

УДК 620.197.3

КОРОЗИЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА ДІЇ N, S-ВМІСНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ

О. І. СИЗА¹, Ю. В. КВАШУК¹, О. О. КОРОЛЬОВ², В. А. ДМИТРІВ²,
А. Г. ПАВЛЕНКО², О. М. САВЧЕНКО¹

¹ Національний університет "Чернігівський колегіум" імені Т. Г. Шевченка;

² Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів

Встановлено, що водні розчини N, S-вмісних мінеральних добрив спричиняють інтенсивні корозійні пошкодження сталей 20 та Ст3, що впливає на термін експлуатації конструкційних елементів техніки загального і спеціального призначення. Швидкість корозії сталі зростає у 6,9–11,3 разів порівняно з корозією у водогінній воді. Визначено, що зі збільшенням вмісту сульфуру у складі добрива до 5,32...5,34% і зниженням частки нітрогену корозійне руйнування сталі зменшується. Запропоновано підвищити протикорозійний захист сталевих конструкцій та техніки у середовищі N, S-вмісних мінеральних добрив, використавши екологічно безпечний інгібітор РС-ЧДТУ, виготовлений на основі продуктів переробки рослинної сировини України.

Ключові слова: корозія, N, S-вмісні мінеральні добрива, рослинний інгібітор.

It is established that aqueous solutions of N, S-containing mineral fertilizers cause intensive corrosion damage of steels 20 and Ст3, which affects the service life of communications and structural elements of general and special purpose equipment. The corrosion rate of steel increases in 6.9–11.3 times compared to corrosion in tap water. It is determined that with the increase of the sulfur content in the fertilizer composition to 5.32...5.34% and the decrease of the Nitrogen content, the corrosion fracture of steel decreases. It is proposed to increase the corrosion protection of steel communications, structures and equipment in the environment of N, S-containing mineral fertilizers through the use of environmentally friendly inhibitor РС-ЧДТУ, made on the basis of processed vegetable raw materials of Ukraine.

Key words: corrosion, N, S-containing mineral fertilizers, plant inhibitor.

Вступ. Відомо, що більшість мінеральних добрив сприяють корозійному руйнуванню металів. Це одна з ключових проблем, що призводить до виходу з ладу техніки загального і спеціального призначення, різного виду комунікацій та підземних металевих споруд, як цивільного, так і військового призначення. Згідно з ДСТУ 4219-2003, найвагомим чинником корозійного руйнування зовнішньої поверхні сталевих комунікацій є корозивна активність середовища (атмосфери, ґрунтів, ґрунтових та інших вод). Згубний вплив корозії призводить до втрат як самого металу, так і до того, що корозійний знос деталей вузлів і агрегатів знижує точність та надійність різних механізмів. Через корозійне руйнування на 40...45% знижується міцність вуглецевих сталей і сірого чавуну, в 2–4 рази збільшується зношування деталей. На усунення збитковості, яка виникає через втрату агрегатами і деталями своїх функціональних властивостей, щорічно припадає до 30% від загальних витрат на відновлення.

Встановлено, що насичені розчини мінеральних добрив (амонію сульфату та нітрофоски), на відміну від їх кристалічних концентратів, спричиняють інтенсивні локальні корозійні пошкодження сталей 20 та Ст3. Швидкість корозії при цьому сягає 0,29...0,33 mm/year і є в 2,2–2,5 рази вища, ніж у дистильованій воді [1]. Дослідили також вплив корозії та корозійно-втомного руйнування на зниження роботоздатності сільськогосподарських машин [2]. Але у цій області залишається достатньо питань, які потребують поглибленого вивчення.

Відомо, що для зменшення корозійної дії на метали в агресивні середовища доцільно додавати інгібітори. Аналіз широкого спектра інгібіторів показав, що більшість з них за токсикологічними показниками не відповідають екологічним та санітарно-гігієнічним вимогам. Тому перспективно досліджувати екологічно чисті інгібітори рослинного походження у складі мінеральних добрив [3–5].

Мета роботи – дослідити вплив кількісного складу рідких N, S-вмісних мінеральних добрив на корозійні руйнування конструкційних металів (сталі 20 і Ст3) та доцільність використання екологічно чистого інгібітора корозії в складі добрив.

Матеріали та методи. Використовували рідке мінеральне добриво – карбамідно-аміачну суміш марки КАС 32 (ТУ У 24.1-00203826.024-2002, густина 1340 kg/m³), яка містить: аміачну селітру, карбамід, воду та аміачну воду (0,5%). Відомо, що нітроген є головним чинником, який впливає на врожайність культур. Другий елемент за важливістю – це сульфур, який необхідний для нормального росту і розвитку рослин, незамінний під час синтезу білків. Дефіцит сульфору призводить до зниження ефективності засвоєння нітрогену, сприяє накопиченню нітратів у кінцевій продукції. За оцінками вчених, більшість орних угідь України потребують сульфурвмісних добрив. З огляду на все це, та, враховуючи синергізм їх дії, доцільно використовувати комбінацію елементів нітрогену і сульфору. Для дослідження варіювали співвідношення основних компонентів добрива і вносили різну кількість сульфору у склад мінеральних солей.

Для захисту від корозії використовували інгібітор РС-ЧДТУ, отриманий з рослинної сировини (зерен ріпаку) [5]. Для вилучення активних діючих речовин зі складу рослинної сировини застосовували ефективний, простий і дешевий метод хімічної екстракції – розчинення, десорбція та дифузія компонентів сировини. Водно-спиртові витяжки з зерен відфільтровували, упарювали у вакуумі, а сухий залишок піддавали спектральному аналізу (рис. 1). Спектральні дослідження здійснювали на рідинному хроматографі “Agilent 1100 Series”, обладнаному детекторами діодно-матричним, мас-селективним “Agilent LC\MSD SL 1956B” та лазерного світлорозсіювання ELSD 2000ES.

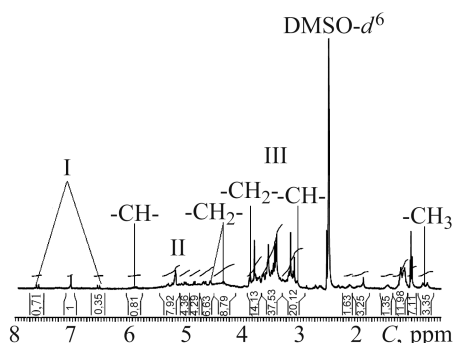


Рис. 1. Спектр ЯМР¹H діючих речовин інгібітора РС-ЧДТУ [6]:

I – ароматична частина; II – подвійні зв'язки; III – вуглеводна частина.

Fig. 1. The NMR spectrum of the active substances of the PC-ЧДТУ inhibitor [6]:

I – aromatic part;
II – double links;
III – carbohydrate part.

Інгібітор РС-ЧДТУ – рідина жовтого кольору з вмістом активних речовин 2%. Виявлено, що до його складу входять синігрин, прогоїтрин (2-гідрокси-3-бутеніл глікозинолат), за гідролізу якого утворюється гоїтрин (CH₂ – мультиплети в облас-

ті 4,3 і 4,6 ppm; СН – мультиплет 5,9 ppm; подвійний зв'язок – мультиплети 4,7 і 5,0 ppm).

Використали водогінну воду як основне середовище, що відповідає реальним умовам експлуатації сталевих конструкцій в природних умовах (рН – 7,2; мінералізація – 372,4 mg/l; загальна твердість – 4,7 mg-ekv/l; ферум загальний – 0,4 mg/l).

Корозійні випробування виконували на зразках сталі Ст3 гравіметричним та сталі 20 електрохімічним (потенціостат П-5827М та індикатор поляризаційного опору Р5126) методами [7–11].

Для вагового методу використовували зразки у вигляді прямокутних пластинок розміром 50,3×22,3×3,2 mm. Поверхню зразків послідовно шліфували на дрібнозернистому папері марок Р 240–Р 1200 (за ISO-6344), промивали в проточній воді і знежирювали. Після експозиції поверхню зразків очищали від продуктів корозії, промивали проточною водою, висушували, знежирювали і зважували.

Поляризаційні криві (20 mV/min) знімали від стаціонарного потенціалу на торцевому електроді зі сталі 20, впресованому у фторопластовий кожух, у скляній триелектродній електрохімічній комірці з розділеними катодним і анодним просторами. Електрод порівняння – хлоридсрібний, допоміжний – платиновий. Потенціал робочого електрода перераховували на стандартну водневу шкалу. За поляризаційними кривими визначали струми електрохімічної корозії (I_{corr}), катодного (I_c при $E_c = -0,45$ V) та анодного (I_a при $E_a = -0,29$ V) парціальних процесів. Швидкість корозії розраховували за формулою: $K_m = (m_1 - m_2) / S \cdot \tau$, де K_m – швидкість корозії, g/(m²·h); m_1 , m_2 – маса зразка до та після випробування, відповідно, g; S – площа поверхні зразка, m²; τ – тривалість дослідження, h. Ефективність дії інгібітора корозії оцінювали за ступенем захисту: $Z_m = [(K_m - K'_m) / K_m] \cdot 100$, %, де K_m , K'_m – швидкість корозії за втратою маси металу без та з інгібітором, відповідно, g/(m²·h).

Вимірювали профіль і параметри шорсткості до і після випробувань за допомогою профілографа-профілометра моделі 201. Параметри вимірювань під час запису профілограм – 5–14 клас за ГОСТ 27964-88 [9], критерій оцінки – R_a , похибка вертикального збільшення $\pm 4\%$, швидкість переміщення давача профілографа – 0,2 mm/min, номінальний радіус кривизни вершини алмазної голки – 0,002^{+0,002} mm.

Поляризаційні характеристики корозії отримували на індикаторі поляризаційного опору Р5126 [10]. Це двоелектродний електрохімічний перетворювач, до якого входять два ідентичні циліндричні електроди зі сталі 20 з \varnothing 6 mm, завдовжки 30 mm та площею 6 cm², відстань між ними 7 mm. Зразки шліфували на верстаті до досягнення показника шорсткості поверхні $\leq 0,8$, а потім знежирювали в ацетоні або спирті та зберігали в ексикаторі і, безпосередньо перед вимірюванням, закріплювали в електрохімічному перетворювачі.

Контролювали вміст і розподіл хімічних елементів у поверхневому шарі сталі Ст3 методом Оже-електронної спектроскопії (мікрозондування та мікропрофілювання) на Оже-спектрометрі AES-2000 приладового комбайна-лабораторії LAS-2000 (RIBER, Франція). Оже-спектри реєстрували з розподільовальною енергетичною здатністю 10 keV і обробляли на ЕОМ. Енергія первинного йонного пучка 1 keV, струм зонда $2,4 \cdot 10^{-8}$ А, інформацію брали з поверхні 20×20 μ m. Під час профілювання поверхню зразків бомбардували йонами аргону (йонне травлення) з енергією 4 keV. Швидкість травлення 4,0 nm/min. Похибка під час вимірювань на LAS-2000 – 15 ат.% (за внутрішнім стандартом) на рівні 10⁻¹% в шарі завтовшки 1...2 nm.

Візуальними спостереженнями фіксували оптичні характеристики робочих розчинів та зміни зовнішнього вигляду поверхні металу, при цьому відзначали

час початку появи продуктів корозії, їх розподіл по поверхні металу, забарвлення, адгезію тощо.

Використовуючи програму Microsoft Excel, статистичну обробку результатів досліджень здійснювали з ймовірністю 0,95, кількість вимірів $n = 3$.

Результати та їх обговорення. Щоб з'ясувати вплив сульфуру у складі N-вмісного добрива на корозійні процеси сталей, змінювали співвідношення нітрогену та сульфуру так, щоб загальний вміст діючих речовин був на рівні КАС-32 – в межах $32,00 \pm 0,05\%$ (Д). Вміст сульфуру в зразках добрив (Д1–Д6) поступово зростає, тоді як загальний вміст нітрогену – зменшується (табл. 1).

Таблиця 1. Склад досліджуваних N, S-вмісних мінеральних добрив (рН 7,0...7,5)

Діючі речовини, %	Д	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6
N _{nitrate}	7,84	6	4,25	4,2	2,1	1,4	1,05
N _{amide}	16,27	13,66	16,89	15,39	18,41	19,24	19,84
N _{ammonium}	7,84	8,94	7,31	8,01	6,49	6,06	5,72
N _{total}	31,95	28,6	28,45	27,6	27	26,7	26,6
S	–	3,36	3,5	4,36	5,02	5,32	5,34
Загальний вміст діючих речовин	31,95	32,02	31,95	31,96	32,02	32,02	31,95

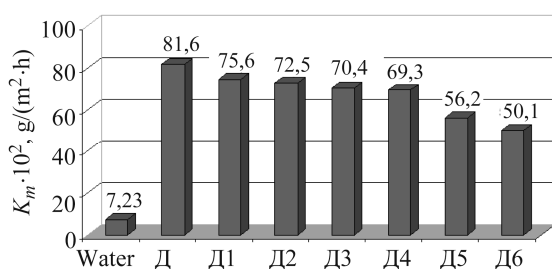


Рис. 2. Швидкість корозії сталі Ст3 у 20%-х розчинах N, S-вмісних мінеральних добрив (240 h).

Fig. 2. Corrosion rates of steel Ст3 in 20% solutions of N, S-containing mineral fertilizers (240 h).

Виявлено, що досліджувані мінеральні добрива (20% розчини у воді) прискорюють корозійне розчинення сталі, що підтверджується результатами гравіметричних досліджень (рис. 2). За використання мінеральних добрив швидкість корозії сталі (K_m) зростає у 6,9–11,3 разів порівняно з корозією у воді (експозиція 240 h). Визначено, що зі збільшенням вмісту сульфуру у складі добрива до 5,32... 5,34% (Д5, Д6) і зниженням загального вмісту

нітрогену корозійне руйнування сталі дещо зменшується. Причому найкращі результати спостерігаємо за зменшення частки нітратного та амонійного і зростання амідного нітрогену.

Перебіг процесів у водогінній воді та у воді з додаванням добрив суттєво відрізняється. Візуальний огляд зразків після експозиції в агресивних середовищах з добривами виявив початкові ознаки корозії. У чарунках, починаючи з другої доби від початку експерименту, візуально спостерігали накопичення осаду: у воді, характерного для ферум гідроксиду – рудого забарвлення, у воді з додатком добрива Д – чорного кольору (можливо магнетит).

Звичайні візуальні та оптичні дослідження поверхні зразків після змивання продуктів корозії не дали однозначної відповіді щодо характеру руйнування та наявності або відсутності стійкого шару осадів на ділянках з корозійними ушкодженнями. Найзручнішим та інформативним тут є метод профілометрії (рис. 3). Ліва частина зразка (I), яка не була занурена в розчин, має характерний профіль мікронерівностей після ручного полірування, середня висота вершин становить

0,25 μm ($R_a = 0,25$). Права частина (2), яка знаходилася в розчині добрива, вказує на глибокі западини, розміщення вершин не має системного характеру і така комбінація не притаманна жодному методу механічної обробки. Отримані результати підтверджують суцільний характер корозії. Слід зауважити, що глибина западин на поверхні зразків після витримки у водогінній воді суттєво менша, ніж в агресивнішому середовищі з добривами.

Рис. 3. Профілограма поверхні зразка (вертикальне збільшення $\times 4$):
1 – без занурення в агресивне середовище;
2 – після витримки у розчині добрива Д6.

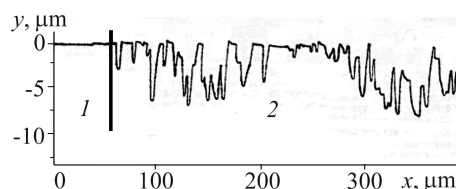


Fig. 3. Profilogram of the sample surface (vertical magnification $\times 4$): 1 – without immersion in an aggressive environment; 2 – after exposure to Д6 fertilizer solution.

Для гальмування корозії раціональним методом є використання інгібіторів, які за невеликих витрат перешкоджають деградації металів, руйнуванню обладнання, конструкцій та механізмів. Досліджували розроблений інгібітор корозії РС-ЧДТУ, який раніше показав високий захисний ефект у водному середовищі – 95...96% за результатами гравіметричних випробувань на зразках сталі Ст3 [5, 12]. Високі протикорозійні властивості інгібітора РС-ЧДТУ у воді та доступна екологічно чиста рослинна сировина є передумовами його використання для зниження корозивної активності мінерального добрива. Інгібітор вводили до складу найагресивнішого N, S-вмісного добрива – Д1. Досліджували вплив його концентрації у межах 0,1...0,3 г/л у перерахунку на діючу речовину (рис. 4, табл. 2).

Рис. 4. Поляризаційні катодні (1–6) та анодні (1'–6') криві сталі 20 у водогінній воді (6, 6'); водному розчині N, S-вмісного добрива Д1 (1, 1'); за додавання до добрива Д1 інгібітора РС-ЧДТУ (г/л): 0,1 (2, 2'); 0,2 (3, 3'); 0,25 (4, 4'); 0,3 (5, 5').

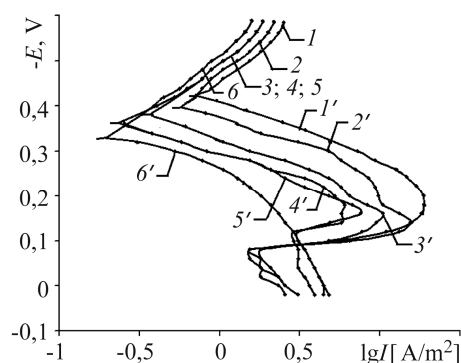


Fig. 4. Polarization cathode (1–6) and anode (1'–6') curves of steel 20 in tap water (6, 6'); aqueous solution of N, S-containing Д1 fertilizer (1, 1'); when adding the РС-ЧДТУ inhibitor (g/l) to the aqueous solution of Д1 fertilizer: 0.1 (2, 2'); 0.2 (3, 3'); 0.25 (4, 4'); 0.3 (5, 5').

Згідно з отриманими результатами електрохімічних досліджень, порівняно з водою стаціонарний потенціал сталі 20 у середовищі добрива Д1 від'ємніший на 100 mV, густина анодного струму зростає у 12,6 разів, тобто термодинамічна стабільність сталі знижується. За додавання інгібітора до розчину добрива спостерігаємо зміщення потенціалу корозії $E_{\text{сорт}}$ в анодну область на 30...60 mV порівняно з добривом без нього, що свідчить про гальмування розчинення металу біля E_c . Оптимальна концентрація РС-ЧДТУ 0,25 г/л, подальше її збільшення незначно впливає на гальмування корозії. За поляризаційними дослідженнями встановлено, що РС-ЧДТУ є інгібітором змішаного катодно-анодного типу, при цьому $Z_a > Z_c$. Так, за концентрації 0,25 г/л РС-ЧДТУ, порівняно з водним розчином Д1 без інгібітора, катодний струм I_c зменшується у 0,7 разів (при $E_c = -0,45$ V) і ступінь захис-

ту Z_c становить 37%, тоді як анодний струм I_a зменшується у 8,13 разів (при $E_a = -0,29$ V), Z_a становить 87,8%. За концентрації РС-ЧДТУ 0,25...0,3 г/л, згідно з ходом анодних кривих, спостерігаємо, що пасивація сталі починається раніше, ніж за менших концентрацій, що узгоджується з результатами гравіметричних досліджень. Пасиваційні процеси в середовищі добрива Д1 пояснюються утворенням поверхневих шарів з продуктів корозії.

Таблиця 2. Результати гравіметричних (СтЗ) та електрохімічних (сталь 20) досліджень

Вміст інгібітора, г/л	Гравіметричні дослідження (240 h)		Електрохімічні дослідження*						
	$K_m \cdot 10^2$, г/(m ² ·h)	Z_m , %	Потенціал корозії, V	Густина струму, А/м ²			Ступінь захисту, %		
			$-E_{\text{corr}}$	I_a	I_c	I_{corr}	Z_a	Z_c	Z_{corr}
Вода водогінна									
–	7,23	–	0,32	0,562	0,562	0,195	–	–	–
Добриво Д1									
–	75,56	–	0,42	7,08	1,26	0,708	–	–	–
Добриво Д1 з інгібітором РС-ЧДТУ									
0,1	23,66	68,7	0,39	4,47	1	0,58	36,8	20,6	16,7
0,15	22,46	70,3	–	–	–	–	–	–	–
0,2	17,76	76,5	0,38	1,58	0,79	0,38	77,6	37	45,4
0,25	13,3	82,4	0,36	0,87	0,79	0,288	87,8	37	59,2
0,3	13	82,8	0,36	0,87	0,79	0,289	87,8	37	60

* I_c при $E_c = -0,45$ V; I_a при $E_a = -0,29$ V.

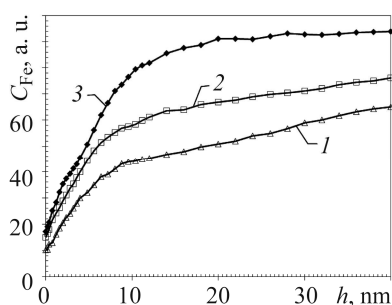


Рис. 5. Залежність вмісту феруму (C) від глибини травлення (h) зразків сталі Ст3 за результатами Оже-електронної спектроскопії (експозиція 168 h): 1 – розчин добрива Д1; 2 – розчин добрива Д1 з інгібітором (0,25 г/л); 3 – контрольний зразок на повітрі.

Fig. 5. Dependence of iron (C) content on the depth of etching (h) of St3 specimens according to the results of Auger-electron spectrometry (exposure 168 h): 1 – D1 fertilizer solution; 2 – D1 fertilizer solution with an inhibitor (0.25 g/l); 3 – control sample in air.

Результати контролю методом Оже-електронної спектроскопії поверхневих шарів сталі Ст3 після витримки впродовж 168 h у розчині добрива показали, що на глибині від поверхні 10...30 nm за введення інгібітора вміст феруму зростає на 14...18% (рис. 5). Такі зміни відбулися через утворення на поверхні сталі захисного шару зі сполук інгібітора (синігрин, гоїтрин), який і ускладнив дифузію йонів-активаторів корозії до металу. Взаємодія активних компонентів інгібітора з поверхнею металу відбувається за донорно-акцепторним механізмом шляхом переносу електронної густини з негативно заряджених центрів (атомів кисню) на вільні d-орбіталі феруму – комплексоутворення донорно-акцепторного типу (метал-ліганд). Позитивні заряди сульфору та нітрогену забезпечують виникнення

п-дативних зв'язків із утворенням металохелатних комплексів, що супроводжується переносом електронної густини з металу на ліганд (зворотна координація) [6, 12].

Отримані результати порівнювали з контрольним зразком сталі (без занурення у корозивні розчини), поверхня якого вкрита оксидною плівкою, сформованою на повітрі, – стабілізація вмісту феруму починається з 20 nm. Для зразків, які знаходилися у розчині добрив, стабілізацію феруму не зафіксовано навіть на глибині травлення 160 nm: з інгібітором вміст феруму становить 91 at.%, а без нього – 74 at.%.

Сучасна практика досліджень базується на електрохімічних поляризаційних методах вимірювання швидкості корозії за постійного струму, один з них – метод поляризаційного опору (або лінійної поляризації) [10, 11]. Перебіг процесів у електрохімічній чарунці у першу годину від початку експериментів мав достатньо хаотичний характер, тому поляризаційний опір R_p вимірювали періодично після переходу процесу у стаціонарний режим. Перебіг зміни поляризаційного опору R_p наведено на рис. 6. На початку досліджень спостерігали високі показники поляризаційного опору, далі, упродовж першої доби – поступове зниження і певна стабілізація на другу-третю добу. При цьому швидкість корозійних процесів у воді і воді з добривами на початку експерименту відрізнялась в 1,37–1,87 разів і ця різниця зросла наприкінці досліджень до 5,81–5,96 разів.

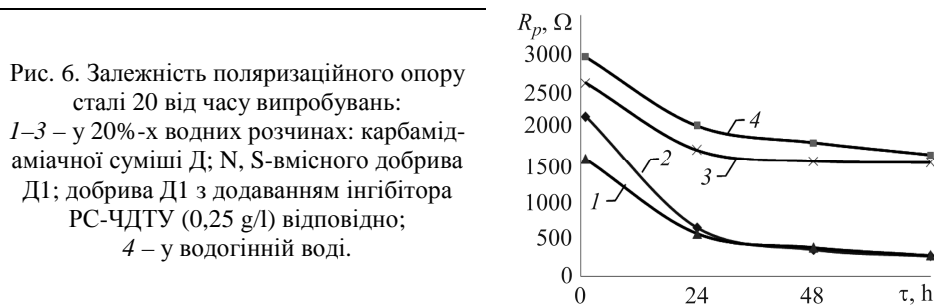


Рис. 6. Залежність поляризаційного опору сталі 20 від часу випробувань: 1–3 – у 20%-х водних розчинах: карбамід-аміачної суміші Д; N, S-вмісного добрива Д1; добрива Д1 з додаванням інгібітора РС-ЧДТУ (0,25 g/l) відповідно; 4 – у водогінній воді.

Fig. 6. Dependence of the polarization resistance of steel 20 on the test time: 1–3 – 20% aqueous solutions of mineral fertilizers: urea-ammonia mixture Д; N, S-containing Д1 fertilizer; Д1 fertilizer with the addition of the РС-ЧДТУ inhibitor (0.25 g/l), respectively, 4 – in tap water.

За введення інгібітора до складу добрива Д1 поляризаційний опір суттєво збільшився упродовж всього терміну випробувань. Так, за 72 h досліджень він підвищився у 5,5 разів порівняно з добривом без інгібітора і наблизився до показників поляризаційного опору води. Така залежність швидкості корозії від тривалості експозиції також підтверджує формування на поверхні сталі захисних шарів пасиваційної природи.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що водні розчини N, S-вмісних мінеральних добрив спричиняють інтенсивні корозійні пошкодження сталей 20 та Ст3, що впливає на термін експлуатації конструкційних елементів і деталей техніки загального та спеціального призначення. Швидкість корозії Ст3 зростає у 6,9–11,3 разів порівняно з корозією у водогінній воді. Електрохімічні дослідження зразків сталі 20 у середовищі N, S-вмісного добрива показали, що термодинамічна стабільність сталі знижується порівняно з водою – стаціонарний потенціал від'ємніший на 100 mV, густина анодного струму зростає у 12,6 разів. Визначено, що зі збільшенням вмісту сульфуру у складі добрива до 5,32...5,34% і зниженням частки нітрогену корозійне руйнування сталі зменшується. Запропоновано підвищити корозійну тривкість сталевих комунікацій та обладнання у середовищі N, S-вмісних мінеральних добрив на 82,4...82,8%, використавши екологічно безпечний інгібітор РС-ЧДТУ, ви-

готовлений на основі продуктів переробки рослинної сировини України. За поляризаційними дослідженнями встановлено, що цей інгібітор є змішаного катодно-анодного типу з переважним гальмуванням анодної реакції. Дослідженням поляризаційного опору показано, що швидкість корозії сталі 20 в розчинах N, S-вмісних мінеральних добрив найбільша за першої доби експозиції та поступово знижується. Це зумовлено формуванням на поверхні сталі захисних шарів, що також підтверджено ходом анодних поляризаційних кривих та результатами контролю поверхні сталі Оже-електронною спектроскопією.

1. Попович П. В., Слободян З. В. Корозійна і електрохімічна поведінка сталей 20 та Ст.3 у середовищах сульфату амонію і нітрофоски // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – № 6. – С. 100–106.
(Popovych P. V., Slobodyan Z. V. Corrosion and electrochemical behaviours of 20 steel and St.3 steel in ammonium sulfate and nitrophoska // Materials Science. – 2014. – № 6. – P. 819–826.)
2. Михайлович Я., Рубець А. Проблеми зберігання сільськогосподарської техніки // Пропозиція. – 2008. – № 12. – С. 90–99.
3. Влияние продуктов переработки растительного сырья на коррозионно-электрохимическое поведение стали в пищевых производствах / О. И. Сизая, О. Н. Савченко, Ю. В. Квашук, А. А. Королев // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 4 (2). – С. 179–182.
4. Вплив технологічних факторів на корозійну тривкість сталей в харчових виробництвах / Ю. Квашук, О. Сиза, О. Савченко, В. Челябієва // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Спец. випуск № 9. – Т. 1. – С. 226–231.
5. Патент 70027 Україна, МПК C23F 11/10. Інгібітор корозії / О. І. Сиза, О. М. Савченко, Ю. В. Квашук. – Опубл. 25.05.2012; Бюл. № 10.
6. Нові інгібітори на основі рослинної сировини та закономірності їхньої адсорбції на поверхні сталі / О. І. Сиза, О. М. Савченко, Ю. В. Квашук, Н. А. Штиль, В. М. Челябієва // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 5. – С. 33–42.
(New inhibitors based on vegetable raw materials and the regularities of their adsorption on the steel surface / O. I. Syza, O. M. Savchenko, Yu. V. Kvashuk, N. A. Shtyl and V. M. Chelyabieva // Materials Science. – 2016. – № 5. – P. 627–637.)
7. Антропов П. И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высш. шк., 1984. – 519 с.
8. Романов В. В. Методы исследования коррозии металлов. – М.: Металлургия, 1965. – 280 с.
9. ДСТУ 2413-94. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 38 с.
10. Технічний опис і інструкція по експлуатації індикатора поляризаційного опору P5126: 3.455.034 ТО. – К., 1985. – 45 с.
11. Білоусова Н., Герасименко Ю. Проблеми метрології вимірювань швидкості корозії поляризаційними методами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец. випуск № 1. – С. 365–369.
12. Сиза О. І., Квашук Ю. В., Савченко О. М. Механізм дії інгібіторів корозії на основі рослинної сировини // Вісник Чернігівськ. держ. технолог. ун-ту. – 2013. – № 3 (67). – С. 62–68.

Одержано 22.07.2020