УДК 620.197.3

СИНЕРГІЧНИЙ ВПЛИВ КОМПОЗИЦІЇ ДЕКСТРИНУ ТА НАТРІЮ ІЗОАСКОРБАТУ НА ІНГІБУВАННЯ КОРОЗІЇ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ В ХЛОРИДОВМІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

М. Б. ТИМУСЬ [1], *І. М. ЗІНЬ* [1,2], *В. І. ФЕДОРІВ* [1], *С. А. КОРНІЙ* [1]

[1] *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*

[2] *Національний університет "Львівська політехніка"*

Методами потенціодинамічної поляризації, електрохімічної імпедансної спектроскопії, сканувальної електронної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу досліджено інгібування корозії вуглецевої сталі екологічно безпечною інгібіторною композицією на основі декстрину та натрію ізоаскорбату. Встановлено, що ефективність корозійного захисту вуглецевої сталі в 0,1%-му розчині хлориду натрію перевищує 90%. Механізм захисної дії композиції, ймовірно, полягає в адсорбції молекул декстрину через координаційні зв'язки між його гідроксильними групами та поверхнею металу. Ущільнення захисної органічної плівки додатково забезпечено утворенням малорозчинних хелатних сполук між аскорбат-аніонами та катіонами заліза. Розроблена композиція виготовлена з відновлюваної рослинної сировини та придатна для ефективного захисту сталевих конструкцій і виробів від корозії в нейтральних корозивних середовищах.

Ключові слова: *вуглецева сталь, хлоридовмісний розчин, інгібування корозії, декстрин, ізоаскорбат натрію, адсорбція, органічна плівка, ефективність інгібування.*

The corrosion inhibition of carbon steel by an environmentally safe inhibitory composition based on dextrin and sodium isoascorbate was studied using potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, and energy-dispersive X-ray analysis. The results showed that the corrosion protection efficiency of carbon steel in a 0.1% sodium chloride solution exceeds 90%. The protective mechanism of the composition is likely attributed to the adsorption of dextrin molecules through coordination bonds between its hydroxyl groups and the metal surface. The compaction of the protective organic film is further enhanced by the formation of poorly soluble chelate compounds between ascorbate anions and iron cations. The developed composition, derived from renewable plant-based raw materials, can provide effective corrosion protection for steel structures and products in neutral corrosive environments.

Keywords: *mild steel, chloride solution, corrosion inhibition, dextrin, sodium isoascorbate, adsorption, organic film, inhbiting effiectiveness.*

Вступ. Вуглецева сталь є важливим конструкційним матеріалом, яку широко застосовують у машинобудуванні, нафтовидобуванні, сільському господарстві, транспорті тощо. Однак у природних умовах конструкції з вуглецевої сталі піддаються електрохімічній корозії, що погіршує їхні міцнісні характеристики [1]. Одним із найефективніших методів протикорозійного захисту сталі є використання інгібіторів корозії [2–6]. Наразі застосовують переважно синтетичні органічні інгібітори, які часто є дорогими та небезпечними для навколишнього середовища. Тому дослідження в Україні та за кордоном спрямовані на пошук та застосування екологічно безпечних інгібіторів, які за ефективністю не поступаються

Контактна особа: С. А. КОРНІЙ, e-mail: korniy_sergiy@ukr.net

відомим синтетичним сполукам. Серед таких інгібіторів виділяють полісахариди, які є екологічно безпечними та економічно вигідними [7–11].

Одним із представників цього класу є біополімер декстрин (ДК), який отримують нагріванням крохмалю з невеликою кількістю вологи та кислоти. До природних сполук декстрину належать мальтодекстрин, амілодекстрин, α,β-декстрин, молекули яких є циклічними та сильно розгалуженими [12]. Молекулярна структура цього біополімеру складається з ланок глюкози, з'єднаних глікозидним зв'язком. Декстрин та його похідні використовують у різних галузях – харчовій, фармацевтичній та текстильній промисловостях, як компоненти клеїв, загусники, зв'язувальні речовини, стабілізатори тощо [12]. Недавні дослідження свідчать про перспективу використання декстрину та його похідних для створення інгібіторів корозії [12–14].

Декстрин, як інгібітор корозії, здебільшого досліджували в кислих середовищах [7, 12–14]. Проте вуглецеву сталь найчастіше використовують у нейтральних середовищах, де ефективність цього полісахариду є недостатньою. Для підвищення протикорозійної дії декстрин модифікують або застосовують разом із синергічними додатками. Як синергісти використовують карбоксилати або інші органічні сполуки, які в поєднанні з біополімерами ефективні в хлоридовмісних середовищах [8–11]. Наприклад, дослідження [15] підтверджують високі інгібувальні властивості L-аскорбінової кислоти для сталевої арматури в цементному розчині, який містить хлориди. Встановлено [16], що застосування натрію ізоаскорбату (НІА) в поєднанні з декстрином збільшує корозійну тривкість алюмінієвого сплаву в хлоридовмісному середовищі, забезпечуючи інгібувальну ефективність 98%. Мета роботи – посилити інгібувальні властивості олігосахариду декстрину щодо електрохімічної корозії вуглецевої сталі в нейтральному корозивному середовищі додаванням натрію ізоаскорбату як співсинергіста.

Матеріали та методи дослідження. Вивчали корозію вуглецевої сталі в 0,1%-му розчині NaCl, неінгібованому та за додавання невеликих кількостей природного полісахариду декстрину і натрію ізоаскорбату, придбаних у ПП "Система Оптимум", а також їхніх композицій. Інгібіторні композиції створювали у співвідношенні ДК:НІА 1:1. Сумарні концентрації композицій у корозивному розчині становили 1, 2, 3 і 4 g/l. Відомо [9, 11], що такі концентрації є ефективними для захисту сталі полісахаридами. Структурні формули декстрину та натрію ізоаскорбату подані на рис. 1. Всі дослідження виконували на сталі 20 такого хімічного складу (ДСТУ 7809) (mass%): 0,17…0,24 C; 0,17…0,37 Si; 0,35…0,65 Mn; ≤ 0,035 P; ≤ 0,04 S; ≤ 0,25 Cr; ≤ 0,3 Cu; ≤ 0,3 Ni; решта – Fe.

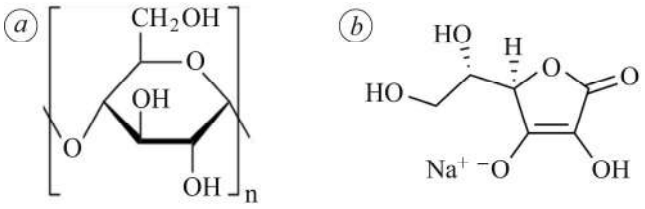


Рис. 1. Структурні формули декстрину (*a*) та натрію ізоаскорбату (*b*).

Fig. 1. Structural formulas of dextrin (DC) (*a*) and sodium isosorbate (SIA) (*b*).

Для зняття поляризаційних залежностей сталі 20 в інгібованих розчинах використовували потенціостат Gill AC у потенціодинамічному режимі та триелектродну комірку: електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1, робочий – сталь 20, допоміжний – платиновий. Швидкість розгортки потенціалу 2 mV/s. Густину струму корозії металу визначали екстраполяцією ділянок Тафеля на поляризаційних кривих за допомогою комп'ютерної програми АСМ Analysis v4. Площа робочої поверхні зразків сталі 1 cm^2. Зразки металу перед зануренням у

корозивне середовище зачищали шліфувальним папером марки Р320 та знежирювали ацетоном.

Ефективність інгібування корозії сталі досліджували методом електрохімічної імпедансної спектроскопії за потенціалу відкритого кола у діапазоні частот від 10000 до 0,01 Hz. Амплітуда прикладеного сигналу 10 mV. Поверхню зразків сталі після витримки в корозивних середовищах обстежували на мікроскопі Chronos зі збільшенням у 50 разів та досліджували на сканувальному електронному мікроскопі Zeiss EVO-40XVP зі системою рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу INCA Energy 350.

Імпедансні залежності для вуглецевої сталі 20, отримані після 24 та 168 h експозиції у неінгібованому 0,1%-му розчині NaCl та з додаванням композиції ДК + НІА, моделювали за допомогою програми EIS Spectrum Analyzer та електричного еквівалентного кола (рис. 2).

Рис. 2. Електричне еквівалентне коло, яке моделює корозію сталі в 0,1% NaCl, де R_s, R_{ct} – опори корозивного середовища та переносу заряду металу, Q_{dl} – ємність електричного подвійного шару на металі, яка виражена через елемент сталої фази.

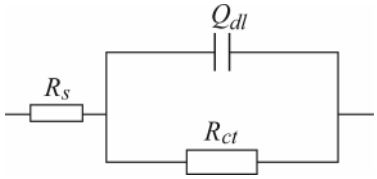


Fig. 2. An electric equivalent circuit used to model steel corrosion in a 0.1% NaCl solution, where R_s and R_{ct} represent the resistances of corrosion solution and the charge transfer of the metal, respectively, and Q_{dl} represents the capacitance of the electric double layer on the metal, expressed as a constant phase element.

Інгібувальну ефективність композицій на основі декстрину визначали за формулою

$$\eta = \frac{R_{ct} - R_{ct0}}{R_{ct}} \cdot 100\%,$$

де R_{ct}, R_{ct0} – опори переносу заряду металу в середовищі з композицією на основі біополімеру та в неінгібованому середовищі, відповідно.

Результати досліджень та їх обговорення. Знімали частотні імпедансні залежності маловуглецевої сталі після 24 h експозиції в 0,1% NaCl за додавання кожного з інгібіторів ДК та НІА окремо (рис. 3).

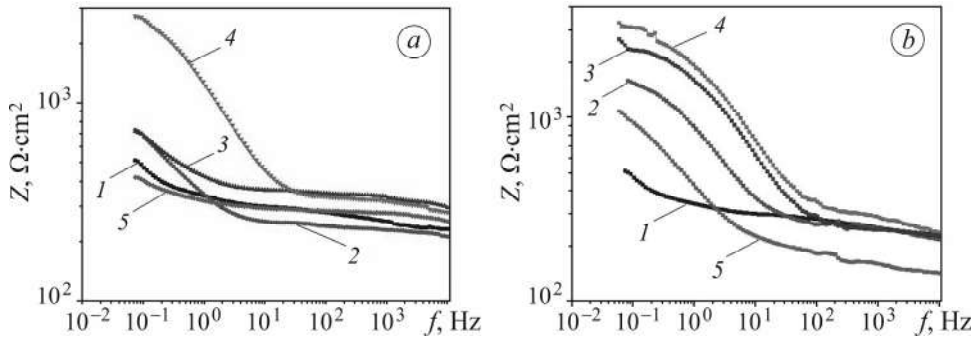


Рис. 3. Імпедансні залежності вуглецевої сталі після експозиції 24 h за додавання окремо ДК (*a*) та НІА (*b*) в 0,1% NaCl: *1* – без інгібіторів; *2* – 0,5 g/l; *3* – 1; *4* – 1,5; *5* – 2 g/l.

Fig. 3. Impedance dependences of carbon steel after 24 h exposure to 0.1% NaCl solution in the presence of DC (*a*), SIA (*b*): *1* – without inhibitors; *2* – 0.5 g/l; *3* – 1; *4* – 1.5; *5* – 2 g/l.

Встановлено (рис. 3*a*), що сталь найменше кородує в 0,1%-му розчині NaCl з вмістом 1,5 g/l ДК. Це підтверджується найвищим значенням модуля імпедансу за частоти 0,1 Hz ($Z_{0,1}$), яке становить $2{,}6\cdot10^3$ Ω·cm^2. Водночас значення модуля $Z_{0,1}$ в інших середовищах, інгібованих ДК, знаходяться в межах $(4{,}7\ldots6{,}8)\cdot10^2$ Ω·cm^2. За окремого додавання до хлоридного розчину 1,5 g/l інгібітора НІА для вуглецевої сталі досягнуто найвищих значень – $Z_{0,1} = 3{,}1\cdot10^3$ Ω·cm^2 (рис. 3*b*). Проте зі збільшенням концентрації НІА до 2 g/l ця імпедансна характеристика сталі знизилася, що, можливо, пов'язано з особливостями адсорбції інгібітора або його надлишковим вмістом у розчині. Отже, за концентрації 2 g/l за окремого використання як ДК, так і НІА, спостерігаємо погіршення інгібувальних властивостей. У випадку ДК це, ймовірно, пов'язано з його здатністю підкислювати середовище (pH 4,5), тоді як для НІА (pH 7) – із досягненням критично допустимої концентрації [15]. За сумісного використання біополімеру ДК та НІА pH середовища 6,2…6,5.

Додавання до 0,1%-го розчину NaCl композиції біополімеру ДК та НІА за масового співвідношення 1:1 призвело до підвищення корозійної стійкості сталі: зросли інгібувальна ефективність та модуль імпедансу (рис. 4). Значення $Z_{0,1}$ сталі залежно від концентрації композиції в корозивному розчині було в діапазоні $(1{,}6\ldots6{,}1)\cdot10^3$ Ω·cm^2. За використання композиції (ДК + НІА) у співвідношенні 1:1 за концентрації по 1,5 g/l спостерігали збільшення в два рази цього параметра порівняно зі значеннями в окремих розчинах ДК і НІА та в 12 разів − відносно неінгібованого розчину (рис. 4*a*). Ефективність захисту металу досліджуваною композицією 60…94% (табл. 1). Слід зазначити, що після 24 та 168 h експозиції характеристики захисту сталі від корозії $Z_{0,1}$, η та опір перенесенню заряду (R_{ct}) найвищі для композиції ДК + НІА (1:1) за їх концентрації по 1,5 g/l (рис. 4*b*).

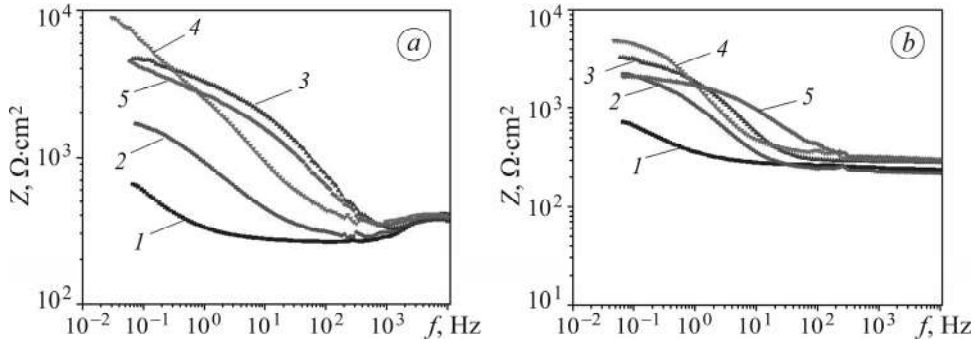


Рис. 4. Імпедансні залежності вуглецевої сталі після експозиції 24 (*a*) та 168 h (*b*) в 0,1% NaCl, інгібованому композицією ДК + НІА (1:1):
1– без інгібіторів; *2* – по 0,5 g/l; *3* – 1; *4* – 1,5; *5* – 2 g/l.

Fig. 4. Impedance dependences of carbon steel after 24 (*a*) and 168 h (*b*) exposure to 0.1% NaCl inhibited by the composition DC + SIA (1:1):
1 – without inhibitors; *2* – 0.5 g/l; *3* – 1; *4* – 1.5; *5* – 2 g/l each.

Отримані імпедансні залежності змоделювали з використанням електричного еквівалентного кола (рис. 2) та програми EIS Spectrum Analyser. За додавання різних концентрацій композиції ДК + НІА опір перенесенню заряду сталі суттєво зріс порівняно зі значенням у неінгібованому середовищі.

Згідно з результатами табл. 1, за присутності в корозивному розчині 3 g/l композиції ДК + НІА (1:1) та експозиції 24 h опір R_{ct} вуглецевої сталі $1{,}1\cdot10^4$ Ω·cm^2, що на два порядки вище порівняно зі значенням у неінгібованому розчині. За експозиції 168 h опір R_{ct} сталі $5{,}2\cdot10^3$ Ω·cm^2, що приблизно в 6,5 рази вище порівняно з неінгібованим середовищем. Також за додавання 3 g/l композиції ДК + НІА (1:1) після 24 h встановлено зменшення провідності Y_0(Q_{dl}) порівняно з неінгібо-

ваним розчином, що свідчить про утворення на поверхні захисної плівки. Водночас в 0,1% NaCl провідність $Y_0(Q_{dl})$ збільшилася до $3{,}1\cdot10^{-3}$ $s^n/(\Omega\cdot cm^2)$ внаслідок корозійного руйнування поверхні сталі 20 та утворення продуктів окиснення.

Таблиця 1. Характеристики еквівалентного електричного кола, розраховані на основі імпедансних спектрів вуглецевої сталі в 0,1% NaCl та інгібованих розчинах за витримки 24 h / 168 h

Номер кривої (рис. 4)	R_{ct}, $\Omega\cdot cm^2$	$Y_0(Q_{dl})$, $s^n/(\Omega\cdot cm^2)$	$n(Q_{dl})$	R_s, $\Omega\cdot cm^2$	η, %
1	680 / 800	$3{,}1\cdot10^{-3}$ / $2{,}1\cdot10^{-3}$	0,55 / 0,62	239 / 260	– / –
2	1700 / 2290	$3{,}4\cdot10^{-4}$ / $2{,}3\cdot10^{-4}$	0,61 / 0,74	300 / 225	60 / 65
3	4600 / 3232	$3{,}6\cdot10^{-5}$ / $1{,}1\cdot10^{-4}$	0,61 / 0,75	480 / 250	85 / 75
4	10690 / 5181	$1{,}4\cdot10^{-5}$ / $1{,}4\cdot10^{-5}$	0,55 / 0,55	360 / 347	94 / 85
5	4600 / 2100	$6{,}2\cdot10^{-5}$ / $4{,}7\cdot10^{-4}$	0,56 / 0,56	390 / 377	85 / 62

Примітка: $Y_0(Q_{dl})$, $n(Q_{dl})$ – провідність та показник степеня елемента сталої фази Q_{dl}, відповідно; R_s – опір корозивного середовища.

Максимуми фазового кута θ для сталі після 24 та 168 h витримки в 0,1%-му розчині NaCl, інгібованому 1…4 g/l композиції ДК + НІА (1:1), знаходилися в межах 30…54° (рис. 5). Водночас у неінгібованому хлоридовмісному розчині цей кут ~ 25°. Характерно, що композиція ДК + НІА (1:1) з концентрацією 3 g/l забезпечувала найбільше значення максимуму фазового кута після 168 h експозиції (рис. 5*b*). У всіх розчинах, інгібованих композицією ДК + НІА, спостерігали зміщення максимуму фазового кута θ в діапазон середніх частот 2…100 Hz за експозиції 24 h та в діапазон 1…30 Hz за 168 h порівняно зі значенням максимуму θ за 0,1 Hz у неінгібованому 0,1% NaCl. Зміщення максимумів θ в область вищих частот вказує на формування органічної адсорбційної плівки на поверхні сталі, яка знижує швидкість корозійних процесів.

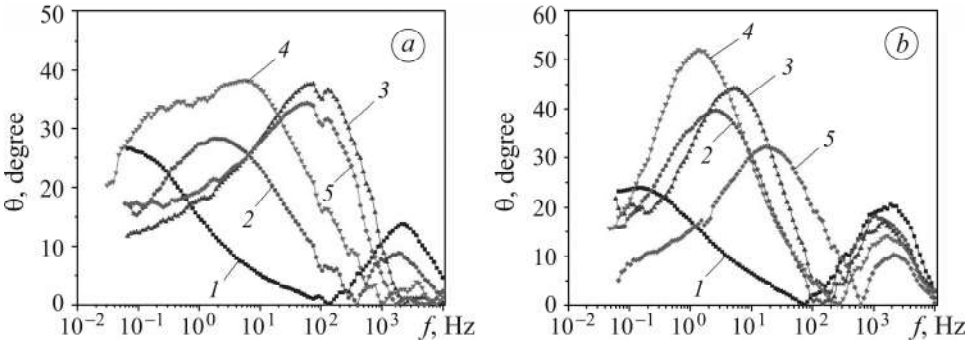


Рис. 5. Залежності фазового кута зразків сталі 20 після 24 (*a*) та 168 h (*b*) експозиції в 0,1% NaCl, інгібованому композицією ДК + НІА (1:1):
1 – без інгібіторів; *2* – по 0,5 g/l; *3* – 1; *4* – 1,5; *5* – 2 g/l.

Fig. 5. Dependences of the phase angle of steel 20 samples after 24 h (*a*) and 168 h (*b*) exposure to 0.1% NaCl inhibited by the composition DC + SIA (1:1):
1 – without inhibitors; *2* – 0.5 g/l; *3* – 1; *4* – 1.5; *5* – 2 g/l each.

Результати поляризаційних досліджень (рис. 6) узгоджуються з результатами імпедансної спектроскопії, зокрема, за обчисленими значеннями інгібувальної ефективності. За експозиції 24 h густина струму корозії i_{corr} в 0,1% NaCl, інгібованому 3 g/l композиції ДК + НІА, зменшилася на два порядки порівняно зі значен-

ням у неінгібованому (табл. 2), а в інших інгібованих розчинах – приблизно у десять разів. Також спостерігали незначне зміщення потенціалів корозії сталі в область негативніших значень порівняно з неінгібованим середовищем. При цьому корозійний процес перебував під змішаним катодно-анодним контролем.

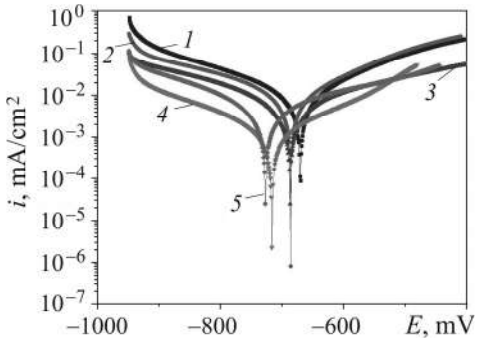


Рис. 6. Поляризаційні криві сталі 20 після 24 h експозиції в 0,1% NaCl, інгібованому композицією ДК + НІА (1:1): *1* – без інгібіторів; *2* – по 0,5 g/l; *3* – 1; *4* – 1,5; *5* – 2 g/l.

Fig. 6. Polarization curves of steel 20 after 24 h exposure to 0.1% NaCl inhibited by the composition DC + SIA (1:1): *1* – without inhibitors; *2* – 0.5 g/l; *3* – 1; *4* – 1.5; *5* – 2 g/l each.

Таблиця 2. Електрохімічні характеристики маловуглецевої сталі в неінгібованому та інгібованих композицією ДК + НІА (1:1) розчинах

Номер кривої (рис. 6)	24 h		
	E_{corr}, mV	i_{corr}, mA/cm^2	η, %
1	–672	$1{,}4\cdot10^{-2}$	–
2	–688	$5{,}7\cdot10^{-3}$	59
3	–686	$2{,}5\cdot10^{-3}$	82
4	–718	$9{,}8\cdot10^{-4}$	93
5	–725	$2{,}2\cdot10^{-3}$	84

Щоб з'ясувати природу взаємодії між композиційною інгібіторною системою ДК + НІА і поверхнею вуглецевої сталі, оцінили кілька типів ізотерм адсорбції. Найкраще наближення експериментальних результатів отримали для ізотерми адсорбції Ленгмюра (рис. 7), де врахована еквівалентність усіх центрів адсорбції (коефіцієнт кореляції R^2 = 0,9659). Згідно з цією моделлю, ступінь покриття поверхні дорівнює ефективності інгібітора η, отриманій з поляризаційних потенціодинамічних залежностей, і пов'язаний з концентрацією C інгібіторної системи ДК + НІА (1:1) так [14]:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C\,; \quad \theta = \frac{\eta}{100},$$

де θ – ступінь покриття поверхні, %; C – концентрація інгібіторної системи ДК + НІА (1:1); K_{ads} – константа рівноваги адсорбції-десорбції.

Зв'язок між вільною енергією адсорбції Гіббса ΔG^0_{ads} та константою адсорбційно-десорбційної рівноваги K_{ads} описуємо залежністю

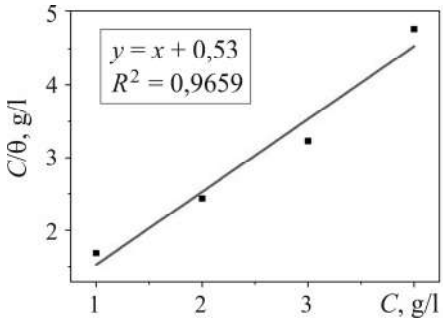
$$\Delta G^0_{ads} = R \cdot T \cdot l \cdot n \cdot 10^3 K_{ads},$$

де R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура, K.

Вільна енергія Гіббса для інгібіторної композиції ДК + НІА становила −20,79 kJ/mol. Від'ємне значення ΔG^0_{ads} свідчить про спонтанну адсорбцію інгібіторної композиції ДК + НІА на поверхні вуглецевої сталі в 0,1%-му розчині NaCl. Абсолютне значення вільної енергії Гіббса є в межах 20...40 kJ/mol, що вказує на домінування фізичної адсорбції інгібіторної композиції на поверхні металу [17–19]. Однак значення −20,79 kJ/mol також може свідчити про певний внесок хімічної адсорбції у процес.

Рис. 7. Ізотерма адсорбції Ленгмюра для інгібіторної композиції ДК + НІА на сталі 20 в 0,1%-му розчині NaCl.

Fig. 7. Langmuir adsorption isotherm for the inhibitory composition DC + SIA on steel 20 in 0.1% NaCl solution.



Огляд поверхні сталі за допомогою USB-мікроскопа за збільшення у 50 разів після 168 h експозиції виявив значну корозію металу в 0,1%-му неінгібованому розчині NaCl (рис. 8). У розчинах з 1 та 2 g/l композиції ДК + НІА інтенсивність корозії сталі суттєво знижується (рис. 8*b*, *c*). Концентрація 3 g/l композиції ДК + НІА в 0,1% NaCl показала найвищу ефективність у захисті сталі – поверхня зовсім не містить продуктів корозії та має характерний металевий блиск (рис. 8*d*), що узгоджується з результатами імпедансних та поляризаційних досліджень. За вмісту композиційної системи 4 g/l ДК + НІА (1:1) поверхня металу зазнала незначного ураження корозією (рис. 8*e*), що пояснюємо підкисленням середовища під дією декстрину.

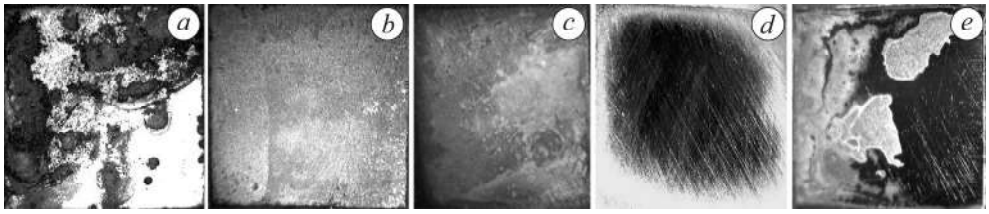


Рис. 8. Поверхня вуглецевої сталі після 168 h експозиції в розчинах:
a – без інгібіторів; *b* – по 0,5 g/l; *c* – 1; *d* – 1,5; *e* – 2 g/l ДК + НІА (×50).

Fig. 8. Surface of carbon steel after 168 h exposure to solutions:
a – without inhibitors; *b* – 0.5 g/l; *c* – 1; *d* – 1.5; *e* – 2 g/l DC + SIA (×50).

Методами сканувальної електронної мікроскопії та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії досліджено морфологію та хімічний склад поверхні сталі після 24 h експозиції в неінгібованому та інгібованому 3 g/l композицією ДК + НІА (1:1) розчинах (рис. 9).

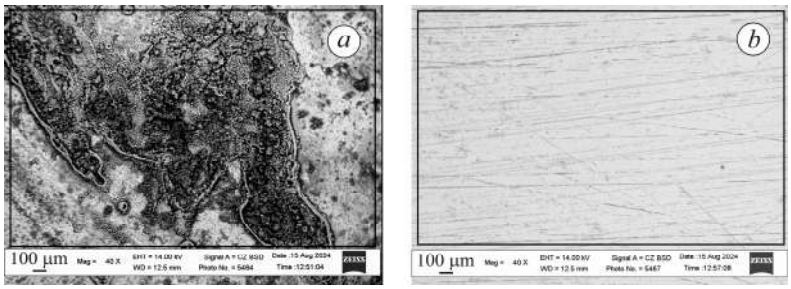


Рис. 9. Поверхня сталі 20 після 24 h експозиції в 0,1% NaCl (*a*)
та інгібованому композицією ДК + НІА (1:1) з концентрацією 3 g/l (*b*).

Fig. 9. Surface of steel 20 after 24 h exposure to 0.1% NaCl solution (*a*)
and inhibited by the composition DC + SIA (1:1) at a concentration of 3 g/l (*b*).

Встановлено (рис. 9, табл. 3), що в неінгібованому розчині поверхня сталі повністю вкрита продуктами корозії, які складаються з оксидів та гідроксидів заліза. Крім того, у складі поверхневої плівки виявлено хлор. За експозиції в середовищі, інгібованому композицією ДК + НІА (1:1) з концентрацією 3 g/l, на поверхні металу слідів корозії не спостерігаємо завдяки утворенню стійкої захисної плівки.

Таблиця 3. Елементний склад поверхні сталі після 168 h експозиції

Середовище	Вміст, wt%				
	C	O	Na	Fe	Cl
0,1% NaCl	–	15,33	0,64	83,06	0,97
ДК + НІА (1:1), 3 g/l	7,13	2,00	0,73	90,14	–

Енергодисперсійний рентгенівський аналіз поверхні сталі після витримки в розчині, інгібованому синергічною композицією 3 g/l ДК + НІА, показав зменшення вмісту кисню до 2 wt% та збільшення вуглецю до 7,13 wt%. Це свідчить про формування на поверхні корозійностійкої органічної захисної плівки на основі декстрину та ізоаскорбату. Водночас у неінгібованому розчині вміст кисню становив 15,33 wt%, а вуглець відсутній (табл. 3), що вказує на утворення оксидів заліза на поверхні сталі.

Підвищену корозійну стійкість органічної плівки на сталі, утвореної в результаті дії синергічної інгібіторної композиції, можна пояснити адсорбцією декстрину завдяки встановленню координаційних зв'язків між його гідроксильними групами та поверхнею металу [20, 21]. Додаткове ущільнення утвореної захисної органічної плівки досягнуто формуванням малорозчинних хелатних сполук між аскорбат-аніонами ($C_6H_7O_6^-$) та катіонами заліза Fe^{2+} і Fe^{3+} [20–23].

ВИСНОВКИ

Встановлено високу ефективність інгібування корозії вуглецевої сталі в 0,1%-му розчині хлориду натрію за використання оптимальної концентрації інгібіторної композиції, яка поєднує біополімер декстрин і натрій ізоаскорбат сумарною кількістю 3 g/l. На поверхні зразків утворюється щільна органічна адсорбційна плівка, яка забезпечує протикорозійний захист металу з ефективністю 94%. Механізм захисної дії композиції, ймовірно, полягає в адсорбції біополімеру декстрину через координаційні зв'язки між його гідроксильними групами та поверхнею металу. Додаткове ущільнення захисної органічної плівки забезпечується малорозчинними хелатними сполуками аскорбат-аніонів із катіонами заліза. Практичне значення дослідження полягає в розробленні екологічно безпечної композиції на основі відновлюваної рослинної сировини, придатної для захисту сталевих конструкцій та виробів від корозії.

1. *Li C.-Q. and Yang W.* Steel Corrosion and Degradation of its Mechanical Properties. – London: CRC Press, 2021. – 238 p. https://doi.org/10.1201/9781003119791
2. *Lahiri A. K.* Applied Metallurgy and Corrosion Control: A Handbook for the Petrochemical Industry. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2017. – 558 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4684-1
3. *Research* on corrosion inhibitors for acid stimulation / E. Barmatov, J. Geddes, T. Hughes, and M. Nagl // Proc. of the CORROSION 2012 (Salt Lake City, USA, 11–15 March 2012). – Salt Lake City, 2012. – **6**. – P. 4604–4623.
4. *Papavinasam S.* Corrosion inhibitors // Uhlig's Corrosion Handbook / Ed. R. W. Revie. – Hoboken: Wiley, 2011. – P. 1021–1032. https://doi.org/10.1002/9780470872864.ch71
5. *Corrosion* inhibitor binding in an acidic medium: Interaction of 2-mercaptobenizmidazole with carbon-steel in hydro-chloric acid / P. Morales-Gil, M. S. Walczak, R. A. Cottis, J. M. Romero, and R. Lindsay // Corr. Sci. – 2014. – **85**. – P. 109–114. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.003

6. *Gerengi H. and Sahin H. I.* Schinopsis lorentzii extract as a green corrosion inhibitor for low carbon steel in 1 M HCl solution // Industrial & Eng. Chemistry Research. – 2012. – **51**, № 2. – P. 780–787. doi:10.1021/ie201776q
7. *Zehra S., Mobin M., and Verma C.* Biopolymers in Sustainable Corrosion Inhibition. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – 278 p. https://doi.org /10.1201/9781003400059
8. *Corrosion* inhibition of aluminum alloy by a composition of guar gum and tartrate / M. Tymus, I. Zin, O. Khlopyk, V. Pokhmurskii, M. Holovchuk, and S. Korniy // Materials Science. – 2022. – **57**, № 5. – P. 679–687. https://doi.org/10.1007/s11003-022-00595-w
9. *Steel* corrosion inhibition by microbial polysaccharide and tartrate mixture / S. Korniy, I. Zin, M. Tymus, O. Khlopyk, and M. Holovchuk // J. of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2022. – **8**, № 6. – P. 1–8. https://doi.org/10.1007/s40735-021-00605-5
10. *Aluminum* alloy corrosion inhibition with a composition of guar gum and potassium sorbate / O. P. Khlopyk, I. M. Zin, M. B. Tymus, M. Ya. Golovchuk, and O. S. Kalakhan // Materials Science. – 2023. – **59**, № 3. – P. 283–288. https://doi.org/10.1007/s11003-024-00774-x
11. *Danyliak M.-O. M., Zin I. M., and Korniy S. A.* Corrosion inhibition of low-alloy carbon steel by gum Arabic and zinc acetate in neutral chloride-containing environment // J. of Industrial and Eng. Chemistry. – 2024. – **129**. – P. 267–277. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.08.039
12. *Umoren S. A. and Eduok U. M.* Application of carbohydrate polymers as corrosion inhibitors for metal substrates in different media: A review // Carbohydrate Polymers. – 2016. – **140**. – P. 314–341. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.038
13. *Aslam J., Yerma C., and Aslam R.* Grafted Biopolymers as Corrosion Inhibitors. Safety, Sustainability, and Efficiency. – Pondicherry: John Wiley & Sons, 2023. – 496 p.
14. *Analysis* of the anti-corrosion performance of dextrin and its graft copolymer on J55 steel in acid solution / M. Liu, D. Xia, A. Singh, Y. Lin // Processes. – 2021. – **9**, № 9. – P. 1642. https://doi.org/10.3390/pr9091642
15. *L-ascorbic* acid as an efficient green corrosion inhibitor of steel rebars in chloride contaminated cement mortar / C. Argiz, C. Arroyo, A. Bravo, A. Moragues, C. Andrade, and F. Bolzoni // Materials. – 2022. – № 15. – P. 2–19. https:// doi.org/10.3390/ma15228005
16. *Тимусь М. Б., Зінь І. М., Корній С. А.* Інгібування корозії алюмінієвого сплаву в хлоридовмісному середовищі композицією на основі декстрину та натрію ізоаскорбату // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2024. – **60**, № 4. – С. 129–136.
17. *Muthukrishnan P., Jeyaprabha B., and Prakash P.* Adsorption and corrosion inhibiting behavior of Lannea coromandelica leaf extract on mild steel corrosion // Arabian J. of Chemistry. – 2017. – № 10. – P. 2343–2354. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.011
18. *Donahue F. M. and Nobe K.* Theory of organic corrosion inhibitors. Adsorption and linear free energy relationships // J. of the Electrochem. Soc. – 1965. – **112**. – P. 886–891. https://doi.org/10.1149/1.2423723
19. *Gum* arabic as a potential corrosion inhibitor for aluminium in alkaline medium and its adsorption characteristics / S. A. Umoren, I. B. Obot., E. E. Ebenso, P. C. Okafor, O. Ogbobe, and E. E. Oguzie // Anti-Corrosion Methods and Mater. – 2006. – **53**. – P. 277–282. https://doi.org/10.1108/00035590610692554
20. *Liu Q. and Laskowski J. S.* The interactions between dextrin and metal hydroxides in aqueous solutions // J. of Colloid and Interface Sci. – 1989. – **130**, № 1. – P. 101–111. https://doi.org/10.1016/0021-9797(89)90081-7
21. *Raju G. B., Holmgren A., and Forsling W.* Adsorption of dextrin at mineral/water interface // J. of Colloid and Interface Sci. – 1997 – **193**, № 2. – P. 215–222. https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5004
22. *Experimental* and theoretical study of the complexation of Fe^{3+} and Cu^{2+} by L-ascorbic acid in aqueous solution / A. G. Ritacca, L. Malacaria, E. Sicilia, E. Furia, and G. Mazzone // J. of Molecular Liquids. – 2022. – **355**. – P. 1–7. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118973
23. *The inhibition* activity of ascorbic acid towards corrosion of steel in alkaline media containing chloride ions / L. Valek, S. Martinez, D. Mikulić, and I. Brnardić // Corr. Sci. – 2008. – **50**, № 9. – P. 2705–2709. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.018

Одержано 07.10.2024