких взагалі проблематичне. А метал зварного шва кутника 44в – маловуглецевій сталі з завищеним вмістом шкідливих домішок.

Таблиця 1. Хімічний склад металу елементів вежі у Миколаєві, mass.%

Кутник	C	Mn	Si	Cu	S	P
11з	0,28	0,48	0,006	0,013	0,043	0,019
14в	0,40	0,62	0,230	0,108	0,030	0,028
31в	0,16	0,40	0,005	0,020	0,062	0,057
44в	0,18	0,26	0,047	0,060	0,041	0,014

Таблиця 2. Усереднені значення твердості HB металу різних елементів вежі

№ кутика	31в	10в	11з	14в	28в	44в
Твердість	71	79	83	117	118	79

За твердістю та розкидом її значень автентичний та ремонтний метал також відрізнялися (табл. 2 і рис. 2). Стабільнішою виявилася твердість металу ремонтних кутників 14в і 28в, значення якої коливалися від 112 до 123, а середнє становило 117 і 118 HB відповідно. Твердість старовинного металу була істотно меншою, що, очевидно, зумовлено нижчим вмістом у ньому вуглецю. Вона коливалася від 64 до 92, а середня – від 71 до 83 HB. Можливо, це наслідок 100-річної деградації металу, яка може спричиняти розсіяну пошкодженість та знижувати його твердість [15, 16].

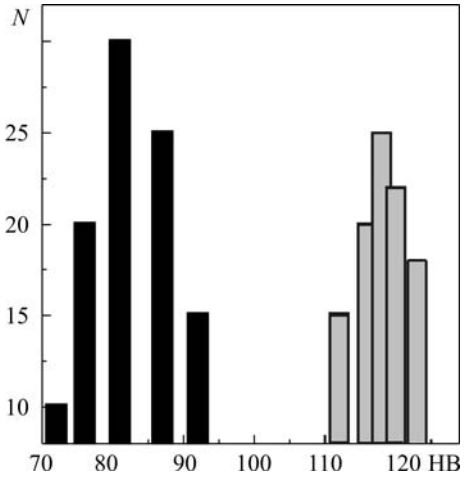


Рис. 2. Розподіл твердості HB металу автентичного (чорні) та ремонтного (сірі стовпчики) кутників.

Fig. 2. Distribution of hardness HB of the metal from authentic (black) and repair (gray bars) angles.

Металографічні дослідження виявили низку структурних особливостей. Мікроструктура автентичної сталі хомута в околі кутника 31в ферит-перлітна з незначною кількістю (3…5%) довгих, але вузьких зерен перліту (рис. 3*a*). Зерна фериту глобулярні за формою, а їх діаметр змінювався в широких межах (від 35 до 90 μm). Значну кількість великих глобулярних включень ідентифікували в межах феритної матриці (рис. 3*b*). Оскільки сталь недостатньо розкиснена,

то це, найімовірніше, оксиди заліза FeO. Крім того, вздовж меж зерен фериту виявили довгі виділення цементиту (рис. 3*c*, *d*), який як крихка фаза може знижувати опір крихкому руйнуванню металу. Вважають, що нанорозмірні за товщиною виділення цементиту можуть виникати внаслідок дифузійних процесів упродовж тривалої експлуатації сталей за впливу кліматичних чинників (зокрема, температури) [17]. У нашому випадку такі структурні особливості виявили вже не на нано-, а на макрорівні, що, очевидно, зумовлено надто тривалою деградацією старовинної сталі та воднем, як пришвидшувачем дифузійних процесів. Адже відомо, що за атмосферної корозії можливе наводнювання сталі [18, 19], яке пришвидшуватиме в ній дифузійний перерозподіл елементів [20, 21].

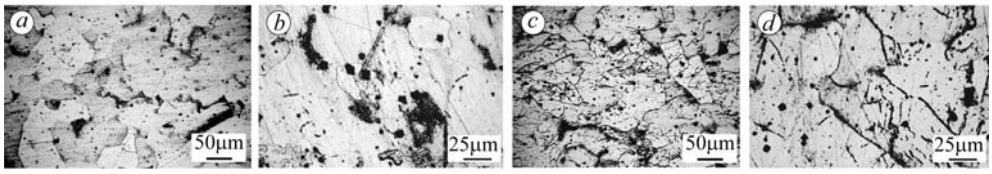


Рис. 3. Мікроструктура металу у поперечному перерізі хомута в околі кутника 31в.

Fig. 3. The microstructure of the metal in the cross-section of clamp in the vicinity of a rolled angle 31v.

Зазначимо, що подібні структурні особливості виявлено і на сталях мостів, збудованих 150 років тому [2], які експлуатувалися за впливу циклічних навантажень та атмосферної корозії. Не виключено, що саме сумісна дія водню та знакозмінних напружень виступає промотором дифузійних процесів у сталі з формуванням зерномежового цементиту. Можливо, саме такі структурні особливості спричиняють розшарування металу під впливом корозивного середовища [5]. Зрозуміло, що окрихчувальний ефект особливо відчутний за дії корозивно-наводнювального середовища (вода, застояна в корозійних виразках), що ослаблюватиме опір металу корозійному розтріскуванню та корозійній втомі.

Розшарування прокату можна пов’язати також з наявністю в металі шкідливих неметалевих включень, які у вигляді ланцюжків розташовуються вздовж напряму вальцювання. Технологія виготовлення сталевого прокату кінця XIX сторіччя не забезпечувала його чистоти за ними. Через електрохімічну гетерогенність структури такий метал ставав особливо схильним до корозії. Під час його електрохімічної взаємодії з водним середовищем включення служать ефективними катодами, що пришвидшує анодний процес розчинення металу [14]. Інтенсивність корозійних процесів на поверхні сталевих кутників визначає їх густина на поверхні. Через локалізацію катодного процесу метал в околі міжфазних меж включень з матрицею наводнюється. Цей водень може суттєво знижувати опір корозії сталі [22] та активізувати міжкристалітну корозію, у тому числі і під дією внутрішніх напружень, утворюваних у металі воднем, абсорбованим під час його тривалої експлуатації [5]. Таке розтріскування зафіксували в нижній частині автентичних несучих кутників з боку їх торців, де найдовше зберігалася волога (рис. 4). Воно

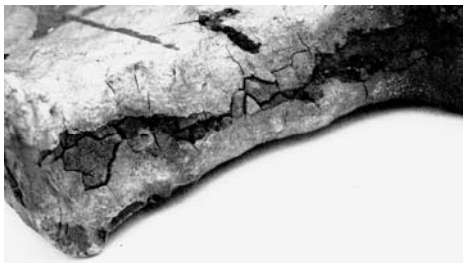


Рис. 4. Типові тріщини в нижній частині автентичних кутників з боку їх торців.

Fig. 4. Typical cracks in the lower part of the authentic rolled angles from the side of their end faces.

також може спричинити волоконне розшарування прокату вздовж ланцюжків включень.

У ремонтних кутниках 14в та 28в виявили типову для сучасних середньовуглецевих сталей ферит-перлітну структуру з істотно меншими, ніж у старовинному металі, і густиною, і розмірами включень. Площа корозійних уражень на їх поверхні теж виявилася значно меншою, а слідів розшарування металу взагалі не спостерігали.

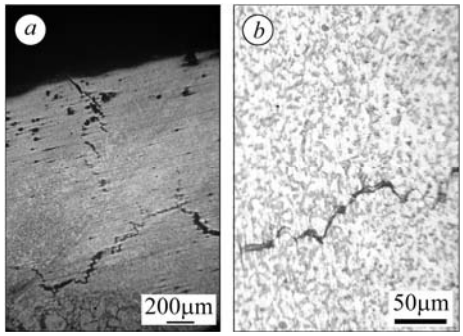


Рис. 5. Тріщини на зовнішній поверхні зварного з'єднання (*a*) та в поперечному перерізі металу шва (*b*).

Fig. 5. Cracks on the external surface of the welded joint (*a*) and in the cross-section of the weld metal (*b*).

На поверхні зварного шва і в його об'ємі виявили тріщини корозійно-механічного руйнування (рис. 5). Їх криволінійна траєкторія формувалася внаслідок руйнування перетинок між найближчими порожнинами, що з'явилися навколо включень, непроварів тощо. Міжзеренний характер руйнування дає можливість припустити, що вони виникли внаслідок корозійного розтріскування (під дією залишкових напружень від зварювання, створених наводнюванням металу, експлуатаційних тощо). Причому руйнування відбувалося по металу шва, якому властива значна структурна неоднорідність. У поперечному перерізі зварного з'єднання виявили характерні зони (рис. 6*a*) зі стовпчастою структурою, зумовленою спрямованістю кристалізації металу (рис. 6*b*), та відманштетовою в околі лінії сплавлення через перегрівання металу під час зварювання (рис. 6*c*).

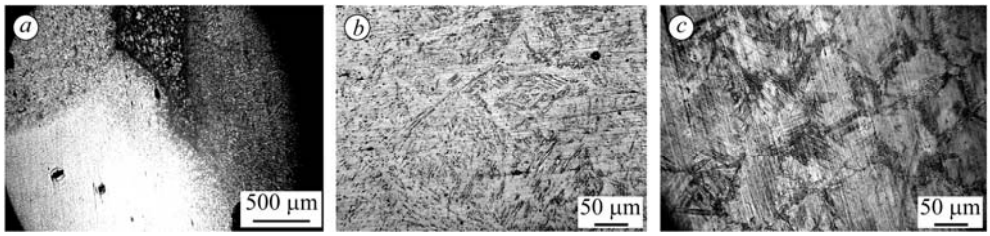


Рис. 6. Макро- (*a*) і мікроструктура (*b*, *c*) характерних зон зварного шва у поперечному перерізі.

Fig. 6. Macro- (*a*) and microstructures (*b*, *c*) of the typical zones in the welded joint cross-section.

Виявили, що сталі з елементів вежі в Черкасах та маяка істотно відрізняються за корозійною тривкістю та електрохімічними характеристиками (табл. 3). За температури 298 K сталь маяка кородує у ~1,3 рази швидше в 0,3%-му розчині NaCl, ніж сталь вежі. Зокрема, їх швидкості корозії становили 0,051 та 0,039 mm/year відповідно. За десятибальною шкалою корозійної тривкості металів (згідно з ГОСТ 13819-68) обидві сталі стійкі у цьому розчині і відповідають 5 і 4 балам відповідно.

Потенціодинамічні поляризаційні дослідження у 0,3- та 3%-х розчинах NaCl (рис. 7 і табл. 3) підтвердили нижчу корозійну тривкість сталі маяка порівняно зі сталлю вежі у Черкасах. Під час занурення в корозивні середовища стаціонарний

потенціал сталі маяка негативніший, ніж сталі вежі (табл. 3). Впродовж експозиції стаціонарний потенціал обох сталей плавно зміщувався до від'ємніших значень та стабілізувався через 30…35 min. Проте навіть після стабілізації його значення для сталі маяка були нижчими за всіх досліджених температур. В обох середовищах сталі кородували в активному стані (рис. 7). Однак анодні процеси на сталі маяка інтенсивніші (рис. 7*b*). Корозію лімітує дифузія деполяризатора, про що свідчать ділянки граничних дифузійних струмів на катодних вітках поляризаційних кривих. Її інтенсивність зростає з підвищенням температури. Зокрема, з її ростом (у порівняно вузькому діапазоні від 291 до 305 K) швидкість корозії обох сталей істотно підвищується (відповідно на 60 і 65% для сталі вежі і маяка). З урахуванням кліматичних умов півдня України це слід враховувати, прогнозуючи швидкість корозійного стоншення перерізу елементів гіперболоїдних конструкцій.

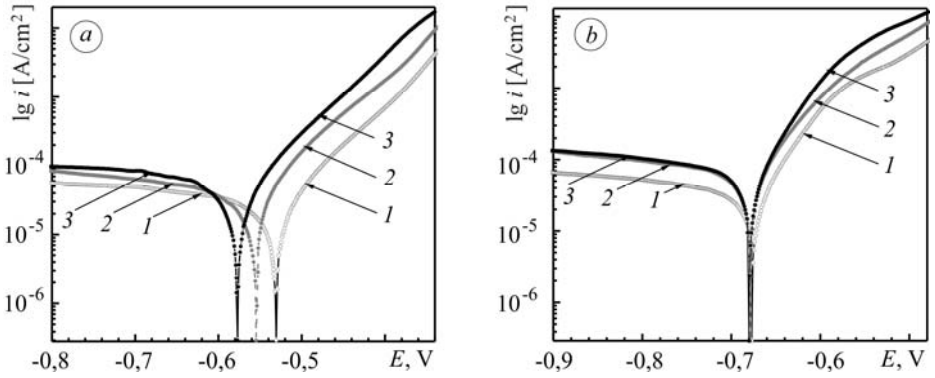


Рис. 7. Потенціодинамічні поляризаційні криві сталей вежі у Черкасах (*a*) та Аджигольського маяка (*b*) у 3%-му розчині NaCl за температур 291 (*1*); 298 (*2*) і 305 (*3*) K.

Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves of steels of the Cherkasy tower (*a*) and the Adziogol lighthouse (*b*) in 3% NaCl at temperatures 291 (*1*); 298 (*2*) and 305 (*3*) K.

Таблиця 3. Електрохімічні характеристики сталей веж Шухова в 0,3% (чисельник) та 3% (знаменник) водних розчинах NaCl

Об'єкт дослідження	T, K	$-E_{st}$, V, за експозиції τ, s			i_{corr}, μA/cm²	$-b_c$	b_a	R_p, Ω·cm²
		0	15	1800 / 2100		V		
Сталь вежі в Черкасах	291	– / 0,439	– / 0,472	– / 0,535	– / 5,12	– / 0,041	– / 0,040	– / 1719,3
	298	0,372 / 0,465	0,452 / 0,485	0,540 / 0,560	12,0 / 6,57	0,090 / 0,034	0,049 / 0,039	1149,5 / 1202,1
	305	– / 0,483	– / 0,552	– / 0,580	– / 8,21	– / 0,033	– / 0,032	– / 860,4
Сталь маяка	291	– / 0,482	– / 0,573	– / 0,677	– / 10,5	– / 0,039	– / 0,040	– / 817,7
	298	0,410 / 0,493	0,571 / 0,582	0,670 / 0,679	15,6 / 14,0	0,090 / 0,031	0,049 / 0,032	884,2 / 489,0
	305	– / 0,498	– / 0,598	– / 0,680	– / 17,3	– / 0,030	– / 0,030	– / 377,0

Поляризаційний опір R_p сталі маяка суттєво нижчий, ніж сталі вежі в Черкасах: у 3%-му розчині NaCl при 291 K у ~2,1, а при 305 K – у 2,3–2,5 рази. Про нижчу корозійну тривкість цієї сталі свідчать також вищі значення густини струму корозії i_{corr} та нижчі коефіцієнтів Тафеля катодної (b_c) та анодної (b_a) ділянок поляризаційних кривих у діапазоні 291…305 K (табл. 3). Це зумовлено, очевид-

но, тривалим контактуванням сталі маяка з високоагресивним середовищем (морське повітря) з високою вологістю та вмістом солей, у тому числі хлоридів. За умов атмосферної корозії можливе її наводнювання [18, 19]. Зокрема, водень може проникати в метал внаслідок локальних змін pH та потенціалу поблизу кородивної поверхні. Ці зміни виникають під час випаровування тонкої плівки води, що змочує поверхню сталі. Отримані результати вказують на те, що на маяку були сприятливі умови для наводнювання металу під час кородування. Разом з тим відомо, що водень інтенсифікує перерозподіл елементів [23], тобто сприяє структурній деградації сталей [24].

ВИСНОВКИ

Найстабільнішою з-поміж досліджених властивостей виявилася твердість металу ремонтних кутників 1944 року виробництва, середнє значення якої становило 117 НВ, тоді як для автентичного металу вона коливалася від кутника до кутника в межах 71…79 НВ. Крім того, зафіксували більший розкид її значень у металі 1906 року проти ремонтного.

Загалом дослідженим матеріалам властива ферит-перлітна структура, яка відрізнялася за вмістом перліту, розмірами зерен, кількістю та розмірами неметалевих включень. У старовинній сталі перліту значно менше, ніж у ремонтній, що визначається вмістом в них вуглецю. Неметалеві включення виявили в усіх сталях, але в автентичних їх істотно більше і вони крупніші.

Зафіксували корозійне розтріскування металу шва і на його поверхні, і в поперечному перерізі, яке могло виникнути через недостатню розкисненість автентичних сталей з багатьма нерівномірно розташованими включеннями, перетинки між якими могли руйнуватися внаслідок корозійного розтріскування. Залишкові напруження могли виникнути через значне деформування зварюваних елементів для усунення зазору між ними.

Вуглецеві сталі сіткових конструкцій (водонапірна вежа Шухова у Черкасах та Аджигольський маяк) слабо опиралися корозії у 0,3- та 3%-х водних розчинах NaCl. Нижча корозійна тривкість сталі маяка порівняно зі сталлю вежі зумовлена, очевидно, тривалим впливом агресивнішого корозивного наводнювального середовища. Зокрема, погіршилися її корозійно-електрохімічні характеристики – стаціонарний потенціал, густина струму корозії та поляризаційний опір.

Результати виконаних досліджень металу сіткових веж Шухова є основою для розроблення системи ефективного протикорозійного захисту із застосуванням сучасних технологій інгібування корозії з подальшим використанням відновлювальних захисних покривів, протекторного захисту тощо.

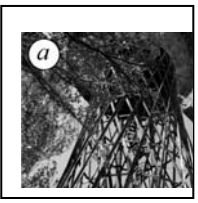
Робота виконана за фінансової підтримки Фонду фундаментальних досліджень Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України, проект № Ф39/28-2013.

РЕЗЮМЕ. Исследованы химический состав, структура, твердость и электрохимические свойства металла аутентичных и ремонтных конструкционных элементов водонапорных башен в Николаеве и Черкассах, а также Аджигольского маяка, возведенных в начале XX столетия за проектами В. Г. Шухова. Проанализированы возможные причини разрушений ремонтных сварных соединений сталей, изготовленных за разными технологиями, и влияние состава коррозионной среды и температуры испытаний на коррозионно-электрохимические свойства аутентичных сталей. Установлено, что наиболее низкая коррозионная стойкость свойственна металлу Аджигольського маяка, что, очевидно, связано с длительным наводороживающим влиянием более агрессивной (хлорсодержащей) коррозионной среды.

SUMMARY. The chemical composition, structure, hardness, and electrochemical properties of the authentic and repair metal of structural elements of water towers in the cities of Mykolaiv and Cherkasy and also of Adziogol lighthouse, constructed in the early twentieth of the century

according to V. G. Shukhov's projects, are studied. The possible reasons of fracture of repair welded joints of steels manufactured by different technologies and the influence of corrosive environment composition and tests temperature on the corrosion-electrochemical properties of authentic steel are analyzed. It is found that the Adziogol lighthouse metal has the lowest corrosion resistance, which is attributed to long-term hydrogenation effect of the more aggressive (chloride) corrosive medium.

1. *Microstructures* and selected properties of cast irons used for bridge structures at the late 18th and beginning of the 19 the century / K. Granat, G. Pękalski, M. Pigiel, J. Rabiega // Archives of Foundry Engng. – 2010. – **10**, № 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.
   (*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.)
3. *Residual* lifetime assessment of an ancient riveted steel road bridge / A. M. P. de Jesus, M. A. V. Figueiredo, A. S. Ribeiro et al. // Strain. – 2011. – **47**. – P. E402–E415.
4. *Kutnyi A. and Becker K.* Raffinierter noch als der Eiffelturm // Deutsches Ingenieur Blatt. – 2011. – **12**. – S. 38–39.
5. *Діагностування* стану експлуатованих понад 100 років сіткових гіперболоїдних веж В. Г. Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, Т. Д. Кремінь, О. Т. Цирульник // Машинознавство. – 2013. – № 1–2. – С. 15–19.
6. *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.)
7. *Деградація* зварних з'єднань парогонів теплоелектростанцій у наводнювальному середовищі / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, І. Р. Дзіоба та ін. // Там же. – 2004. – **40**, № 6. – С. 105–110.
   (*Degradation* of welded joints of steam pipelines of thermal electric power plants in hydrogenating media / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student , I. R. Dzioba et al. // Materials Science. – 2004. – **40**, № 6. – P. 836–843.)
8. *Осташ О. П., Вольдемаров О. В., Гладиш П. В.* Циклічна тріщиностійкість сталей тривало експлуатованих згинів парогонів // Там же. – 2012. – **48**, № 4. – С. 14–24.
   (*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 // Materials Science. – 2013. – **48**, № 4. – P. 427–437.)
9. *Осташ О. П., Андрейко І. М., Головатюк Ю. В.* Деградація матеріалів і втомна довговічність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Там же. – 2006. – **42**, № 4. – С. 5–17.
   (*Ostash 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. *Оцінка* деградації сталей обладнання нафтопереробних і хімічних виробництв / О. Г. Архипов, О. В. Зінченко, Д. О. Ковальов, Р. Г. Заїка // Металеві конструкції. – 2009. – **15**, № 2. – С. 115–122.
11. *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. – 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.
12. *Красовский А. Я., Лохман И. В., Орыняк И. В.* Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов // Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С. 23–43.



13. *Деградація* властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 5. – С. 55–58.

(*Degradation* of properties of the metal of welded joints in operating gas mains / O. T. Tsyrul'nyk, V. A. Voloshyn, D. Yu. Petryna et al. // Materials Science. – 2011. – **46**, № 5. – P. 628–632.)

14. *Коррозия*: Справ. / Под ред. Л. Л. Шрайера: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1981. 7– 632 с.

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

(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D.* Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints // Materials Science. – 2007. – **43**, № 1. – P. 77–84.)

16. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М.* Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Там же. – 2011. – **47**, № 2. – С. 11–20.

(*Kryzhanivs'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M.* Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – **47**, № 2. – P. 127–138.)

17. *Нечаев Ю. С.* Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов // Успехи физ. наук. – 2008. – № 7. – С. 709–726.

18. *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.

19. *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.

20. *Ускорение* процессов самодиффузии в металлах под влиянием растворенного водорода / В. М. Сидоренко, В. В. Федоров, Я. В. Барабаш, В. И. Похмурский // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – **13**, № 6. – С. 27–30.

(*Acceleration* of self-diffusion processes in metals under the influence of dissolved hydrogen / V. M. Sidorenko, V. V. Fedorov, L. V. Barabash, V. I. Pokhmurskii // Materials Science. – 1977. – **13**, № 6. – P. 607–610.)

21. *Goltsov V. A.* Fundamentals of hydrogen treatment of materials and its classification // Int. J. of Hydrogen Energy. – 1997. – № 2/3. – P. 119–124.

22. *Захарчук В. Г., Цирульник О. Т., Никифорчин Г. М.* Електрохімічні та корозійні властивості наводнених сталей 45 і 12Х18Н10Т // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 4. – С. 66–76.

(*Zakharchuk V. H., Tsyrul'nyk O. T., and Nykyforchyn H. M.* Electrochemical and Corrosion Properties of Hydrogenated 45 and 12KH18N10T Steels // Materials Science. – 2005. – **41**, № 4. – P. 508–519.)

23. *Воднева* деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, Д. Ю. Петрина та ін. // Там же. – 2007. – **43**, № 5. – С. 97–104.

(*Hydrogen* degradation of steels in gas mains after long period of operation / O. T. Tsyrulnyk, H. M. Nykyforchyn, Yu. D. Petryna et al. // Materials Science. – 2007. – **43**, № 5. – P. 708–717.)

24. *Оцінювання* впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков // Там же. – 2010. – **46**, № 2. – С. 42–54.

(*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 / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, A. D. Markov // Materials Science. – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)

Одержано 09.04.2013