

УДК 620.193.2:699.822

## ІНГІБІТОРНИЙ ЗАХИСТ СТАЛЕВОЇ АРМАТУРИ ПОШКОДЖЕНОГО ТРІЩИНАМИ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

*В. І. ПОХМУРСЬКИЙ<sup>1</sup>, В. І. МАРУХА<sup>2</sup>, І. М. ЗІНЬ<sup>1</sup>, І. П. ГНИП<sup>2</sup>, Л. М. БІЛИЙ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> ДПЦ "Техно-Ресурс" НАН України, Львів

Для корозійно-електрохімічних досліджень розроблені та виготовлені оригінальні модельні бетонні зразки-чарунки, які забезпечують ідентичність умов випробувань для шістьох зразків арматури. Вивчені поляризаційні характеристики модельних зразків, витриманих у середовищі слабнокислого дощу, кінетика та частотні залежності характеристик імпедансу. Встановлено, що найефективнішою для протикорозійного захисту сталеві арматури є суміш інгібіторів, яка в рівному співвідношенні містить натрію молібдат і кальцію нітрат. Її інгібувальна ефективність у 10–12 разів вища, ніж самих компонентів зокрема, що вказує на прояв ефекту синергізму. Механізм синергізму захисної дії інгібіторів полягає в протіканні на поверхні металу двох процесів, які взаємно підсилюють один одного. Додавання інгібітора в поліуретанову ін'єкційну композицію для ремонту залізобетонних конструкцій підвищує міцність зчеплення арматури з бетоном порівняно з неінгібованою за довготривалої дії корозивного середовища. Використовуючи ефект синергізму під час розроблення інгібувальних сумішей неорганічних речовин, можна багатократно зменшити витрату матеріалів і суттєво поліпшити технологічність застосування ін'єкційних полімерних композицій для ремонту залізобетонних конструкцій тривалої експлуатації.

**Ключові слова:** залізобетон, сталева арматура, корозія, інгібітор корозії, синергізм, ін'єкційна композиція, електрохімічні та імпедансні дослідження, поверхневий спектральний аналіз.

Залізобетонні споруди тривалої експлуатації поступово руйнуються під впливом довкілля внаслідок корозії сталеві арматури та розтріскування бетону [1, 2]. На початку експлуатації водно-сольове середовище в бетоні лужне, що сприяє пасивації поверхні арматури. Після взаємодії бетону з вуглекислим, сірчистим та іншими газами показник рН цього середовища знижується до значень, за яких і починається корозія арматури. Крім того, в атмосфері, забрудненій викидами промислових підприємств, зафіксовано слабкі кислі опади [3], що додатково погіршує умови експлуатації залізобетонних конструкцій. На розтріскування бетонної матриці та її відшарування від арматури істотно впливає збільшення об'єму продуктів корозії заліза в 2–7 разів щодо початкового об'єму металу. Інгібітори можуть істотно зменшити корозію сталевих елементів і зберегти міцність залізобетонної конструкції [4].

Сучасні методи ремонту охоплюють технологію реновації (відновлення роботоздатності) бетонних і залізобетонних конструкцій та споруд уведенням під тиском у порожнини тріщин чи інших корозійно-механічних пошкоджень в'язкотекучих поліуретанових композицій [5, 6]. Високого ступеня заповнення об'єму таких порожнин рідкими поліуретановими композиціями досягають, подаючи відновні матеріали у бетонну матрицю під високим тиском (рис. 1).

Для реалізації цієї операції використовують спеціальні ін'єкційні установки мембранного або плунжерного типів, що подають в отвори в бетонній матриці одно- або двокомпонентні поліуретанові композиції. Така технологія забезпечує гідроізоляцію арматури в залізобетонних конструкціях з тріщинами, однак, не створює умов для пасивування та захисту її поверхні після повторного проникнення до металу середовища крізь масу бетону і дефекти в ін'єктованому полімерному шарі. Арматура в залізобетоні потребує додаткового захисту від корозії. У літературі відомі інгібувальні композиції для просочування залізобетону [7], які, однак, мають недостатні захисні характеристики.

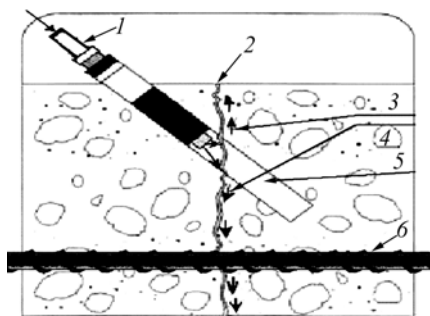


Рис. 1. Схема відновлення зруйнованої тріщиною залізобетону за методом ін'єктування рідкою поліуретановою композицією: 1 – спрямувальний пакер; 2 – тріщина, заповнена водою; 3, 4 – напрями проникнення полімерної композиції; 5 – висвердлений отвір; 6 – сталевая арматура.

Fig. 1. A scheme of repair of cracked reinforced concrete by the method of liquid polyurethane composition injection: 1 – direction packer; 2 – water filled crack; 3, 4 – directions of polymer composition penetration; 5 – drilled hole; 6 – steel armature.

Мета нашого дослідження – пошук нової суміші інгібіторів з ефектом синергізму захисної дії і дослідження її властивостей для використання в ін'єкційних композиціях на поліуретановій або поліакрилової основі.

**Методи випробувань.** Для корозійно-електрохімічних досліджень використовували арматурну сталь А500С (ГОСТ 3760-98) у стані постачання. Корозивним середовищем слугував слабокислий розчин з рН ~4,5 (3,18 mg/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 4,62 амонію сульфату + 3,20 натрію сульфату + 1,58 HNO<sub>3</sub> + 2,13 натрію нітрату + 8,48 mg/l натрію хлориду), що імітує атмосферні опади в промислових районах України. У цей розчин додавали 1 g/l кальцію нітрату, натрію молібдату та їх сумішей у певних пропорціях [8]. Використовували триелектродну електрохімічну комірку з робочою площею зразка 2×2 cm<sup>2</sup>, насичений каломельний електрод порівняння і платиновий допоміжний. Потенціодинамічні поляризаційні криві знімали на потенціостаті ІРС-ProM, з'єднаному з комп'ютером. Струми корозії сталі в інгібованих розчинах визначали екстраполяцією тафелевих ділянок поляризаційних кривих.

Захисні властивості інгібованих ін'єкційних композицій вивчали методом імпедансу [9]. Вимірювали при кімнатній температурі автоматичним мостом змінного струму Р-5083 за частоти струму 0,1 kHz. Для цього розробили оригінальну конструкцію бетонних зразків у вигляді циліндрів заввишки 100 mm і діаметром 100 mm з просвердленими шістьма рівновіддаленими отворами Ø12 mm і завглибшки 80 mm – для прутків сталеві арматури та центральним наскрізним отвором Ø20 mm – для допоміжного протиелектрода (рис. 2). Рівновіддалені від центра циліндра, стінок і між собою зразки арматури в бетоні знаходилися в максимально ідентичних умовах випробувань, що давало можливість з більшою точністю ранжирувати якість інгібіторів одночасно в шести чарунках.

Зразки (рис. 2) виготовляли з портландцементу марки 500 і піску з модулем крупності від 1,5 до 2, за водоцементного співвідношення 0,4. Прутки арматури Ø12 mm із сталі А500С розміщували в отворах бетонних зразків, задалегідь за-

повнених ін'єкційною поліуретановою композицією Webac 1403 з додатками неорганічних інгібіторів – кальцію нітрату і натрію молібдату в різних масових співвідношеннях. Композиція структурувалась за кімнатної температури шляхом взаємодії компонентів А і В. Робоча площа поверхні зразка арматури 35 см<sup>2</sup>. Випробовували одночасно шість однакових зразків за різного складу ін'єкційної композиції, зануривши бетонний зразок у робочий розчин електроліту. Поверхневий аналіз захисних плівок, утворених на арматурній сталі після витримки в досліджуваних розчинах, здійснювали на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP зі системою мікроаналізу INCA Energy 350.

Рис. 2. Схема вимірювання імпедансу стержнів сталеві арматури, закріплених ін'єкційними композиціями з різними інгібіторами у бетонному зразку: 1 – вимірювач параметрів імпедансу P-5083; 2 – допоміжний електрод; 3 – зразок; 4 – ін'єкційна композиція; 5 – середовище; 6 – бетон; 7 – резервуар.

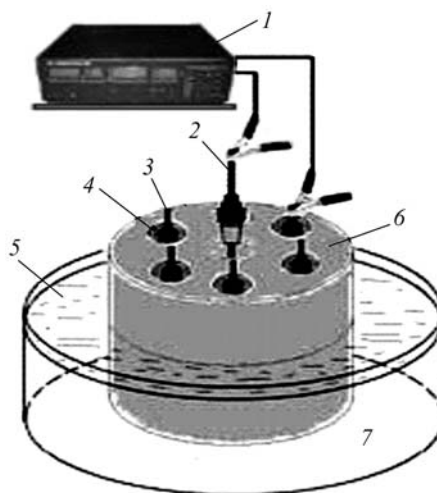


Fig. 2. Scheme of impedance measurements of steel reinforcement rods, fixed in the concrete sample by injection compositions with different inhibitors: 1 – impedance meter P-5083; 2 – auxiliary electrode; 3 – sample; 4 – injection composition; 5 – environment; 6 – concrete; 7 – reservoir.

Для вивчення адгезії (міцності зчеплення) арматури з бетоном виготовляли бетонні зразки розмірами 100×100×300 mm (рис. 3) з тих самих матеріалів і за тих самих умов, що й зразки для електрохімічних досліджень. Зразки арматури Ø12 mm із сталі А500С, виготовлені із прутків тієї ж партії, що і для електрохімічних випробувань, розміщували упоперек великої осі зразків у вершині вузького концентратора – імітатора тріщини, тобто в зоні максимальних напружень розтягу (у зоні передруйнування). Завдяки такому розміщенню досягали максимальної чутливості методу.

Рис. 3. Схема зразка з бетону для визначення адгезії арматури методом випробування на згин:

- 1 – бетонна призма;
- 2 – пруток із арматурної сталі;
- 3 – концентратор напруження.

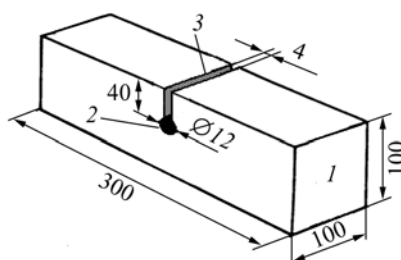


Fig. 3. Scheme of the concrete sample for determination of reinforcement adhesion by bending test method: 1 – concrete prism; 2 – steel reinforcement rod; 3 – stress concentrator.

На міцність зразки випробовували на машині EUS-20 зосередженим згином з розташуванням навантажувального індентора в площині тріщини. Швидкість навантаження  $5 \cdot 10^{-3}$  МПа/с. Напруження руйнування зразків з урахуванням глибини концентратора розраховували за формулою  $\sigma_k = 3PL / 2b(h - h_k)^2$ , де  $P$  – зусилля руйнування;  $L$  – відстань між опорами;  $b$  – ширина зразків;  $h$  – їх висота;  $h_k$  – глибина концентратора напружень.

**Дослідження ефективності інгібування корозії арматурної сталі кальцію нітратом і натрію молібдатом.** Після додавання в слабокислий корозивний розчин 1 g/l кальцію нітрату значення електродного потенціалу сталі A500C знаходились у межах  $-600 \dots -650$  mV і практично не відрізнялись від таких у неінгібованому робочому середовищі. Це узгоджується з даними праці [4], в якій показано, що ефективність кальцію нітрату при  $pH < 6$  суттєво знижується. Після додавання його в корозивний розчин разом з молібдатом натрію потенціал корозії сталі зсувається в бік позитивніших значень. Максимальні значення потенціалу спостерігаються для зразків у розчині, інгібованому композицією молібдат/нітрат за співвідношення 1:1 (рис. 4), коли, ймовірно, слід очікувати істотного уповільнення корозії металу.

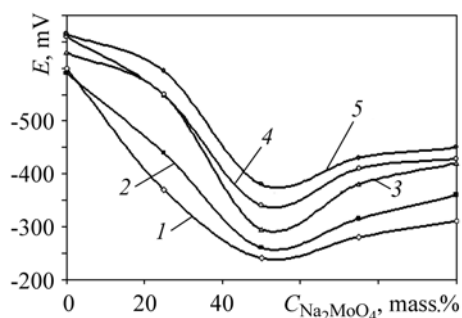


Рис. 4. Залежності потенціалу корозії арматурної сталі A500C від вмісту натрію молібдату в інгібувальній суміші за сумарної концентрації натрію молібдату і кальцію нітрату в корозивному розчині 1 g/l після витримки впродовж: 1 – 24 h; 2 – 48; 3 – 96; 4 – 170 і 5 – 220 h.

Fig. 4. Potential corrosion of A500C reinforcing steel versus the content of sodium molybdate in inhibiting mixture at 1 g/l total concentration of sodium nitrate and calcium molybdate in corrosion solution after exposure for: 1 – 24; 2 – 48; 3 – 96; 4 – 170 and 5 – 220 h.

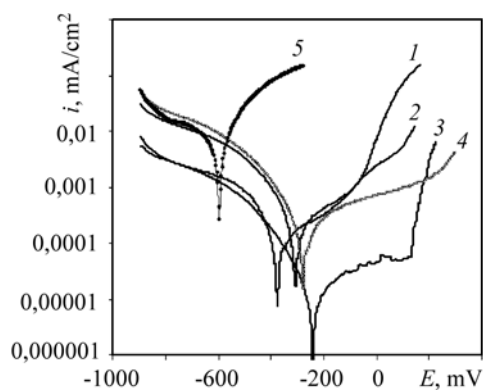


Рис. 5. Потенціодинамічні поляризаційні криві арматурної сталі A500C після 24 h витримки в корозивних розчинах, що містять: 1 – 1 g/l натрію молібдату; 2 – 0,34 g/l натрію молібдату + 0,66 g/l кальцію нітрату; 3 – 0,5 g/l натрію молібдату + 0,5 g/l кальцію нітрату; 4 – 0,66 g/l натрію молібдату + 0,34 g/l кальцію нітрату і 5 – 1 g/l кальцію нітрату.

Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves of A500C reinforcing steel after 24 h exposure in corrosion solutions, which contain the inhibitors: 1 – 1 g/l sodium molybdate; 2 – 0.34 g/l sodium molybdate + 0.66 g/l calcium nitrate; 3 – 0.5 g/l sodium molybdate + 0.5 g/l calcium nitrate; 4 – 0.66 g/l sodium molybdate + 0.34 g/l calcium nitrate and 5 – 1 g/l calcium nitrate.

Як видно з потенціодинамічних поляризаційних залежностей арматурної сталі в інгібованих натрію молібдатом і кальцію нітратом розчинах, у нітратному розчині переважно катодний контроль корозійних реакцій, а анодна реакція значно полегшена (рис. 5, крива 5). Очевидно, що в слабокислом корозивному розчині з  $pH < 4,5$  пасивувальна здатність кальцію нітрату проявляється не повністю. Після додавання в середовище натрію молібдату характер поляризаційних залежностей істотно змінюється: на анодних ділянках кривих з'являються плато пасивності (криві 1–4) і найбільше це плато виражене для середовища, в якому рівні кількості натрію молібдату і кальцію нітрату (крива 3).

Залежності струму корозії сталі, визначені графічною екстраполяцією тафелевих ділянок поляризаційних кривих, від відносного вмісту натрію молібдату в інгібувальній суміші з кальцію нітратом мають екстремальний характер (рис. 6). Мінімум струму корозії сталі для всіх часових витримок у робочому середовищі спостерігається за співвідношення натрію молібдату/кальцію нітрату 50:50 mass.%.

Рис. 6. Залежності густини струму корозії арматурної сталі А500С від вмісту натрію молібдату в інгібувальній суміші (сумарна концентрація натрію молібдату і кальцію нітрату в розчині 1 г/л) після витримки: 1 – 24 h; 2 – 48; 3 – 96; 4 – 170 і 5 – 220 h.  
Fig. 6. Dependences of corrosion current dependences of А500С reinforcing steel versus relative content of sodium molybdate in inhibitor mixture (total concentration of sodium molybdate and calcium nitrate in the solution was 1 g/l) after exposure for: 1 – 24 h; 2 – 48; 3 – 96; 4 – 170 and 5 – 220 h.

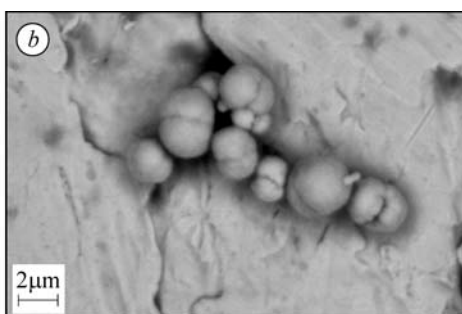
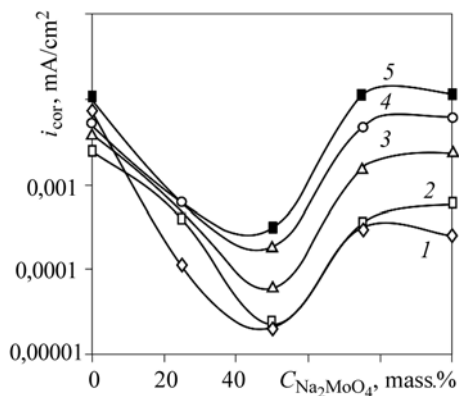
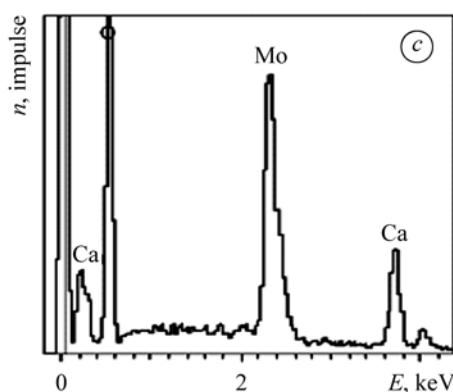
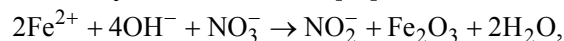


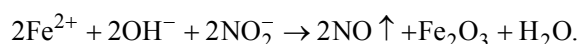
Рис. 7. Електронно-мікроскопічне зображення відкладень продуктів корозії на поверхні арматурної сталі (a, b) і результати мікрорентгено-спектрального аналізу (c).

Fig. 7. Scanning electron microscope image of deposits on surface of reinforcing steel (a, b) and results of energy dispersive X-ray analysis of these deposits (c).



Електронно-мікроскопічним і мікрорентгеноспектральним дослідженнями поверхні арматурної сталі встановлено, що після витримки в корозивному слабкокислом розчині, інгібованому сумішшю натрію молібдату і кальцію нітрату у співвідношенні 1:1, на поверхні сталі після 24 h витримки починає осідати захисна плівка з округлих нерозчинних утворень (рис. 7a, b). За даними мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 7c) вони містять атоми молібдену, кальцію, кисню і можна припустити, що плівка формується переважно на основі натрію молібдату, а нітрат-іони гальмують розчинення металу, сприяючи утворенню пасивного шару на основі заліза оксиду за такою схемою [10]:





**Імпедансні дослідження модельних систем бетонний зразок–ін'єкційна композиція–сталева арматура.** У бетонний зразок із шістьма отворами (див. рис. 3) запакували шість стержнів зразків арматури за допомогою ін'єкційних композицій різного складу. До чистої поліуретанової композиції Webac 1403 із розрахунку на сумарний об'єм поліольного (А) та ізоціанатного (В) складників додавали (mass.%): 1 – 6 натрію молібдату; 2 – 6 кальцію нітрату ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ); 3 – 3 кальцію нітрату + 3 натрію молібдату; 4 – 2 натрію молібдату + 4 кальцію нітрату; 5 – 4 натрію молібдату + 2 кальцію нітрату; 6 – композиція без інгібіторів – контрольний зразок.

Встановлено, що питомий омичний опір модельної системи бетон–поліуретан–арматурна сталь в перші дні витримки в слабкокислому дощовому розчині різко знижується для всіх складів інгібувальних композицій, що свідчить про набухання полімерного шару між стінкою бетонного зразка та стержнем арматури. Така зміна типова для полімерних матеріалів. Далі опір стабілізується і впродовж 125 days витримки в середовищі дещо зростає. Однак для системи з поліуретановою композицією, яка містить суміш нітратного і молібдатного інгібіторів у рівних кількостях, він приблизно в 2,2–2,7 рази вищий, ніж для інших, коли в полімерному шарі тільки один із указаних інгібіторів (рис. 8а).

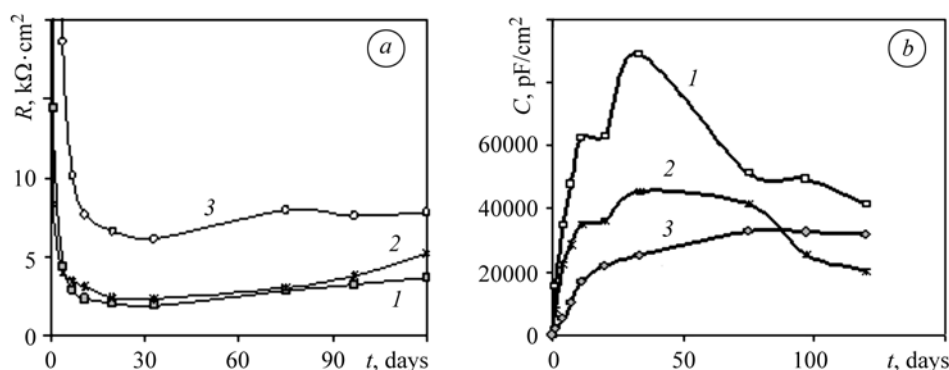


Рис. 8. Часові залежності опору змінному струму (а) та ємності (б) модельного залізобетонного зразка, ін'єктованого поліуретановими композиціями: 1 – 6 mass.% натрію молібдату; 2 – 6 кальцію нітрату і 3 – 3 натрію молібдату і 3 mass.% кальцію нітрату (частота струму 0,1 kHz).

Fig. 8. Time dependences of AC current resistance (a) and capacitance (b) of reinforced concrete model sample injected with polyurethane compositions, which contained: 1 – 6 mass.% of sodium molybdate; 2 – 6 of calcium nitrate; 3 – 3 of sodium molybdate and 3 mass.% of calcium nitrate (current frequency was 0.1 kHz).

Залежності ємності від часу витримки модельних систем у розчинах наближено корелюють із відповідними залежностями опору. Впродовж 40...50 days витримки в слабкокислому середовищі ємність систем зростає, що, очевидно, спричинено проникненням молекул води і іонів розчину в ін'єкційний шар. Тут також можливе повільне розчинення неорганічних інгібіторів і попадання їх у корозивне середовище в околі арматурних стержнів. Після 50 days експозиції ємність починає знижуватися, що, найімовірніше, викликане пасивацією поверхні арматурних стержнів під впливом інгібіторів. Для поліуретанової композиції з сумішшю нітратного і молібдатного інгібіторів ємність модельної системи найнижча, що свідчить про утворення на поверхні стержнів арматури суцільної пасивувальної плівки. На основі аналізу залежності електродного потенціалу, вольтамперних

характеристик, густини струму корозії та імпедансних характеристик від співвідношення вмісту натрію молібдату та кальцію нітрату в інгібувальній суміші встановлено, що максимальна ефективність інгібіторного захисту сталі від корозії в середовищі штучного слабкогокислого дощу є за приблизно рівної (50:50) масової концентрації цих хімічних сполук [11]. На основі цього запропоновано нову ін'єкційну композицію для захисту арматури в залізобетоні [12].

**Дослідження впливу розробленого інгібітора на механічні властивості бетонних зразків з арматурними прутками** (див. рис. 3). Одну серію призматичних бетонних зразків витримували в середовищі штучного слабкогокислого дощу, другу – в тому ж середовищі, інгібованому сумішшю натрію молібдату і кальцію нітрату за співвідношення 1:1, третю контрольну – в лабораторному повітрі. Час витримання в інгібованому та неінгібованому середовищах 60 days, тобто перевищував час пасивації арматурної сталі за наявності інгібітора (рис. 8b).

Бетонні зразки випробовували після висихання поверхні, тобто не скоріше ніж за 12 h після виймання з ванни. Середовище слабкогокислого дощу суттєвіше знижує міцність зразків (№ 6–10), ніж таке саме з інгібітором (№ 11–15), що складається з рівних частин кальцію нітрату та натрію молібдату, проти міцності контрольних зразків (№ 1–5), які не знаходилися під впливом середовища (див. таблицю, перша колонка).

Менші значення міцності зразків, витриманих у середовищі слабкогокислого дощу без інгібітора є, мабуть, наслідком більшого об'єму продуктів корозії, утворених на поверхні арматурних стержнів. Тріщини поширилися на межі поділу округлої арматури і бетону, де реалізується складнонапружений стан – розтяг зі зсувом під час згину зразка, розповсюджувались по контуру арматури і далі в бетоні до розламу зразка (рис. 9a).

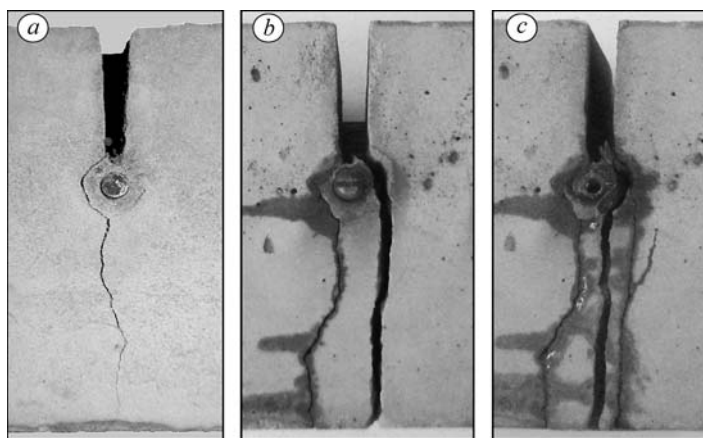


Рис. 9. Вигляд розламів вихідного (a), один раз (b) і двічі (c) склеєних бетонних призматичних зразків.

Fig. 9. View of fracture of initial (a), once glued (b) and twice glued (c) concrete prismatic specimens.

Злами зразків висушували в лабораторному повітрі та склеювали парні половинки ін'єкційною композицією, імітуючи заповнену щілину тріщин під час ремонту бетонних конструкцій. Парні половинки розламаних зразків, витриманих на повітрі і в середовищі без інгібітора, склеювали ін'єкційною композицією без вмісту інгібітора, а половинки зразків, витриманих у середовищі з інгібітором – ін'єкційною композицією з додаванням інгібітора. Інгібітор висушували впродовж 1 h при 125°C і після охолодження до температури лабораторного повітря

відразу додавали поліолльний складник поліуретану через гігроскопічність кальцію нітрату.

**Дані випробувань бетонних зразків з арматурними прутками Ø12 mm  
у вершинах концентраторів напруження**

№ зразка	Міцність зразків $\sigma_k$ , МПа			$\sigma_{k2}/\sigma_{k1}$	Примітка
	вихідний стан, $\sigma_{k0}$	перше склеювання, $\sigma_{k1}$	друге склеювання, $\sigma_{k2}$		
1	3,9	4,1	5,2		Витримка на повітрі, склеювання без інгібіторів
2	4,2	4,3	5,1		
3	3,5	3,6	4,9		
4	3,7	3,9	4,7		
5	3,4	3,7	4,3		
Середнє значення	3,7	3,9	4,8	1,3	
6	3,1	3,3	3,8		Витримка в середовищі слабкислого дощу 60 days, склеювання без інгібітора
7	3,8	3,9	4,1		
8	2,9	3,2	3,7		
9	3,3	3,5	3,9		
10	3,0	3,3	3,6		
Середнє значення	3,2	3,4	3,8	1,2	
11	3,6	3,9	4,2		Те саме, склеювання з інгібітором
12	3,6	3,8	4,3		
13	3,8	4,2	4,5		
14	3,5	3,9	4,1		
15	3,7	3,7	3,9		
Середнє значення	3,6	3,9	4,2	1,2	

Після склеювання зразки витримували 7 days у лабораторних умовах для полімеризації поліуретану і знову занурювали в корозивні розчини. Через 20 days їх повторно випробовували на міцність зосередженим згином. Тріщини зароджувалися і розповсюджувалися на протилежній від склеєної поверхні прутка арматури (рис. 9b), а міцність склеєних зразків усіх серій була дещо вища, ніж у вихідному стані (див. таблицю, друга колонка). Це можна пояснити тим, що в першому випадку зразки руйнувалися по слабшій ділянці. Зруйновані після першого склеювання зразки висушували і склеювали повторно парні половинки за вищеписаною технологією і знову занурювали у відповідні корозивні розчини на 20 days.

Встановлено, що міцність склеєних двічі зразків, коли арматура приклеєна до бетону по колу, зростає порівняно зі зразками у вихідному стані в 1,2–1,3 рази. Максимальна вона у зразків, що не піддавалися дії корозивного середовища, дещо менша у тих, що знаходилися в середовищі слабкислого дощу. Суттєвий вплив інгібітора на збільшення міцності зразків проти неінгібованого розчину та



ін'єкційної композиції (див. таблицю, четверта колонка) є, очевидно, наслідком зменшення товщини шару іржі на поверхні арматури.

Отримані результати узгоджуються з відомими [13], коли міцність зразків після ремонту за методом ін'єкційних технологій збільшувалася в 1,4 рази. Підвищення міцності двічі і один раз склеєних зразків порівняно з вихідними пояснюють зміною траєкторії тріщини (в обхід стержня арматури, рис. 9с) з позицій механіки руйнування [14].

### **ВИСНОВКИ**

Розроблені та виготовлені оригінальні модельні бетонні зразки-чарунки для корозійно-електрохімічних досліджень, які забезпечують ідентичність умов випробувань для шести зразків арматури. Вивчено поляризаційні залежності струму від напруги, потенціали корозії та характеристики імпедансу модельних зразків, витриманих у середовищі слабкогокислого дощу з додаванням суміші інгібіторів.

Встановлено, що найефективніша для протикорозійного захисту сталеві арматури суміш інгібіторів, яка містить натрію молібдат і кальцію нітрат у рівному співвідношенні за масою. Причому ефективність її в 10–12 разів вища, ніж кожного з її компонентів, що вказує на прояв ефекту синергізму. Механізм синергізму захисної дії суміші інгібіторів полягає в протіканні на поверхні металу двох процесів, які взаємно підсилюють один одного.

Після додавання інгібітора в поліуретанову ін'єкційну композицію для ремонту залізобетонних конструкцій міцність зчеплення арматури з тілом бетону підвищується в 1,2–1,3 рази порівняно з неінгібованою за тривалої дії корозивного середовища. Використовуючи ефект синергізму під час розробки сумішей неорганічних інгібувальних речовин, можна багаторазово зменшити витрату матеріалів та істотно поліпшити технологічність застосування інгібувальних ін'єкційних полімерних композицій для ремонту залізобетонних конструкцій тривалої експлуатації.

*РЕЗЮМЕ.* Для коррозионно-электрохимических исследований разработаны и изготовлены оригинальные модельные бетонные образцы-ячейки, обеспечивающие идентичность условий испытаний для шести образцов арматуры. Изучены поляризационные характеристики модельных образцов, выдержанных в среде слабкогокислого дождя, кинетика и частотные зависимости характеристик импеданса. Установлено, что наиболее эффективной для антикоррозионной защиты стальной арматуры является смесь ингибиторов, которая в равном соотношении по массе содержит натрия молибдат и кальция нитрат. Ее ингибирующая эффективность в 10–12 раз выше, чем ее компонентов в отдельности, что указывает на проявление эффекта синергизма. Механизм синергизма защитного действия смеси ингибиторов заключается в протекании на поверхности металла двух процессов, которые взаимно усиливают друг друга. Добавление ингибитора в полиуретановую инъекционную композицию для ремонта железобетонных конструкций повышает прочность сцепления арматуры с телом бетона по сравнению с неингибированной композицией при длительном воздействии коррозионной среды. Использование эффекта синергизма при разработке ингибирующих смесей неорганических веществ позволяет многократно уменьшить расход материалов и существенно улучшить технологичность применения инъекционных полимерных композиций для ремонта железобетонных конструкций длительной эксплуатации.

*SUMMARY.* Special model concrete cells, providing identity of tests for six armature samples, were prepared. Polarisation characteristics and impedance dependences of the model cells, exposed to acid rain solution, were studied. It was established, that the inhibitor blend, containing sodium molybdate and calcium nitrate at equal mass ratio, is most effective for corrosion protection of steel armature. Inhibition efficiency of the blend is in 10–12 times higher than efficiencies of its single components. This clearly indicates a synergistic effect. The mechanism of synergistic protective effect of the inhibitor mixture consists in passing on metal surface of two processes reinforcing each other. The inhibitor addition to the polyurethane injection composition, used for concrete construction repair, increases the adhesion between concrete and

reinforcement exposed to corrosion environment. The use of synergism effect in the development of inorganic inhibitor mixtures allows us to reduce significantly the consumption of materials and to improve manufacturability of injection polymer compositions for reinforced concrete repair.

**Робота виконана за фінансової підтримки комплексної програми наукових досліджень НАН України “Ресурс”, “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”, проект № 3.5 “Розробка методів захисту від корозії сталеві арматури для продовження ресурсу залізобетонних конструкцій, будівель і споруд”.**

1. *Алексеев С. Н., Розенталь Н. К.* Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 132 с.
2. *Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / В. М. Москвин, С. Н. Алексеев, Г. П. Вербецкий, В. И. Новгородский.* – М.: Стройиздат, 1971. – 144 с.
3. *Acid Rain. A review of the phenomenon in EEC and Europe // A report prepared for the Commission of the European Communities.* – Brussels and Luxemburg. – 1983.
4. *Алексеев С. Н., Ратинов В. Б., Розенталь Н. К.* Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
5. *Лучко Й. Й., Глагола І. І., Назаркевич Б. Л.* Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд. – Львів: Каменяр, 1999. – 229 с.
6. *Розробка ін’єкційних технологій та створення комплексу пересувного устаткування для діагностики та відновлення працездатності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд, що експлуатуються в умовах корозійно-механічного руйнування / В. І. Маруха, Я. А. Середницький, І. П. Гнип, В. П. Силованюк // Наука та інновації.* – 2007. – **3**, № 5. – С. 26–33.
7. *United States Patent № 6174461. C04B41/45. Concrete sealers with migrating corrosion inhibitors / В. А. Miksic, С. М. Suchy, М. Kharshan.* – Publ. 01.16.2001.
8. *Особливості інгібування корозії алюмінієвого сплаву безхроматною сумішшю пігментів / І. М. Зінь, С. Б. Лайон, Л. М. Білий, М. Б. Ратушна // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* 2008. – № 5. – С. 45–52.
9. *Карякина М. И.* Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
10. *Saraswathy V. and Song H.-W.* Improving the durability of concrete by using inhibitors // *Building and Environment.* – 2007. – **42.** – P. 464–472.
11. *Синергичний вплив нітратного та молібдатного інгібіторів на корозію арматурної сталі / В. І. Похмурський, І. М. Зінь, В. І. Маруха та ін. // Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціала.* – ПГТ Славское Львовской обл., февраль, 2009. – С. 110–112.
12. *Патент на корисну модель № 40707* Ін’єкційна композиція / В. І. Похмурський, І. М. Зінь, В. І. Маруха, І. П. Гнип, Л. М. Білий. – Опубл. 27.04.2009; Бюл. № 8.
13. *Лебедев С. В., Коляда В. М., Коляда С. В.* Просочувально-штукатурно-ін’єкційно-фарбувальна технологія санації залізобетонних конструкцій, що мають пошкодження та дефектні зони // *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин.* – К.: ІЕЗ ім. Е. О. Патона, 2006. – С. 470–473.
14. *Панасюк В. В., Силованюк В. І., Маруха В. І.* Міцність пошкоджень тріщинами елементів конструкцій, залікованих за ін’єкційними технологіями // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2005. – № 6. – С. 60–64.  
(*Panasjuk V. V., Sylovanyuk V. P., and Marukha V. I.,* Strength of Cracked Structural Elements Healed by Injection Methods // *Materials Science.* – 2005. – № 6. – С. 777–783).

Одержано 25.08.2010