

УДК 620.193

О. Звірко¹, канд. техн. наук; А. Кутний², докт. філософії;
Г. Никифорчин¹, докт. техн. наук

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України Україна

²Технічний університет Мюнхена

КОРОЗІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ СТАЛЕЙ СІТЧАСТИХ ГІПЕРБОЛОЇДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Резюме. Досліджено корозійну тривкість та електрохімічну поведінку вуглецевих сталей експлуатованих понад 100 років сітчастих гіперболоїдних конструкцій (веж Шухова) та сучасної вуглецевої сталі у вихідному стані у 0,3% водному розчині NaCl. Встановлено, що вуглецева сталь Адзигольського маяка характеризується нижчою корозійною тривкістю порівняно з сучасною вуглецевою сталлю у вихідному стані та вуглецевою сталлю водонапірної вежі у Черкасах, що зумовлено тривалим впливом агресивного корозивного наводнювального середовища. Виявлено погіршення низької корозійно-електрохімічних характеристик сталі маяка внаслідок її експлуатаційної деградації – стаціонарного потенціалу, густини струму корозії та поляризаційного опору, які можуть виступати достатньо чутливими інформаційними ознаками експлуатаційної деградації сталі.

Ключові слова: вуглецева сталь, вежа Шухова, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики, деградація.

O. Zvirko, A. Kutnyi, H. Nykyforchyn

CORROSION DEGRADATION OF STEELS OF THE LATTICE HYPERBOLOID CONSTRUCTIONS

Summary. A number of unique engineering monuments – the lattice towers created by outstanding engineer V.G. Shukhov have been preserved in Ukraine. Atmospheric corrosion is the main reason of the deterioration of their performance because the towers are made of carbon steel, which has insufficient corrosion resistance and they are not properly protected against corrosion. Therefore, the expertise of constructions corrosion damages, the establishment of corrosion peculiarities, the use of modern corrosion protection and corrosion monitoring are necessary for their conservation.

The paper is devoted to studying the influence of long-term operation on corrosion resistance and electrochemical behavior of carbon steels of lattice hyperboloid towers in comparison with modern carbon steel in the initial state and detecting the informative features, which are sensitive to a change of a metal state due to long-term operation.

The corrosion resistance and electrochemical behavior of carbon steels of the 100-year-old Shukhov lattice towers and modern carbon steel in the initial state in 0.3% NaCl aqueous solution have been investigated. It has been established that the Adziogol Lighthouse carbon steel is characterized by the reduced corrosion resistance in comparison with the modern carbon steel in the initial state and the carbon steel of the Cherkasy water tower which is likely to be caused by long-term exposure to aggressive corrosive and hydrogenating environment. The deterioration of corrosion and electrochemical properties of lighthouse steel, such as stationary potential, corrosion current density and polarization resistance, due to its exploited degradation has been found. These characteristics may be enough informative features of the in-service steel degradation. To maintain a conservation of the lattice tower constructions it is necessary to provide its effective corrosion protection using modern technology.

Key words: carbon steel, Shukhov tower, corrosion resistance, electrochemical properties, degradation.

Постановка проблеми. Низка унікальних пам'яток інженерного мистецтва – сітчасті вежові конструкції видатного інженера В.Г. Шухова – збереглася в Україні. Це, зокрема, Станіславський та Аджигольський маяки, водонапірні вежі в Миколаєві, Черкасах, Білій Церкві, Конотопі. Вежі системи В.Г. Шухова є першими у світі гіперболоїдними конструкціями [1]. Побудований в 1911 році неподалік с. Рибальче Херсонської області Аджигольський задній маяк (односекційна гіперболоїдна конструкція) є найвищим в Україні – його висота близько 73 м (рис. 1 [2]). Одними з найдавніших є також гіперболоїдні водонапірні вежі у м. Миколаєві (збудована у 1907 р.) та у м. Черкасах (збудована у 1914 р., рис. 2 [3]). Вежі виготовлені з вуглецевих сталей та володіють недостатньою корозійною тривкістю, вони не захищені належним чином від корозії. Тому основною причиною погіршення їх експлуатаційних характеристик є атмосферна корозія. Відтак для їх збереження необхідна експертиза корозійних уражень металоконструкцій, встановлення особливостей їх корозії, застосування сучасного протикорозійного захисту та корозійного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом особлива увага науковців зосереджена на збереженні цих унікальних об'єктів та їх функціональних можливостей [4 – 6]. На дослідження веж Шухова в аспекті їх історії на теорії конструкцій вже спрямовано європейський проект “Konstruktionswissen der frühen Moderne Šuchovs Strategien des sparsamen Eisenbaus” (D-A-CN Forschungsprojekt 2010 – 2013) [7]. У рамках проекту Технічним Університетом Мюнхена в 2011 році було проведено обстеження й заміри п'яťох водонапірних веж, а також маяків, під час яких було взято проби металу. Україна бере участь у дослідженні структурного, механічного та корозійного стану гіперболоїдних веж у рамках проекту Фонду фундаментальних досліджень Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України. На основі проведеної експертизи технічного стану найдавнішої в Україні водонапірної вежі у м. Миколаєві встановлено, що основною загрозою її цілісності є інтенсивна корозійна пошкодженість металу, особливо в нижньому поясі конструкції, а також клепаних та зварних з'єднань [6].

Мета роботи – дослідження впливу тривалої експлуатації на корозійну тривкість та електрохімічну поведінку вуглецевих сталей сітчастих гіперболоїдних конструкцій у порівнянні з сучасною вуглецевою сталлю у вихідному стані та виявлення інформаційних ознак зміни їх стану внаслідок тривалої експлуатації.

Постановка завдання. Основною причиною погіршення експлуатаційних характеристик сітчастих гіперболоїдних конструкцій, виготовлених з вуглецевих сталей, є атмосферна корозія, на швидкість якої впливає багато факторів. Вирішальними чинниками, що визначають швидкість корозії сталі, є вологість повітря та наявність у ньому агресивних речовин [8]. За наявності вологи протікає електрохімічна корозія сталі. У вологому середовищі, особливо забрудненому агресивними хімічними елементами, сталь починає інтенсивно кородувати. Швидкість



Рисунок 1. Аджигольський маяк неподалік с. Рибальче Херсонської області [2]

Figure 1. Adziogol Lighthouse near v. Rybalche, Kherson region [2]



Рисунок 2. Гіперболоїдна вежа на території Черкаського водоканалу [3]

Figure 2. Hyperboloid tower in the Cherkasy Vodokanal territory

корозії сталі у містах може досягати 0,03...0,06 мм/рік; поблизу промислових об'єктів – 0,04...0,11 мм/рік; в умовах морського повітря, що містить значну кількість вологи і солей, – 0,07...0,16 мм/рік, тоді як в умовах менш забрудненого повітря сіл швидкість корозії сталі становить близько 0,004 мм/рік.

Водонапірна вежа (м. Черкаси) та Аджигольський маяк (с. Рибальче Херсонської області) експлуатувались тривалий час (близько 100 років) за атмосферних умов різної агресивності – в умовах міста, де наявні забруднення, спричинені викидами промислових об'єктів та автотранспорту, та в умовах морського повітря, що містить значну кількість вологи та солей. Для збереження тривало експлуатованих сітчастих вежових конструкцій важливим є встановлення тривалого впливу агресивних корозивних середовищ на корозійну тривкість та електрохімічну поведінку їх сталей і виявлення інформаційних ознак зміни їх стану внаслідок тривалої експлуатації.

Матеріали й методика досліджень. Об'єкти досліджень – водонапірна вежа (м. Черкаси) та Аджигольський маяк, виготовлені з майже прямолінійних кутників вуглецевої сталі (розміри полички 12...15 см). Зразки для досліджень вирізували зі сталевих кутників зовнішньої частини гіперболоїдної водонапірної вежі (м. Черкаси) та з несучої частини внутрішньої сходової клітки Аджигольського маяка. Властивості експлуатованих сталей порівнювали з характеристиками сучасного кутника зі сталі Ст3 у вихідному стані. Зразки для корозійних досліджень виготовляли у формі пластин 1,5×2,5 см завтовшки 3 мм, шліфованих по всіх поверхнях; для електрохімічних досліджень – на всі поверхні зразків, окрім вибраної для електрохімічних досліджень певної ділянки (площею ~0,4 см²), наносили ізолюючий лакофарбовий покрив.

Швидкість корозії сталей визначали гравіметричним методом. Електрохімічну поведінку сталей досліджували потенціодинамічним методом. Випробовували у середовищі 0,3%-го водного розчину NaCl (за рівнем мінералізації відповідає атмосферним опадам). Температура корозивного середовища становила 298 К. Поляризаційні криві знімали на потенціостаті ІРС-Pro за швидкості розгортки потенціалу 1 мВ/сек, використовуючи стандартну трьохелектродну термостатовану електрохімічну комірку з насиченим хлоросрібляним електродом порівняння та допоміжним платиновим електродом. За результатами випроб визначали базові електрохімічні характеристики – стаціонарний потенціал E_{st} , густину струму корозії i_{cor} , густину граничного дифузійного струму i_d , константи Тафеля b_c і b_a катодної та анодної реакцій відповідно. Поляризаційний опір R_p розраховували за рівнянням Стерна-Гірі [9]: $\Delta E/\Delta i = R_p = K/i_{cor}$, де $K = b_a \cdot b_c / [2,3 \cdot (b_a + b_c)]$ – константа; b_a і b_c – константи Тафеля анодної та катодної реакцій.

Результати дослідження та їх обговорення. Корозійна тривкість сталей у 0,3% розчині NaCl. Сталі сітчастих вежових конструкцій системи Шухова характеризуються різною корозійною тривкістю у 0,3% розчині NaCl (табл. 1). Швидкості корозії сучасної сталі та сталі водонапірної вежі є близькими за значеннями, сталь маяка кородує найшвидше. Швидкість корозії сталі у вихідному стані є дещо вищою порівняно зі сталлю водонапірної вежі, що, очевидно, пов'язано з відмінностями у технологіях виготовлення сталей. Досліджені сталі сітчастих вежових конструкцій є стійкими у 0,3% розчині NaCl: сучасна сталь і сталь водонапірної вежі мають 4 бали, а сталь маяка – 5 балів за десятибальною шкалою корозійної тривкості металів (згідно з ГОСТом 13819-68).

Таблиця 1

Швидкість корозії сталей сітчастих вежових конструкцій системи Шухова у 0,3% розчині NaCl

Матеріал	Швидкість корозії К, $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{год})$	Глибинний показник корозії П, мм/рік	Струмівий показник корозії, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Сучасна сталь	3,68	0,041	3,52
Сталь водонапірної вежі	3,49	0,039	3,34
Сталь маяка	4,57	0,051	4,37

Електрохімічні властивості сталей у 0,3% водному розчині NaCl. При зануренні у 0,3% розчин NaCl стаціонарний потенціал сучасної сталі у вихідному стані становить -0,364 В, сталі водонапірної вежі та сталі маяка – -0,372 В та -0,410 В відповідно (рис. 3, табл. 2). Упродовж експозиції у корозивному середовищі стаціонарний потенціал досліджених сталей плавно зміщується у бік більш від’ємних значень та стабілізується упродовж 25 – 30 хв після занурення на рівні значень -0,525 В, -0,540 В та -0,670 В для сталі у вихідному стані, сталі водонапірної вежі та сталі маяка відповідно (табл. 2). Отже, найнижче значення стаціонарного потенціалу у 0,3%-му водному розчині NaCl серед досліджених сталей властиве сталі маяка, яка характеризується найнижчим опором корозії.

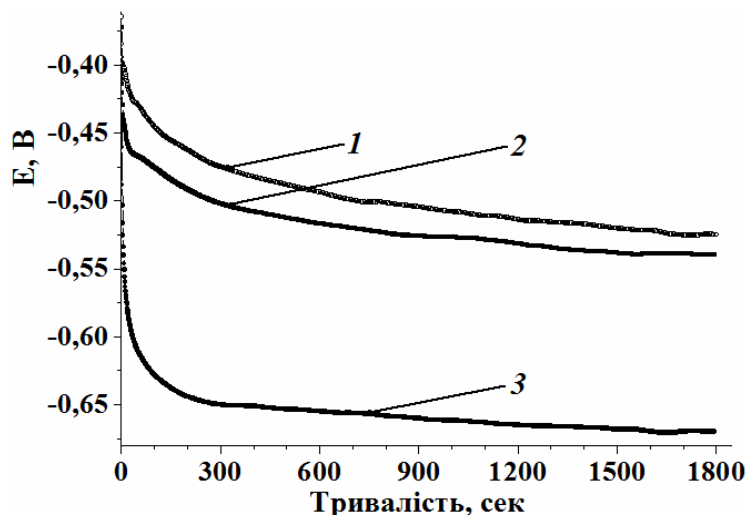


Рисунок 3. Кінетика встановлення стаціонарного потенціалу сучасної сталі у вихідному стані (1), сталі водонапірної вежі у м. Черкасах (2) та сталі Аджигольського маяка (3) у 0,3%-му водному розчині NaCl за температури 298 К

Figure 3. Kinetics of stationary potential stabilization of the modern steel in the initial state (1), the Cherkasy water tower steel (2) and the Adziogol Lighthouse steel (3) in 0,3% NaCl solution at temperature 298°K

На основі поляризаційних досліджень встановлено, що досліджені сталі у 0,3%-му водному розчині NaCl кородують в активному стані (рис. 4). Характер та інтенсивність протікання анодних процесів на сталі у вихідному стані та на сталі водонапірної вежі є подібними. Характер перебігу анодних реакцій на сталі маяка є дещо іншим. Інтенсивність анодних процесів є найвищою на сталі маяка порівняно зі сталлю у вихідному стані та сталлю водонапірної вежі (рис. 4). Константи Тафеля анодної реакції для сталі водонапірної вежі та сталі маяка мають дещо нижчі значення (0,049 В) порівняно зі сталлю у вихідному стані (0,051 В), що вказує на полегшений перебіг анодних реакцій на експлуатованих сталях (табл. 2).

Таблиця 2

Електрохімічні параметри сталей сітчастих вежових конструкцій системи Шухова у 0,3% розчині NaCl

Матеріал	Стаціонарний потенціал E_{st} , В, за тривалості експозиції τ			Густина струму корозії i_{cor} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Густина граничного дифузійного струму $i_d \cdot 10^4$, A/cm^2	Константи Тафеля, В		Поляризаційний опір R_p , $\text{Om} \cdot \text{cm}^2$
	$\tau = 0$ с.	$\tau = 15$ с.	$\tau = 1800$ с.			$-b_c$	b_a	
Сучасна сталь	-0,364	-0,409	-0,525	12,7	1,88	0,100	0,051	1156,3
Сталь водонапірної вежі	-0,372	-0,452	-0,540	12,0	1,53	0,09	0,049	1149,5
Сталь маяка	-0,410	-0,571	-0,670	15,6	1,06	0,09	0,049	884,2

Інтенсивність перебігу катодних реакцій є найнижчою на сталі маяка порівняно зі сталлю у вихідному стані та сталлю водонапірної вежі, а їх характер є подібним (рис. 4). Корозія вуглецевих сталей у 0,3%-му водному розчині NaCl лімітується стадією дифузії деполаризатора, про що свідчать ділянки граничних дифузійних струмів на катодних вітках поляризаційних кривих. Нахил тафелівської ділянки катодної кривої є найвищим для сталі у вихідному стані, що свідчить про більш утруднений на ній перебіг катодних реакцій.

Корозійна тривкість сталі водонапірної вежі та сталі у вихідному стані у 0,3%-му водному розчині NaCl відрізняється незначно (рис. 4, табл. 2): поляризаційний опір обох сталей є близьким за значенням ($1156,3 \text{ Om} \cdot \text{cm}^2$ та $1149,5 \text{ Om} \cdot \text{cm}^2$), а густина струму корозії сталі у вихідному стані є дещо вищою.

Сталь маяка характеризується суттєво нижчим поляризаційним опором порівняно зі сталлю у вихідному стані та сталлю водонапірної вежі. Зокрема, поляризаційний опір сталі маяка у $\sim 1,3$ рази нижчий за поляризаційний опір сталі у вихідному стані та сталі водонапірної вежі (табл. 2). Про найнижчу корозійну тривкість сталі маяка серед досліджених сталей у 0,3%-му водному розчині NaCl свідчать також найбільш від'ємне значення стаціонарного потенціалу ($-0,670 \text{ В}$) та найвище значення густини струму корозії ($15,6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Результати потенціодинамічних поляризаційних досліджень узгоджуються з результатами корозійних випробувань.

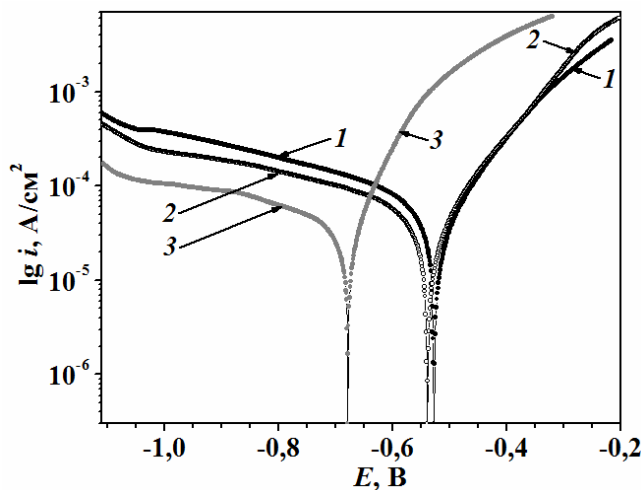


Рисунок 4. Потенціодинамічні поляризаційні криві сучасної сталі у вихідному стані (1), сталі водонапірної вежі у м. Черкасах (2) та сталі Адзигольського маяка (3) у 0,3%-му водному розчині NaCl за температури 298 К

Figure 4. Potentiodynamic polarization curves of the modern steel in the initial state (1), the Cherkasy water tower steel (2) and the Adziogol Lighthouse steel (3) in 0,3% NaCl solution at temperature 298°K

Експлуатованій сталі маяка властива легша активація анодного процесу при накладенні однакової перенапруги порівняно зі сталлю у вихідному стані та сталлю водонапірної вежі (рис. 5), що свідчить про вищий ступінь її деградації. За однакової перенапруги найменше активується анодна реакція розчинення сталі у вихідному стані. Тобто за однакової перенапруги найшвидше кородуватиме сталь маяка.

Знижена корозійна тривкість сталі маяка порівняно з сучасною сталлю у вихідному стані та сталлю водонапірної вежі зумовлена, очевидно, її тривалим кородуванням під час експлуатації у високоагресивному хлоридвмісному середовищі (в морській атмосфері, яка містить велику кількість вологи та солей, у тому числі хлоридів). В умовах атмосферної корозії відбувається наводнювання сталі – автори праці [10] показали, що водень проникає у сталь під час процесу висушування плівки вологи зі сталльної поверхні. Отримані результати вказують на те, що сталь маяка, ймовірно, наводнювалась у процесі експлуатації під час тривалого кородування. Отже, виявлене погіршення низки корозійно-електрохімічних характеристик експлуатованої сталі маяка (стаціонарного потенціалу, густини струму корозії та поляризаційного опору) є, очевидно, проявом її корозійно-водневої деградації.

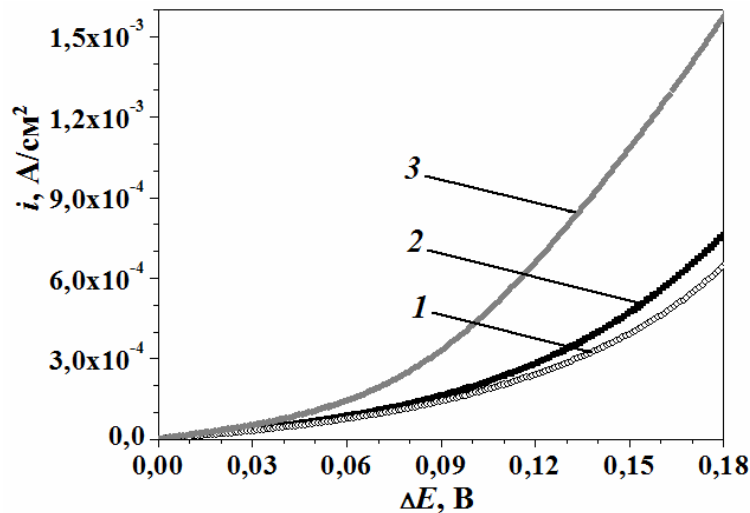


Рисунок 5. Залежності $\Delta E - i$ для сучасної сталі у вихідному стані (1), сталі водонапірної вежі у м. Черкасах (2) та сталі Адзигольського маяка (3) у 0,3%-ному водному розчині NaCl за температури 298 K за однакової анодної перенапруги ($\Delta E = E_{pol} - E_{st}$, E_{pol} – потенціал анодної поляризації)

Figure 5. Dependences $\Delta E - i$ for the modern steel in the initial state (1), the Cherkasy water tower steel (2) and the Adziogol Lighthouse steel (3) in 0.3% NaCl solution at temperature 298°K and at the same anode overvoltage ($\Delta E = E_{pol} - E_{st}$, E_{pol} – anode polarization potential)

Висновки. Вуглецева сталь сітчастої вежової конструкції маяка системи Шухова характеризується зниженою корозійною тривкістю у 0,3%-му водному розчині NaCl порівняно з сучасною вуглецевою сталлю у вихідному стані та сталлю водонапірної вежі, що зумовлене, очевидно, тривалим впливом агресивного корозивного наводнювального середовища. Внаслідок експлуатаційної деградації погіршуються корозійно-електрохімічні характеристики сталі маяка – стаціонарний потенціал, густина струму корозії та поляризаційний опір, які можуть виступати достатньо чутливими інформаційними ознаками експлуатаційної деградації сталі. Для збереження сітчастих вежових конструкцій необхідно забезпечити їх ефективний протикорозійний захист із застосуванням сучасних технологій.

Conclusions. The carbon steel of the Shukhov lattice tower construction of lighthouse is characterized by the reduced corrosion resistance in 0.3% NaCl aqueous solution in comparison with the modern carbon steel in the initial state and the Cherkasy water tower

carbon steel, which is likely to be caused by long-term exposure to aggressive corrosive and hydrogenating environment. Corrosion and electrochemical properties of lighthouse steel, such as stationary potential, corrosion current density and polarization resistance, is deteriorated due to its exploited degradation and it may be enough sensitive informative feature of in-service steel degradation. To maintain a conservation of the lattice tower constructions it is necessary to provide its effective corrosion protection using modern technology.

Роботу виконано за фінансової підтримки Фонду фундаментальних досліджень Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України, проект № Ф 39/28-2013 «Дослідження структурного, механічного та корозійного стану тривало експлуатованих об'єктів типу гіперболоїдних веж Шухова».

Список використаної літератури

1. Петропавловская, И.А. Ажурная башня Шухова и сетчатые сооружения гиперболоидного типа [Текст] / И.А. Петропавловская // Шухов В.Г. (1853 – 1939). Искусство конструкции: пер. с нем.; под ред. Р. Граефе, М. Гаппоева, О. Перчи. – М.: Мир, 1995. – С. 78 – 91.
2. Kutnyí, A. Tanz der Eisentürme auf dem Wasser. Baugeschichte zweier Leuchttürme am Schwarzen Meer [Текст] / A. Kutnyí // Kurze Berichte aus der Bauforschung, – 2013. – N 2 – P. 38 – 48.
3. Черкаська гіперболоїдна вежа [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Файл:Гіперболоїдна_башта_\(Черкаси\).jpg](http://uk.wikipedia.org/wiki/Файл:Гіперболоїдна_башта_(Черкаси).jpg).
4. Suchomelly, D. Ukrainian Lighthouse included in recent study / D. Suchomelly // Promoting, Preserving & Protecting the World's Lighthouses, World Lighthouse Society. – 1st Quarter 2012, Vol. 10, N 1. – P. 25 – 26.
5. Діагностування стану експлуатованих понад 100 років сітчастих гіперболоїдних веж В.Г. Шухова [Текст] / Г. Никифорчин, А. Кутний, Т. Кремінь та ін. // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: 3-я Міжнар. наук.-техн. конф., 7 – 9 листопада 2012 р.: тези допов. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, – 2012. – С. 7 – 8.
6. Діагностування стану експлуатованих понад 100 років сітчастих гіперболоїдних веж В. Г. Шухова [Текст] / Г. Никифорчин, А. Кутний, Т. Кремінь та ін. // Машинознавство. – 2013. – № 1 – 2 (187 – 188). – С. 15 – 19.
7. Konstruktionswissen der frühen Moderne Šuchovs Strategien des sparsamen Eisenbaus: D-A-CH Forschungsprojekt 2010 – 2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://archiv-baukunst.uibk.ac.at/download/graefe/SuchovsStrategiendesparsamenEisenbaus.pdf>.
8. Лугченко, О. І. Будівельні конструкції. Частина 1. Металеві конструкції [Текст] / О. І. Лугченко. – Харків: ХНАМГ, 2006. – 159 с.
9. Шрайер, Л.Л. Коррозия: справочник [Текст] / Л.Л. Шрайер. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.
10. Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process [Текст] / T. Tsuru, Y. Huang, M. R. Ali et al. // Corrosion Science. – 2005. – Vol. 47, N 10. – P. 2431 – 2440.

Отримано 29.08.2013