

УДК 620.197:620.194+504.062

ВПЛИВ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ СЕРЕДОВИЩА ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ НА ПРОТИКОРОЗИЙНИЙ ЗАХИСТ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

С. Д. ЦИБУЛЯ¹, **В. Г. СТАРЧАК**², К. М. ІВАНЕНКО¹, Н. П. БУЯЛЬСЬКА¹,
І. А. КОСТЕНКО², Г. М. МАЧУЛЬСЬКИЙ²

¹ Національний університет "Чернігівська політехніка";

² Національний університет "Чернігівський колегіум" ім. Т. Г. Шевченка

Вивчено особливості протикорозійного захисту металоконструкцій за техногенного впливу (інгредієнтного, енергетичного). Показано, що забруднення важкими металами прісних, морських вод, повітря, ґрунту, підсилює ризик виникнення техногенних аварій. Розроблено комплексну інтегральну оцінку визначення рівнів техногенного забруднення середовищ (природних: атмосферне повітря, поверхневі води, ґрунти; технологічних: стічні води, робочі середовища), за якою встановлено кореляційні залежності "Інтегральні показники техногенного забруднення–корозійна тривалість сталі" та визначено безпечні рівні техногенного впливу на витривалість металоконструкцій. Показано можливість підвищення протикорозійного захисту з використанням ефективних екологічно безпечних синергічних захисних композицій на вторинній сировині (з утилізацією регіональних відходів) за одночасного зниження техногенного забруднення середовища.

Ключові слова: протикорозійний захист, техногенний вплив, малоциклова витривалість, екологічна безпека.

The features of corrosion protection of metal structures under technogenic (energetic and ingredient) impact have been studied. It is shown that contamination by heavy metals of fresh and sea water, air and soil increases the risk of technogenic accidents. A complex integrated estimation of the determination of the level of technogenic contamination of environment (natural: air, surface water, soil, and technological: sewage water, working media, etc.) is developed according to which the correlation dependences "Integrated indexes of technogenic contamination – corrosion resistance of steel" are established and the safe level of technogenic impact on the metal construction endurance is found. The possibility of increasing corrosion protection, using the effective environment-friendly synergist protective compositions on secondary raw materials (with utilization of regional wastes) with simultaneous reduction of the level of medium technogenic contamination, is shown.

Keywords: corrosion protection, technogenic impact, low-cycle fatigue, environmental safety.

Вступ. Відомо, що екологічна небезпека докілья здебільшого формується техногенним впливом, як речовинним (інгредієнтним), серед яких переважають важкі метали (ВМ), так і енергетичним (параметричним) антропогенним забрудненням: акустичними, радіоактивними, електромагнетними полями (ЕМП). Прогресуюче розширення ареалу забруднення ВМ ґрунту, поверхневих, підземних, морських вод, атмосферного повітря сприяє стимулювальному впливу на руйнування підземних, наземних, підводних металоконструкцій [1].

Останнім часом у науковій літературі приділяють особливу увагу інтегральним показникам техногенного впливу на екостан середовища та техногенну без-

Контактна особа: С. Д. ЦИБУЛЯ, e-mail: stcibula@gmail.com

пеку технічних споруд [1–3]. Це вимагає нових методологічних підходів до комплексної оцінки екологічної безпеки техногенного впливу на металоконструкції. Відомі оцінки [2–4] не враховують техногенного впливу забруднення на корозійне та корозійно-механічне руйнування, наслідком якого є додаткове накопичення ВМ у біосфері, багато з яких є супертоксикантами XXI ст. [2, 3]. Крім того, засоби протикорозійного захисту здебільшого згадують у науково-технічній літературі без врахування техногенного впливу ВМ на їх ефективність [4–7].

Мета роботи – встановити кореляційні залежності між показниками протикорозійного захисту сталі і рівнем техногенного забруднення (ТЗ) середовища важкими металами за інтегральною оцінкою.

Методи досліджень. Розробили комплексну систему дослідження (табл. 1) рівнів техногенного впливу ВМ за інтегральною оцінкою на корозійну стійкість сталі та експлуатаційну витривалість металоконструкцій з використанням стандартних хімічних, фізичних, фізико-хімічних методів, спектрального (ІЧ-, ПМР-, Оже-спектроскопії тощо) та комплексного системного кореляційного аналізу, методів математичної статистики, комп'ютерного моделювання, а також фізико-механічних випробувань сталі в природному, забрудненому ВМ середовищі: атмосферне повітря (за індексом забруднення (ІЗА) ДСП 201-97, за балом K_a); поверхневі води – річки Чернігова: Десна, Стрижень, Білоус (за індексом забруднення води (ІЗВ) [5], балом – K_b); ґрунти – за сумарним показником забруднення Z_c (ДСанПіН 2.2.7-029-99) та балом K_s , а також у технологічних середовищах – стічні води екологічно небезпечних виробництв, робочі середовища кислотних промивок фільтрів, травильних ванн тощо (рН 0...2).

Таблиця 1. Інтегральна бальна оцінка небезпеки техногенного забруднення (I_d) природних і технологічних середовищ

1. Атмосферне повітря K_a							
Рівень ТЗ	Допустимий		Середній	Високий	Дуже високий	Надзвичайно високий	
Бал	1...2		3...5	6...8	9	10	
ІЗА	< 100		100...200	200...450	450...800	> 800	
2. Ґрунт K_s							
Рівень ТЗ	Допустимий		Помірно-допустимий		Небезпечний	Надзвичайно небезпечний	
Бал	1...3		4...6		7...9	10	
Z_c	< 16		16...32		32...128	> 128	
3. Водойми K_b							
Рівень ТЗ	Дуже чиста	Чиста	Помірно забруднена	Забруднена	Брудна	Дуже брудна	Надзвичайно брудна
Бал	1...2	3...4	5	6	7...8	9	10
ІЗВ	< 0,3	0,3...1	1...2,5	2,5...4	4...6	6...10	> 10
4. Рослинність K_{pl}							
Рівень ТЗ	Допустимий		Помірно-допустимий		Небезпечний	Надзвичайно небезпечний	
Бал	1...3		4...6		7...9	10	
K_{ac}	< 1,1...1,5		1,5...3,5		3,5...5	> 5	

Продовження таблиці 1

5. Здоров'я населення (ризик) K_h						
Рівень ризику	Малий	Середній	Високий	Дуже високий		
Бал	1...3	4...5	6...8	9...10		
Ризик	$< 10^{-4}$	$10^{-4} \dots 10^{-3}$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	$> 10^{-2}$		
6. ЕМП K_{EMF}						
Рівень ЕМП	Допустимий	Помірно-допустимий	Напружений	Небезпечний	Надзвичайно небезпечний	
Бал	1...2	3...4	5...6	7...8	9...10	
$H, A/m$	$< 3 \dots 5$	5...6	6...8	8...9	≥ 10	
7. Вібрація K_v						
Рівень вібрації	Допустимий	Помірно-допустимий	Напружений	Небезпечний	Надзвичайно небезпечний	
Бал	1...2	3...4	5...7	8...9	10	
L_v, dB	$< 80 \dots 95$	95...120	120...125	125...130	> 130	
8. Радіація K_{RC}						
Рівень РЗ	Дуже низький	Низький	Помірний	Допустимий	Небезпечний	
Бал	1...2	3...4	5...7	8...9	10	
$A, Ci/km^2$ (Cs/Sr)	$< 0,1 \dots 0,2 /$ $0,01 \dots 0,05$	$0,2 \dots 1 /$ $0,05 \dots 0,15$	$1 \dots 5 /$ $0,15 \dots 1$	$5 \dots 15 /$ $1 \dots 3$	$> 15 / > 3$	
9. Тривкість конструкційного матеріалу K_{CM}						
Рівень тривкості	Цілком стійкі	Дуже стійкі	Стійкі	Понижено стійкі	Малостійкі	Нестійкі
Бал	1	2...3	4...5	6...7	8...9	10
$K_p,$ mm/year	$< 10^{-3}$	10^{-3} $\dots 10^{-2}$	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	$10^{-1} \dots 1,0$	1,0...10	> 10
10. Витривалість металоконструкцій K_{LCF}						
Рівень витривалості	Допустимий	Помірно-допустимий	Напружений	Небезпечний	Надзвичайно небезпечний	
Бал	1...2	3...4	5...6	7...8	9...10	
β_C^N / β_H^N	$< 1 /$ 1,1...1,5	1...1,2 / 1,5...3	1,2...2 / 3...4	2...3 / 4...5	$\geq 3 / \geq 5$	

Визначали сумарний показник безпеки I_d за розробленою інтегральною бальною оцінкою за 10-ма сумарними показниками техногенного інгредієнтного забруднення ВМ (Cu, Zn, Cd, Pb, V, Mn, Cr, Ni):

$$I_d = \sum_{i=1}^{n=10} K_i .$$

На основі I_d (0...100) встановлювали бал техногенного впливу (1...10) і за розробленою шкалою – рівень екологічної безпеки середовища: від сприятливого до катастрофічного (табл. 2).

Таблиця 2. Уніфікована шкала комплексної інтегральної оцінки небезпеки техногенного забруднення середовища

I_d	Бал	Рівень техногенного впливу
0...10	1	Сприятливий
11...20	2	Нормальний
21...31	3	Задовільний
32...43	4	Напружений
44...55	5	Складний
56...66	6	Незадовільний
67...77	7	Критичний
78...89	8	Передкризовий
90...100	9	Кризовий
> 100	10	Катастрофічний

В оцінюванні I_d також враховані показники сумарного енергетичного забруднення – ЕМП, вібрація, радіація і дія ВМ на рослинність, здоров'я людини (табл. 1).

Встановлювали кореляційні залежності показників корозійної стійкості (за глибинним показником K_p (mm/year) та балом K_{CM}) і малоциклової витривалості (МЦВ) сталі (за коефіцієнтами впливу середовища β_C^N , β_H^N та балом K_{LCF}) від сумарних характеристик техногенного впливу (табл. 1, п. 1–5, 8), з інгібіторним захистом і без нього.

Вибір випробувань на МЦВ зумовлений аналізом причин аварійності на трубопроводах нафтогазового комплексу, в яких внаслідок пульсації тиску виникають експлуатаційні та аварійні перевантаження з досягненням σ_T . Тому МЦВ – одна із важливих характеристик роботоздатності металоконструкцій.

Для захисту сталі 20 (найпоширеніший конструкційний матеріал трубопроводів) розроблено синергічну захисну композицію (СЗК) з новими синергічними поліфункціональними додатками (СД) – потенційними полідентатними хелатоутворювачами (похідні імідазолу, тіазолу) з декількома реакційними центрами (ендо- та екзоатоми азоту, сірки, кисню) здатними реагувати не тільки з поверхневими атомами металу, але й з ВМ техногенного забруднення з утворенням металохелатів [8, 9]. Склад і чистота СД підтверджено ІЧ-, ПМР-спектрами та результатами елементного аналізу. Вибір оптимальних СД визначали комп'ютерним моделюванням (напівемпіричний метод MNDO-PM3) за електронними (q_N , q_S , q_O тощо) та термодинамічними (ΔH_f , μ , E , I тощо) характеристиками, а також Оже-спектрами – Jamp-10s, фірми Джоел (Японія). Встановлювали кореляційні залежності “електронні та термодинамічні характеристики–захисні властивості СД” (від хімічної – γ_x , електрохімічної корозії – γ_c : γ_a , γ_k) з урахуванням часткових вкладів парціальних механізмів: кінетичних – γ_1 , γ_2 , блокувального – γ_3 , адсорбційного (подвійношарового) – γ_4) (рис. 1). Із зростанням позитивного заряду на реакційних центрах (РЦ – q_{N1} , q_S) молекул СД, підвищується металохелатувальна здатність синергістів внаслідок активізації утворення π -дативних зв'язків. Збільшення електронної густини на РЦ q_{N3} , зниження потенціалу іонізації сприяє посиленню утворення π -донорно-акцепторних зв'язків з перенесенням електронів на d -рівні атомів металу [9]. Це також зумовлює зростання парціальних показників захисту – γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 .

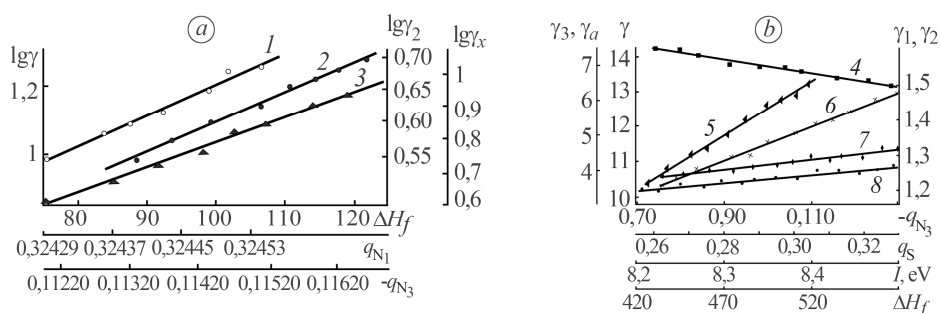


Рис. 1. Вплив електронних і термодинамічних характеристик СД (похідних імідазолів (а) та тіазолу (b)) на захист сталі 20 (рН 1): 1 – $\lg\gamma = f(N_1)$; $\lg\gamma = 1083,33q_{N_1} - 350,33$;

$$2 - \lg\gamma_2 = f(N_3); \lg\gamma_2 = 43,333q_{N_3} - 4,355;$$

$$3 - \lg\gamma_x = f(\Delta H_f); \lg\gamma_x = 0,008\Delta H_f - 0,017(\Delta H_f, \text{kJ/mol}); 4 - \gamma_1 = f(I); \gamma_1 = 4,829 - 0,393I;$$

$$5 - \gamma = f(\Delta H_f); \gamma = 0,03\Delta H_f - 2,66; 6 - \gamma_3 = f(q_s); \gamma_3 = 37,857q_s - 6,343;$$

$$7 - \gamma_2 = f(q_s); \gamma_2 = 1,083q_s + 0,958; 8 - \gamma_a = f(q_{N_3}); \gamma_a = 10q_{N_3} + 2,7.$$

Fig. 1. Influence of electronic and thermodynamic characteristics of synergists additions (imidazole derivatives (a) and thiazole (b)) on steel 20 protection indices (pH 1):

$$1 - \lg\gamma = f(N_1); \lg\gamma = 1083,33q_{N_1} - 350,33; 2 - \lg\gamma_2 = f(N_3); \lg\gamma_2 = 43,333q_{N_3} - 4,355;$$

$$3 - \lg\gamma_x = f(\Delta H_f); \lg\gamma_x = 0,008\Delta H_f - 0,017(\Delta H_f, \text{kJ/mol}); 4 - \gamma_1 = f(I); \gamma_1 = 4,829 - 0,393I;$$

$$5 - \gamma = f(\Delta H_f); \gamma = 0,03\Delta H_f - 2,66; 6 - \gamma_3 = f(q_s); \gamma_3 = 37,857q_s - 6,343;$$

$$7 - \gamma_2 = f(q_s); \gamma_2 = 1,083q_s + 0,958; 8 - \gamma_a = f(q_{N_3}); \gamma_a = 10q_{N_3} + 2,7.$$

Для створення СЗК на вторинній сировині зі застосуванням регіональних відходів виробництва використали відходи ПАТ “Чернігівське хімволокно” (ЧХВ) – кубовий залишок регенерації ϵ -капролактаму (К), ПАТ “Рівнеазот” – кубовий залишок моноетаноламіну (КУБ), олива ПОД (МП) та ін.

До складу СЗК (5 g/dm^3 , К+МП (1:1), СД – 1 mol/dm^3) введено активний полярний природний адсорбент – цеоліт (5 g/dm^3) [10]. Таким чином, забезпечували комплексний протикорозійний захист: хімічними (металохелатування) й фізико-хімічними методами (адсорбція, йонний обмін). Ефективність захисту середовища від техногенного інгредієнтного забруднення показано у табл. 3 (на прикладах Чернігова – ЧХВ, р. Білоус: п. 1–5, 9, 10).

Експериментальні результати обробляли методами математичної статистики з використанням стандартної помилки S (при $n = 6$, $t = 2,75$ і довірчій ймовірності 0,95 вона становила $\pm 5...10\%$). Визначали також коефіцієнт кореляції r регресійним аналізом (метод найменших квадратів). Малоімовірні дані відкидали з використанням Q -критерію.

Результати досліджень та їх обговорення. Експериментальні результати подані в табл. 3 та на рис. 1, 2.

Застосування СЗК (табл. 3) знижує техногенний вплив ВМ так. На атмосферне повітря: ІЗА – зменшується в 2,5, а K_a – в 2 рази, ґрунт: Z_c знижується в 2, K_s – в 1,4 рази; на воду: ІЗВ зменшується в 2,5, а K_b – в 1,6 рази (знижується в 2 рази й накопичення ВМ у рослинах, а також ризик захворюваності більш ніж на порядок, K_h – в 2,3 рази). Для захисту від ЕМП застосовано екранування (Al-екран), що зменшило техногенний вплив електромагнетних полів за H (А/м) в 1,5, а K_{EMF} в 2 рази. Екранування підвищує ефективність протикорозійного захисту в 2 рази. Вібраційні навантаження на ґрунт (від 0,9 до 1,1 L_n) стимулюють руйнування сталі в 1,5–3,5 рази внаслідок ініціації активних реакційних центрів на поверхні металу. Застосування комплексного захисту (від вібрації – віброізолювальні опори ОВ-30, від забруднення ґрунту ВМ – СЗК) в 4–8 разів підвищує стійкість сталі

в забрудненому ВМ ґрунті. СЗК має також переваги перед відомими захисними композиціями за екологічністю: за сумарним індексом токсичності (< 10) – це 4 клас небезпеки, малонебезпечні матеріали (порівняно, наприклад, з інгібітором НДА – нітрид дициклогексиламіну, летальна доза (ЛД₅₀) – 233 mg/kg, 2 клас небезпеки, високонебезпечні матеріали).

Таблиця 3. Протикорозійний захист сталі 20 в умовах техногенного забруднення

Техногенне забруднення		Показники		Рівень техногенного впливу	
		–	+	–	+
1. Повітря	ІЗА	250	100	Високий	Середній
	K_a	6	3		
2. Ґрунт	Z_c	45	22	Небезпечний	Помірно-допустимий
	K_s	7	5		
3. Вода	ІЗВ	5,9	2,4	Брудна	Помірно забруднена
	K_b	8	5		
4. Рослинність	K_{ac}	2,5	1,2	Помірно-допустимий	Допустимий
	K_{pl}	5	3		
5. Здоров'я населення	Ризик	$5 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$	Високий ризик	Малий ризик
	K_h	7	3		
6. ЕМП	$H, A/m$	6	4	Помірно-допустимий	Допустимий
	K_{EMF}	4	2		
7. Вібрація	L_v, dB	115	79	Помірно-допустимий	Допустимий
	K_v	4	1		
8. Радіація	$A, Ci/km^2$	1,0	0,06	Низький	Дуже низький
	K_{RC}	4	1		
9. Тривкість сталі (СМ)	$K_p, mm/year$	1,05	0,05	Малостійкі СМ	Стойкі СМ
	K_{CM}	8	4		
10. Витривалість металокопункцій (МК)	β_C^N	1,9	1,0	Напружений	Допустимий стан МК
	K_{LCF}	6	1		
I_d		59	28	Незадовільний	Задовільний
Бал		6	3		

Примітка: “–” – без захисту, “+” – зі застосуванням комплексного захисту: СЗК (п. 2, 3), екранування від ЕМП (п. 6) і віброізольовані опори (п. 7).

Техногенний вплив густини радіаційного забруднення (РЗ) на стійкість сталі в ґрунті вивчали на прикладі ґрунтів найпостраждаліших від Чорнобильської катастрофи районів Чернігівської обл. – Ріпкинського в зоні максимального РЗ за ураженою площею (97% – за Cs-137, до $1 Ci/km^2$ і 92% – за Sr-90, до $0,15 Ci/km^2$). Показано, що агресивна дія ґрунту з РЗ посилюється, тривкість сталі (під статичним навантаженням) зменшується на 2–3 бали (з 5 без РЗ до 7,8 з РЗ). Оброблення ґрунту СЗК знижує РЗ на 91...93% (K_{RC} – на 3 бали) і забезпечує зменшення його агресивності до металу, за K_p на 95% (K_{CM} у балах знижується в 2 рази) [8, 10].

Встановлені кореляційні залежності $K_p = f(K_s, K_b)$, $K_{CM} = f(K_s, K_{RC}, K_V, K_{EMF})$, $K_{CM} = f(Z_c)$, β_C^N , $\beta_H^N = f(IЗВ)$ (рис. 2) показують, що зі зростанням Z_c (K_s) з 39 до 52, знижується корозійна тривкість, збільшуються втрати металу K_p в 10 разів, зі зростанням ІЗВ (K_b) з 2,8 до 5,8 знижується експлуатаційна надійність металоконструкцій (зростають β_C^N й β_H^N в 1,7 рази), посилюється ризик техногенних аварій, екологічних катастроф [10]. Застосування захисту середовища з СЗК значно знижує рівень техногенного впливу на металоконструкції, їх малоциклова витривалість підвищується за K_{LCV} на 5 балів, зменшується інтегральний показник забруднення I_d в 2 рази (з 59 до 28) і в 2 рази за балами (з 6 до 3): техногенний вплив середовища за I_d з незадовільного стає задовільним.

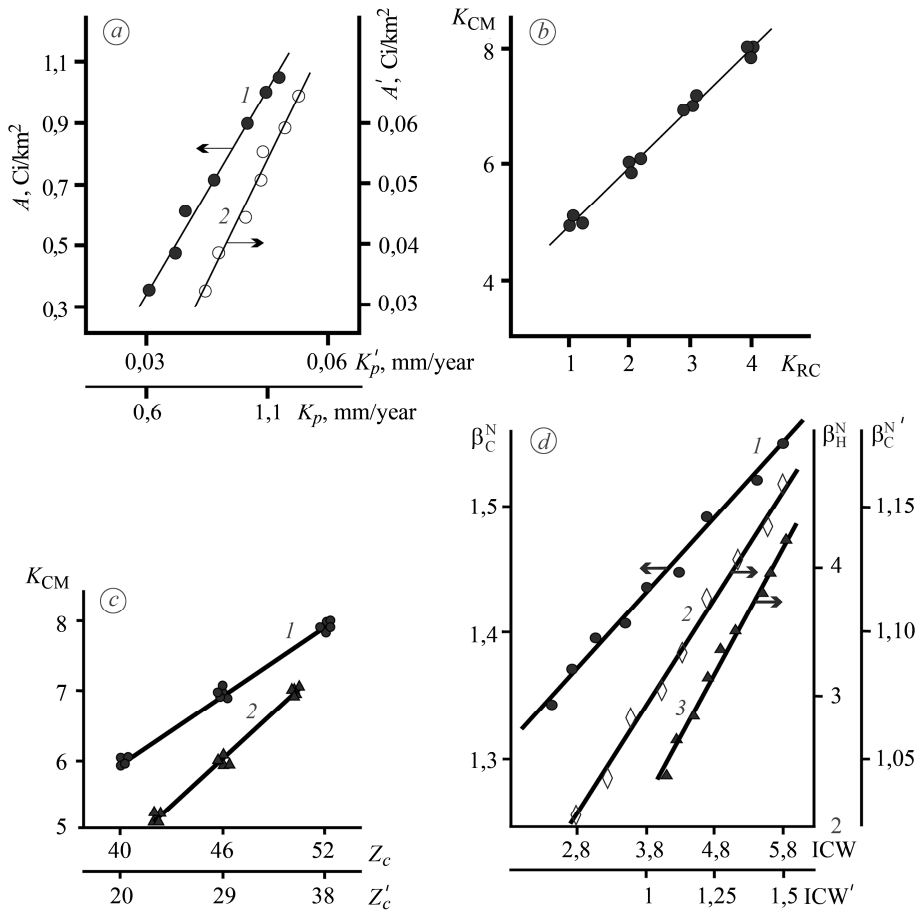


Рис. 2. Кореляційні залежності показників протикорозійного захисту від рівня техногенного забруднення середовища: $a - K_p = f(A)$: $1 - K_p = 1,3A + 0,43$; $2 - K'_p = 2A' + 0,045$; ($A - \text{Ci}/\text{km}^2$, $K_p - \text{mm}/\text{year}$, штрих – із СЗК); $b - K_{CM} = f(K_{RC})$: $K_{CM} = 1,167K_{RC} + 3,33$; $c - K_{CM} = f(Z_c)$: $1 - K_{CM} = 0,158Z_c - 0,333$; $2 - K'_{CM} = 0,139Z'_c + 1,972$; $d - \beta_C^N$, $\beta_H^N = f(IЗВ)$: $1 - \beta_C^N = 0,0583 IЗВ + 1,212$; $2 - \beta_H^N = 0,883 IЗВ - 0,423$; $3 - \beta_H^{N'} = 0,22 IЗВ' + 0,805$.

Fig. 2. Correlation dependences of corrosion protection indices on the level of technogenic contamination of the medium: $a - K_p = f(A)$: $1 - K_p = 1.3A + 0.43$; $2 - K'_p = 2A' + 0.045$; ($A - \text{Ci}/\text{km}^2$, $K_p - \text{mm}/\text{year}$, dash – with synergist protective compositions); $b - K_{CM} = f(K_{RC})$: $K_{CM} = 1.167K_{RC} + 3.33$; $c - K_{CM} = f(Z_c)$: $1 - K_{CM} = 0.158Z_c - 0.333$; $2 - K'_{CM} = 0.139Z'_c + 1.972$; $d - \beta_C^N$, $\beta_H^N = f(IЗВ)$: $1 - \beta_C^N = 0.0583 IЗВ + 1.212$; $2 - \beta_H^N = 0.883 IЗВ - 0.423$; $3 - \beta_H^{N'} = 0.22 IЗВ' + 0.805$.

В основі захисту ґрунту, поверхневих, стічних вод, металоконструкцій від негативного впливу ВМ синергічною захисною композицією лежить синергізм дії її компонентів. Відбувається, насамперед, внутрішньомолекулярний синергізм СД, якому сприяють індуктивна, мезомерна та резонансна взаємодія полярних груп з реакційними центрами, з активізацією металохелатування. Крім того, металохелатування підсилюється внаслідок міжмолекулярного синергізму, який пов'язаний з активними діючими складовими регіональних відходів, утилізованих у СЗК: К містить амідні групи в складі ϵ -капролактаму його олігомерів, де атоми С, N, O мають sp^2 -гібридизацію і проявляють негативний індукційний та мезомерний ефекти; МП містить декілька подвійних зв'язків, які активізують утворення π -металохелатів.

Утворюються нерозчинні металохелатні комплекси, які перетворюють лабільну форму ВМ в нелабільну. Цеоліт у складі СЗК, як активний полярний адсорбент, сприяє очищенню не лише від ВМ, але і від органічних сполук з кратними зв'язками [2, 8–10]. Він забезпечує адсорбцію металохелатів ВМ та їх вільних катіонів (активаторів руйнування металоконструкцій) йонним обміном. Утворенню наномасштабних захисних стійких металохелатних плівок на поверхні металу сприяє також активізація металохелатування за теорією HSAB (hard and soft acid-base): взаємодія м'якого акцептора (поверхневі атоми Fe) з м'яким донором (Ім-кільця), що обумовлює надійний протикорозійний захист від руйнування металоконструкцій, техногенних аварій та запобігає великим економічним втратам. Таким чином, підтверджено механізм дії СЗК, поданий раніше [8–10].

ВИСНОВКИ

Техногенний вплив інгредієнтного забруднення середовища важкими металами (Cu, Zn, Cd, Pb, V, Mn, Cr, Ni) зумовлює суттєву негативну дію щодо корозійної тривкості сталі та витривалості, експлуатаційної надійності металоконструкцій. За розробленою інтегральною оцінкою рівнів техногенного впливу встановлено кореляційні залежності “Інтегральні показники техногенного забруднення–корозійна тривкість сталі”: із збільшенням сумарного показника забруднення ґрунту Z_c на 25% корозійна тривкість знижується, зростають корозійні втрати металу за K_p – на 90%, а з підвищенням ІЗВ (з 2,8 до 5,8 синхронно збільшується і β_C^N) зростає на 55% показник впливу наводнювального середовища β_H^N на малоциклову втому – одну із основних причин техногенних аварій. Енергетичне забруднення середовища (ЕМП, вібрація, радіація) також знижує корозійну тривкість сталі: зокрема, зі зростанням радіоактивного забруднення ґрунту на 73% (внаслідок Чорнобильської катастрофи) корозійна тривкість сталі зменшується на 50%. Розроблена на основі комплексного системного кореляційного аналізу синергічна захисна композиція (з комп'ютерним моделюванням електронних та термодинамічних характеристик молекул синергічних додатків, завдяки внутрішньо- та міжмолекулярному синергізму її активних складових) забезпечує ефективний протикорозійний захист сталі за техногенного інгредієнтного та енергетичного забруднення: за K_p – на 90...93%, за β_H^N – на 51%, β_C^N – на 80...83%, з одночасним зниженням техногенного забруднення (за Z_c – на 51...60%, ІЗВ – на 63...65%, A – на 82...90%).

Механізм дії СЗК обумовлений металохелатуванням ($K_{st} = 10^{10}...10^{15}$) як в об'ємі середовища (зв'язування лабільних форм ВМ у нелабільні нерозчинні металохелатні комплекси), так й на поверхні сталі, модифікуючи її стійкою наномасштабною металохелатною захисною плівкою.

1. Сидоренко С. Н., Черных Н. А. Коррозия металлов и вопросы экологической безопасности магистральных трубопроводов. – М.: РУДН, 2002. – 83 с.

2. Рудько Г. І., Адаменко О. М. Конструктивна геоecологія: наукові основи та практичне втілення. – К.: Маклаут, 2008. – 320 с.
3. Давыдова С. Л., Тагасов В. И. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века. – М.: РУДН, 2002. – 140 с.
4. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. – М.: Физ.-мат. лит., 2002. – 336 с.
5. Хільчевський В. К. Водопостачання і водовідведення. Гідроекологічні аспекти. – К.: Вид. центр “Київ. ун-т”, 1999. – 320 с.
6. Nazarchuk Z. T. and Nykyforchyn H. M. Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physicochemical mechanics of materials // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 1. – P. 7–21.
7. Pokhmurs'kyi V. I. Development of investigations in the field of corrosion and stress-corrosion fracture of metals and the methods of their protection (A survey) // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 4. – P. 451–464.
8. *Effect of radioactive contamination of the medium on the durability of steel 20* / S. D. Tsybulya, V. G. Starchak, K. N. Ivanenko, N. P. Buyalska, and I. A. Kostenko // *Radiochemistry*. – 2017. – **59**, № 5. – P. 535–540.
9. Кузнецов Ю. И., Подгорнова Л. М. Ингибирование коррозии металлов гетероциклическими хелатореагентами // *Итоги науки и техники. Коррозия и защита*. – М.: ВИНТИ, 1989. – **15**. – С. 132–185.
10. Патент 66437 Україна, МПК (2011.01), С23F 11/00, А 01В 79/00. Композиція для зменшення забруднення ґрунту важкими металами як небезпечними екологічно корозійними агентами / В. Г. Старчак, С. Д. Цибуля, І. Д. Пушкарьова, Г. М. Мачульський. – Опубл. 10.01.2012; Бюл. № 1. – 8 с.

Одержано 16.11.2020