

УДК 539.421:624.012:666.96

ПІДВИЩЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ПОШКОДЖЕНИХ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ УЩІЛЬНЮВАЛЬНО- ЗМІЦНЮВАЛЬНИМИ ІН'ЄКЦІЯМИ

В. І. МАРУХА

ДП Інженерний центр "Техноресурс" НАН України, Львів

Розглянуто основні підходи до аналізу технічного стану бетонних і залізобетонних конструкцій із експлуатаційними дефектами та оцінено ефективність підвищення їх роботоздатності ін'єкційними технологіями. Розраховано параметри цих технологій та запропоновано низку ін'єкційних композиційних матеріалів на поліуретановій та поліепоксидній основі, які мають високі технологічні характеристики, а їх ефективність підтверджують результати випроб лабораторних зразків із заповненими концентраторами напружень. Виявлені додаткові можливості протикорозійного захисту оголеної сталевий арматури введенням до ін'єкційних композицій інгібіторів корозії, а також розкрито технологічні особливості зміцнення пошкоджених конструкцій заповненням виявлених дефектів.

Ключові слова: бетон, залізобетон, тріщина, відновлення міцності, ін'єкційний матеріал, інгібіторний захист, технологія зміцнення.

Останнім часом у будівельній індустрії значну увагу приділяють відновленню міцності та роботоздатності пошкоджених бетонних та залізобетонних конструкцій тривалої експлуатації [1]. Проблема стосується і промислових об'єктів, і житлово-комунального фонду, що часто має історичну та архітектурну цінність. Для залізобетонних споруд ситуація загострюється через їх розтріскування внаслідок корозії сталевий арматури, через що збільшується сумарний об'єм металу і продуктів корозії, а отже, виникають розтягувальні напруження у бетонних матрицях [2, 3]. Утворення в бетоні тріщиноподібних дефектів – основна загроза міцності та довговічності таких конструкцій, тому, "заліковуючи" (усуваючи) їх, можна поліпшити ці характеристики.

Підвищення залишкового ресурсу пошкоджених бетонних (залізобетонних) конструкцій ін'єкційними технологіями – комплексна задача, яка охоплює концепції фізико-хімічної механіки матеріалів та вимагає певних інженерних і технологічних рішень. Нижче акцентували увагу на ключових аспектах, які визначають ефективність підходу. Серед них: оцінювання корозійно-механічного стану конструкцій з дефектами, заповненими ущільнювальним матеріалом; розрахунок силових режимів ін'єктування; розроблення ін'єкційних матеріалів та інгібіторів корозії для поєднання відновлення міцності з інгібіторним захистом арматури; створення технологічного процесу ін'єкційного відновлення міцності.

Розрахунок силових режимів ін'єктування. Для ін'єктування дефектів необхідно проаналізувати механічний стан пошкоджених конструкцій, в першу чергу з тріщинами, які особливо небезпечні для бетону. Тут треба враховувати напружений стан в околі вершини тріщини, зумовлений ін'єктуванням під тиском з відповідним розклинювальним ефектом в'язкого наповнювача, та оцінити сам ефект зміцнення після тверднення ін'єкційного матеріалу. Для розрахунків

використовують підходи механіки руйнування та визначені технічним діагностуванням геометричні параметри пошкод, розв'язуючи задачі про граничну рівновагу тіл із заповненими тріщинами [1, 4–6].

На відміну від тріщин, поверхні яких вільні від напружень, для заповнених дефектів необхідні додаткові умови взаємодії (контакту) матеріалу заповнювача із основним. Ця взаємодія як передача частини навантаження, яке несе тіло із заповненою тріщиною, а також оптимальний вибір матеріалів заповнювача – основна суть ідеї “заліковування” пошкоджень методом ін’єктування. Зрозуміло, що ефективність такого зміцнення залежить від адгезії матеріалів на поверхні їх поділу, а природу адгезії визначають особливості фізико-хімічної взаємодії матеріалів під час їх тверднення. Зв’язки на межі поділу моделюють, керуючись підходами механіки неоднорідних тіл, силовими факторами, щоб побудувати відповідні розрахункові моделі для оцінювання міцності таких композитів і на цій основі оптимізувати вибір матеріалів для ін’єкційного заліковування пошкоджених елементів конструкцій.

Використовуючи класичну задачу Гріффітса про міцність пластини з тріщиною, наведемо дані про зміцнення тіла з заповненою ін’єкційним матеріалом тріщиною [1]. Напруження, що виникають у заповнювачі, визначимо за формулою

$$\sigma = \frac{p(1 + 2\beta)\omega}{1 + 2\beta\omega}. \quad (1)$$

Тут p – інтенсивність зовнішніх навантажень розтягом; $\beta = l/b$; $\omega = E_1/E$; l , b – геометричні параметри тріщини; E_1 , E – модулі Юнга матеріалів наповнювача і основного.

Коефіцієнт інтенсивності напружень для заповненої тріщини запишемо так [1]:

$$K_I = \frac{p\sqrt{\pi l}(1 - \omega)}{1 + 2\beta\omega}. \quad (2)$$

Звідси на основі силового критерію міцності тіла з тріщиною $K_I(p_c, l) = K_{Ic}$ встановимо граничне навантаження, за якого можливий ріст тріщини:

$$p_c = \frac{K_{Ic}(1 + 2\beta\omega)}{\sqrt{\pi l}(1 - \omega)}. \quad (3)$$

Із залежності (1) визначимо інтенсивність зовнішнього навантаження p_c^* , за якого руйнується матеріал заповнювача:

$$p_c^* = \frac{\sigma_B^*(1 + 2\beta\omega)}{(1 + 2\beta)\omega}, \quad (4)$$

де σ_B^* – границя міцності ін’єкційного матеріалу.

За оптимального вибору ін’єкційний матеріал не зруйнується раніше, ніж основний, тобто

$$p_c^* > p_c. \quad (5)$$

Із останньої нерівності та співвідношень (3), (4) оцінимо потрібну міцність ін’єкційного матеріалу:

$$\sigma_B^* > \frac{K_{Ic}\omega(1 + 2\beta)}{\sqrt{\pi l}(1 + 2\beta\omega)}. \quad (6)$$

За цієї умови міцність тіла із заповненою тріщиною визначатиме співвідношення (3). Отже, потрібного зміцнення можна досягти або збільшенням параметра β , що відповідає ін’єктуванню в момент якомога меншого розкриття тріщини, або параметра ω , що характеризує жорсткість наповнювача.

Залежність (2) експериментально підтвердили результати випроб бетону (основний матеріал) і поліуретану (ін’єкційний) за схемою, що на рис. 1. Тріщина,

яка розміщена в площині стиску, перебуває в тих самих умовах, що й тріщина Гріффітса, коли $l/R \leq 0,25$. Встановлено, що такі розрахункові моделі узгоджуються з експериментальними результатами і їх можна застосовувати в інженерній практиці.

Розроблення ін'єкційних матеріалів. Для ремонтно-відновлювальних робіт часто використовують ін'єкційні матеріали на цементній і цементно-полімерній основі. Головна їх перевага – подібність фізико-механічних характеристик у затверділому стані до таких самих бетонної матриці. Але вони не можуть проникати у малорозкриті тріщини, тому виникає загроза забивання прохідних каналів під час ін'єктування. Цих недоліків практично позбавлені плинні поліуретанові та поліепоксидні композиції, які за тисків нагнітання 10...150 бар можуть заповнювати мікротріщини і капіляри в бетонних матрицях [1].

Композиції на поліуретановій основі. Сировиною для їх розроблення служили системи преполімерів на поліолійній, поліізоціануратній та олігодіендіоловій основі із кінцевими реакційноздатними ізоціанатними групами (компонент А) і ди- або трифункціональних простих поліефірів (компонент Б). Як зшивний агент у компонентах Б застосовували розчинений у поліефірах 4,4'-діаміно-3,3'-дихлордифенілметан марки МВОСА. Як структурні гідрофобні модифікатори – кремнійорганічний лак КО-921 на поліметилфенілсилоксановій основі, а також наноструктурований органо-неорганічний олігомер марки ОНО-2 [7].

Таблиця 1. Технологічні параметри формування поліуретанових ін'єкційних композицій на поліефірі Лапрол-1002 та поліізоціанаті

№ композиції	Тип преполімера з кінцевими ізоціанатними групами	Втрата плинності	Первинна полімеризація	Повна полімеризація, day	Об'ємна усадка, %
		min			
1	На полідіендіолі	50	150	1,5	1,6
2	На простому поліефірі	5	30	4	2,3
3	На поліізоціанаті	80	170	3	1,8

Загалом двокомпонентним поліуретановим композиціям властиві достатні життєздатність (тривалість “желатинізації” або “ниткоутворення”) після змішування основи зі затверджувачем та час до стадії початкового тверднення. Ці технологічні показники можна регулювати, змінюючи природу та співвідношення вмісту вихідної сировини – поліолійних та ізоціанатних складників поліуретанів [8]. У табл. 1 подано параметри поліуретанових композицій, за якими характеризують їх технологічність як ін'єкційних матеріалів. Встановлено, що композиції

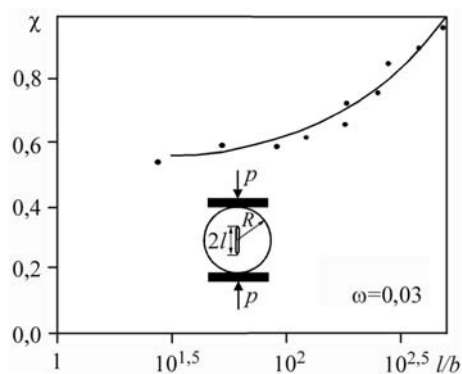


Рис. 1. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів оцінювання граничного навантаження бетонних зразків: суцільна лінія – розрахунок за формулою (3); точки – експериментальні дані ($R = 50 \text{ mm}$, $l = 0,25 R$, $\chi = p_c / \sigma_B^*$).

Fig. 1. Comparison of the theoretical and experimental results of limit loading assessment for concrete specimens: solid line – calculation by formula (3); dots – experimental data ($R = 50 \text{ mm}$, $l = 0.25 R$, $\chi = p_c / \sigma_B^*$).

на поліолільному зшивному компоненті Лапрол-1002 рецептур № 1 і 3 мали високі показники життєздатності (50...80 min) і відповідали нормативним вимогам. Поліуретанова композиція № 2 на основі синтезованого нами преполімера простого полієфіру виявилася непридатною через недостатній час збереження плинності (5 min) [7].

Порівнянням ін'єкційних матеріалів на основі компонента Лапрол-1002 та більш високомолекулярного простого полієфіру Лапрол-5003-2Б-10 встановили, що за часом збереження плинності та первинної полімеризації перевагу мали останні без ароматичного діаміну МВОСА. Час "утворення нитки" 90; 80 і 90 min, а "схоплення" 180; 185 і 187 min, що повністю відповідало вимогам до ін'єкційних матеріалів. Тривалість повної полімеризації для них і поліуретанових композицій із МВОСА півтора–дві доби, а об'ємна усадка 2%.

Таблиця 2. Технологічні параметри модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921 (20 mass.%) поліуретанових ін'єкційних композицій на полієфірі Лапрол-5003-2Б-10 і преполімері полізоціанурату

№ композиції	Втрата плинності	Первинна полімеризація	Повна полімеризація, day	Об'ємна усадка, %
	min			
1 – з МВОСА	55	145	1	2,0
2 – без МВОСА	50	120	1	2,0
3 – з МВОСА	40	70	1	1,4
4 – без МВОСА	90	180	2	1,9

Для поліпшення водотривкості та технологічних властивостей поліоліо-амінні зшивні системи (компоненти Б) модифікували кремнійорганічним лаком КО-921 (табл. 2) [7], який дещо змінював час втрати плинності, проте тривалість повної полімеризації та рівень усадки після тверднення залишилися такими самими. Зокрема, після додавання до композиції № 1 20% лаку час втрати плинності дещо збільшувався, тоді як для композиції № 2 скорочувався, відповідаючи проте технічним вимогам. За сукупністю технологічних параметрів оптимальною виявилася композиція № 4, яка, забезпечуючи підвищену водотривкість матеріалу, не погіршила його властивості за тривалістю повної полімеризації та усадкою внаслідок тверднення.

Таблиця 3. Вплив олігомера ОНО-2 на технологічні параметри поліуретанових композицій та твердість поліуретанів

Тип композиції	Маса ОНО-2	Маса ПЩ	Вміст ОНО-2, mass.%	Втрата плинності	Первинна полімеризація	Повна полімеризація, day
	g			min		
1 – Лапрол-5003-2Б-10 на полізоціанураті	0,236	–	1,13	90	120	2
2 – Те саме	0,236	0,7*	1,13	60	90	2
3 – Те саме	2,360	6,5	10,0	90	120	2
4 – Лапрол-1002 на простому полієфірі	0,200	60,1	1,22	40	70	1
5 – Те саме	2,000	60,1	9,44	50	60	1,5

Технологічні параметри поліуретанових ін'єкційних композицій ефективно підвищили, додаючи органо-неорганічний наноструктурований олігомер ОНО-2

(табл. 3). Зокрема, композиція на основі полієфіру Лапрол-1002 без олігомера не-ефективна через короткий час втрати плинності (5 min, композиція № 2 в табл. 1), тоді як після його додавання в кількості 1,22 mass.% (склад № 4) він збільшився до 40 min, що вже відповідає нормативним вимогам. З подальшим зростанням концентрації олігомера до ~ 10% (режим № 5) час плинності зріс до 50%, а додавання до цього складу 6,5% полізоціанату (ППЦ, склад № 3) забезпечило тривалість плинності 90 min. Час повної полімеризації всіх досліджуваних складів матеріалів 1–2 доби, що вважають задовільним.

Запропонованим композиціям на поліуретановій основі притаманний достатній рівень структурування, на що вказала оцінка питомого об'ємного опору ρ . Зокрема, для немодифікованих поліуретанів його значення змінювалось у діапазоні $1,9 \cdot 10^9 \dots 1,2 \cdot 10^{11}$ $\Omega \cdot \text{cm}$. З додаванням фрагментів поліметилфенілсилоксану з лаку КО-921 та олігомера ОНО-2 зростає до $2,8 \cdot 10^{10} \dots 6,7 \cdot 10^{11}$ $\Omega \cdot \text{cm}$. Максимальний рівень $1,2 \cdot 10^{12}$ $\Omega \cdot \text{cm}$ досягнули для поліуретану на преполімері полідієндіолу, зшитому ароматичним діаміном МВОСА [7].

Розглянуті композиції мали також високу адгезію до бетонної матриці. Встановлено, що у всіх випадках нормальний відрив сталевих грибків відбувався по матеріалу бетону на відстані 20...100 μm від сталеві поверхні, а когезійна міцність змінювалась у діапазоні 2,0...3,0 МПа [9].

Важливим аспектом у використанні таких композицій є ефективний вибір природи та вмісту мінерального наповнювача (кварцовий пісок, воластоніт, глина), який є складником бетону. Враховуючи цю особливість, розробили ін'єкційні композиції з поліуретановою матрицею, що містили до 50% мінерального наповнювача, що суттєво зменшувало відмінність бетону та ін'єкційного матеріалу (після тверднення) за жорсткістю і міцністю та забезпечувало високу ефективність відновлення утримувальної здатності пошкодженого бетону [9]. Крім того, використовуючи дешеві мінеральні наповнювачі, знижували вартість ін'єкційного матеріалу, що особливо важливо для заповнювання великих об'ємів.

Досліджували механізм тверднення поліуретанових композицій у системі бетон–ін'єктована композиція–бетон, зокрема, хімічну взаємодію окремих складників поліуретану з наповнювачем і бетонною матрицею та, можливо, залишками води на межі поділу. Макромолекули цього матеріалу складаються з груп підвищеної полярності, які містять електровід'ємні атоми кисню та азоту і позитивно заряджені атоми водню та вуглецю. Це зумовлює міцний зв'язок макромолекул поліуретану з неорганічними сполуками бетону (хімічне зшивання та фізична взаємодія з ОН-групами цементного каменю і мінеральних наповнювачів бетону), а отже, забезпечує високу адгезійну міцність композиту [10].

Композиції на поліепоксидній основі. Недолік відомих двокомпонентних поліепоксидних композицій з амінними твердниками – швидке наростання в'язкості після їх введення, що знижує можливості ін'єктування. Тому досліджували вплив низки сполук, введених до таких систем, які потенційно здатні зменшити в'язкість композицій та знизити швидкість тверднення [11]. Зокрема, після додавання гліцидилового ефіру версатикової кислоти (продукту Кардура Е10) часові залежності в'язкості η композиції на основі епоксидної смоли ЕД-20 і триетилентетрааміну (ТЕТА) як твердника істотно зсунулися в бік нижчих значень (рис. 2а). Крім того, наведені для більш як тригодинного інтервалу залежності характеризують стадійність зміни в'язкості, оскільки їх можна зобразити двома прямими відрізками, розмежованими в часі 100...120 min. Спочатку переважають процеси лінійного приєднання моноепоксидного продукту Кардура Е10 до епоксидної смоли, а тільки пізніше – формування просторово зшитих структур мікротетра. Це важливо, оскільки низька швидкість гелеутворення на першій стадії слугує на користь застосування композиції як ін'єкційного матеріалу.

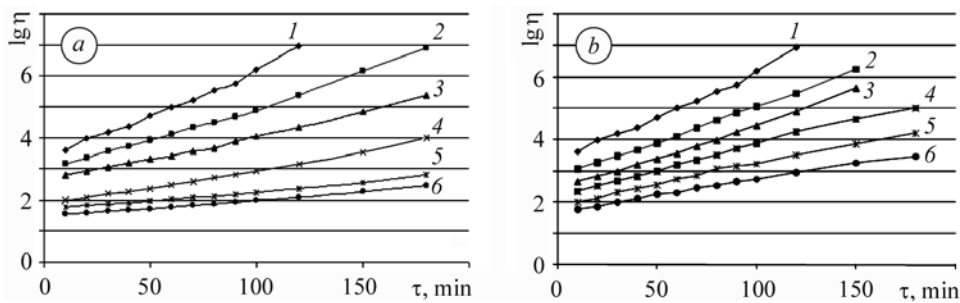


Рис. 2. Реокінетичні криві тверднення епоксидної смоли ЕД-20 з триетилтетрааміном за різного вмісту (mass.%) продуктів Кардура Е10 (а) та ГМА (b) (а: 1 – без продукту; 2 – 9,11; 3 – 17,90; 4 – 26,84; 5 – 36,86; 6 – 44,50; b: 1 – без ГМА; 2 – 9,50; 3 – 18,12; 4 – 26,53; 5 – 34,99; 6 – 43,85).

Fig. 2. Reokinetic curves of ED-20 epoxy resin hardening with thrieethylene tetramine with different content (mass.%) of E10 Kardura products (a) and glicidyl ether of methacrylic acid (GEMA) (b) (a: 1 – without product; 2 – 9.11; 3 – 17.90; 4 – 26.84; 5 – 36.86; 6 – 44.50; b: 1 – without GEMA; 2 – 9.50; 3 – 18.12; 4 – 26.53; 5 – 34.99; 6 – 43.85).

Використання гліцидилового ефіру метакрилової кислоти (ГМА) як складника для зниження в'язкості композиції зумовлене його біфункціональністю до структурування: не тільки за епоксидними групами, але і за ненасиченими зв'язками під дією гідроперекису трет-бутилового спирту. Отримано позитивні ефекти (рис. 2b), хоча подібної двостадійності, як для першого випадку, не спостерігали. Крім того, за приблизно однакоого зниження в'язкості на початку утворення композиції нахил часових залежностей крутіший, тобто процеси структурування протікали швидше, ніж за додавання продукту Кардура Е10.

Деяко гірша в'язкість матеріалу за використання ГМА компенсується більшою його міцністю після тверднення (рис. 3a), що вже позитивно для композиту бетон–поліепоксид–бетон. Зокрема, якщо мікротвердість H_{μ} вихідного матеріалу була на рівні 190...200 МПа, то після додавання ~45% ГМА знизилася лише до 145 МПа, тоді як олігомера Кардура Е10 – до 40 МПа. Такі відмінності зумовлені різним вмістом гель-фракцій у композитах (рис. 3b). Якщо зі збільшенням вмісту ГМА руйнівне зусилля F практично не змінювалося, то за додавання продукту Кардура Е10 вміст гель-фракцій монотонно знижувався з підвищенням концентрації C епоксидних розріджувачів, що зумовлене зростанням кількості лінійних макромолекул.

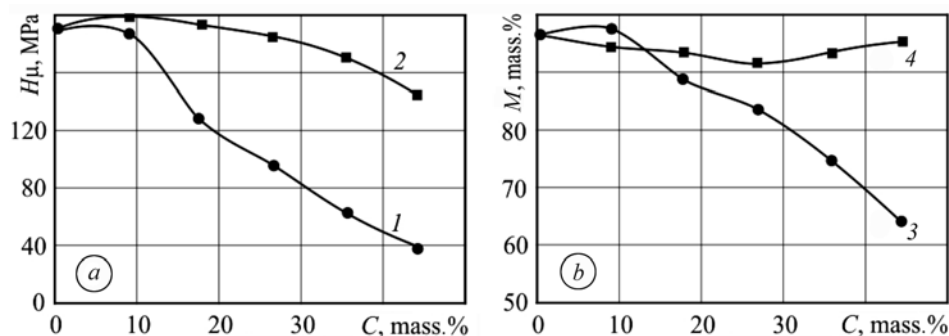


Рис. 3. Залежність мікротвердості H_{μ} (a) та вмісту гель-фракції M (b) від концентрації C епоксидних розріджувачів: 1, 3 – Кардура Е10; 2, 4 – ГМА.

Fig. 3. Dependence of microhardness H_{μ} (a) and gel-fraction content M (b) on epoxy diluters concentration C : 1, 3 – Kardura E10; 2, 4 – GEMA.

Таким чином, обираючи тип модифікатора та регулюючи його вміст, можна для конкретних ситуацій отримати оптимальні характеристики за часом желатинізації і твердості композиції після повного її тверднення. Наведені результати є науково-технічним підґрунтям для формування складу плинних поліепоксидно-амінних композицій як ін'єкційних матеріалів, зважаючи на їх технологічні параметри для реалізації ін'єктування і забезпечення експлуатаційних характеристик бетонних конструкцій після завершення ремонтних робіт.

Властивості відновлених систем бетон–ін'єкційний полімер–бетон. Ефективність запропонованих ін'єкційних матеріалів досліджували, випробовуючи лабораторні зразки із заповненими концентраторами напружень за навантаження, характерного для будівельних конструкцій. Зокрема, випроби стиском бетонних призматичних зразків розміром 100×200×300 mm з наскрізним отвором 20 mm (моделювання великих пор і нещільностей) по осі призми на середині її висоти виявили, що, підбираючи полімерну композицію з високою жорсткістю після тверднення, можна досягнути ситуації, коли зразки із заповненим отвором руйнуватимуться практично за зусиль, руйнівних для монолітних зразків [12]. Тут менш важлива висока плинність композицій, а більше – жорсткість твердого ін'єкційного матеріалу. З наближенням до жорсткості матриці та ідеального зчеплення з бетоном ін'єкційний композит повністю відновлює міцність дефектного елемента конструкції.

Тріщини у бетонних матрицях можна моделювати гострими концентраторами напружень. Оскільки бетону властиві тріщини нормального відриву, то концентратори формують у зразках у площині максимальних розтягувальних напружень. Виходячи з цього, вибрали два типи зразків: циліндричні суцільні (контрольні) і з центральними (по діаметру) щілинами-концентраторами напружень для випроб стиском по твірній циліндра; призматичні суцільні (контрольні) і з боковими концентраторами напружень для випроб зосередженим згином. Високих напружень у бетонних зразках досягали формуванням концентраторів металевими вставками, загостреними під кутом 30° та з радіусом закруглення не більше 0,1 mm.

Базовою для ін'єкційного матеріалу була двокомпонентна поліуретанова композиція з поліольного А та ізоціанатного Б компонентів за їх об'ємного співвідношення 1:1. Механічні властивості поліуретану такі: модуль Юнга 350...380 МПа, міцність за згину 10,0...10,5 МПа, міцність за розриву 25 МПа, твердість за Шором 80 градусів. На високу адгезію еластомера до бетону вказувало руйнування по тілу бетону за відриву сталевих грибків під час вимірювань адгезійної міцності з'єднання бетон–поліуретан–сталевий грибок [9].

Наповнювачем, який змінював плинність композицій та ефект зміцнення, слугував дрібнодисперсний порошок воластоніту. Оскільки він знижував плинність, до композиції додавали хімічно інертний органічний розчинник толуол. Загалом досліджено чотири варіанти композицій (табл. 4). Визначали (рис. 4) руйнівне зусилля F , а за ним за випроб циліндричних зразків стиском – питоме руйнівне зусилля F/h (h – висота зразків), а для призматичних – границю міцності σ_B . Ефективність композицій оцінювали за коефіцієнтом реновації K_R : відношення міцності композитного і суцільного зразків.

Таблиця 4. Співвідношення складників мінерально-наповнених поліуретанових композицій як ін'єкційних матеріалів

Складник	Суміші			
	I	II	III	IV
	Об'ємні частки			
А	1	1	1	1
Б	1	1	1	1
Толуол	–	–	0,2	0,2
Воластоніт	–	1	1	2

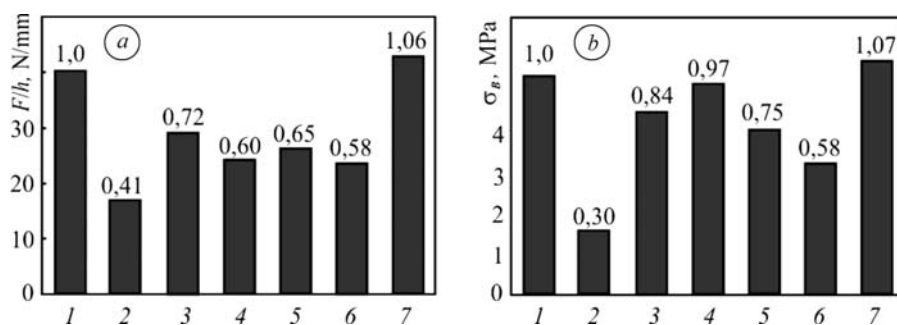


Рис. 4. Питоме руйнівне зусилля F/h (a) та границя міцності σ_B (b) циліндричних зразків з концентраторами напружень, заповненими поліуретановими композиціями: 1 – без концентратора; 2 – незаповнений концентратор; 3 і 4 – композиції I та II; 5 і 6 – композиції ІА та ІІА; 7 – склеєний по зламу композицією I. Цифри над стовпчиками – коефіцієнт реновації K_R .

Fig. 4. Specific fracture force F/h (a) and ultimate strength σ_B (b) for the cylindrical specimens with stress concentrators, filled with polyurethane compositions: 1 – without concentrator; 2 – non-filled concentrator; 3 and 4 – compositions I and II; 5 and 6 – compositions ІА and ІІА; 7 – glued at the fracture surface with composition I. Numbers above columns are renovation factor K_R .

Встановлено, що концентратори суттєво знижують міцність зразків: коефіцієнт K_R становить 0,41 і 0,30 для стиску і згину зразків відповідно. Високу міцність мають зразки з концентратором, заповненим чистим поліуретаном (відповідно $K_R = 0,72$ і $0,84$). З додаванням воластоніту у масовій пропорції 1:1 (композиція II) міцність зразка на згин практично відновила ($K_R = 0,97$), проте це виявилось менш ефективним за випроб на стиск ($K_R = 0,60$). Толуол (суміш ІА) дещо поліпшив міцність зразків на стиск та погіршив характеристики руйнування зразків на згин (відповідно $K_R = 0,65$ і $0,75$). Отже, вводячи мінеральний наповнювач, можна, з одного боку, здешевлювати ін'єкційний матеріал, а з іншого – неістотно втратити міцність.

Після склеювання плинним ненаповненим поліуретаном міцність заздалегідь зруйнованих суцільних зразків навіть дещо перевищувала вихідні значення. Зауважимо, що за випроб і стиском, і згином коефіцієнт $K_R > 1$, тобто зразки руйнувались поза поверхнею склеювання по прилеглому суцільному матеріалу бетону.

Наведені результати підтверджують високу ефективність відновлення дефектів типу тріщин і пор розробленими поліуретановими ін'єкційними матеріалами. У деяких випадках конструктивна міцність відновлюється повністю.

Інгібіторний захист від корозії сталеві арматури за ін'єкційного зміцнення залізобетонних конструкцій. Вищеописані підходи відновлення міцності бетонних конструкцій можна перенести і на залізобетонні об'єкти, де відкриваються додаткові можливості протикорозійного захисту сталеві арматури введенням до ін'єкційних композицій інгібіторів корозії. Вони повинні бути, з одного боку, високоефективними для підвищення корозійної тривкості у водних середовищах, а з іншого – не погіршувати техніко-експлуатаційні властивості ін'єкційних матеріалів.

Дослідження ефективності інгібіторного захисту арматури в ін'єкційно відновленому залізобетоні мають певні методичні особливості [13, 14]. Зокрема, розроблено оригінальну конструкцію бетонних зразків-циліндрів з низкою ненаскрізних отворів зі вкладеними у них арматурними стрижнями, залитими ін'єкційним матеріалом, а також з одним наскрізним отвором для допоміжного електроду. Така конструкція давала можливість вивчати методом імпедансу захисні властивості інгібованих ін'єкційних композицій.

Потенційно придатні інгібітори корозії сталеві арматури – молібдат натрію

і нітрат кальцію та їхні суміші у різних пропорціях – досліджували у модельному середовищі слабокислого дощу. Електрохімічними випробами виявили, що най-позитивіший ефект за їх масової пропорції 1:1. Тут максимально ушляхетнюється електродний потенціал, а на поляризаційних кривих виникає видовжена ділянка пасивності та на два порядки знижується струм корозії. Імпедансні дослідження модельних систем бетонний зразок–інгібована ін'єкційна композиція–сталева арматура підтвердили високий протикорозійний ефект за використання суміші молібдату натрію і нітрату кальцію. Крім того, такий склад інгібітора забезпечував найвищі значення питомого омичного опору і найнижчі – ємності модельної ін'єкційної системи.

Вивчали також вплив інгібіторного захисту сталевій арматурі у бетонних зразках на їх тривкість до механічних навантажень. Арматурний стрижень розміщували уперек великої осі призматичного бетонного зразка розміром $100 \times 100 \times 300$ mm безпосередньо у верхині вузького концентратора – імітатора тріщини. Зразки навантажували триточковим згином, реєструючи зміни на діаграмі зусилля F –прогину зразка L у точці прикладання зусилля. Використовували три серії зразків: контрольну, після 48 h витримання у модельному середовищі за анодної поляризації при -300 mV (арматуру піддавали пришвидшеній корозії) та інгібованому сумішшю молібдату натрію та нітрату кальцію за співвідношення 1:1 (рис. 5).

Виявили, що анодна поляризація сталевій арматурі істотно змінює механічні властивості бетонної матриці (криві 1 і 2), причому параметр F знижується від 4,5 до 3,2 kN, найімовірніше, через зменшення адгезійної міцності в системі бетон–арматура та розклинювальної дії продуктів корозії. Водночас змінюється характер діаграми F – L : на першій стадії навантаження деформація зразка полегшується (формально зменшується жорсткість), що можна пояснити релаксацією напружень стиску на межі бетону й арматури та певною пластифікацією матеріалу через його насичення водним середовищем. За досягнення прогину $\sim 0,1$ mm цей ефект зникає і нахил діаграми стає таким самим, як для контрольних зразків. Молібдатно-нітратний інгібітор якісно не міняє характер діаграми, проте істотно послаблює негативний вплив корозивного середовища, при цьому втрата міцності на рівні $\sim 10\%$.

Таким чином, запропоновано високоефективну для ін'єкційного відновлення залізобетону інгібіторну композицію зі синергетичним ефектом, яка суттєво гальмує корозійні процеси на сталевій арматурі в залізобетоні та підвищує адгезійну міцність зчеплення на межі бетон–арматура.

Особливості ін'єктування. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України разом з ДП Інженерний центр “Техноресурс” НАН України виконують дослідження з підвищення роботоздатності пошкоджених бетонних і залізобетонних конструкцій ущільнювальними ін'єкціями, які пройшли дослідно-промислову перевірку і не поступаються своїм зарубіжним аналогам [15–18]. Одержані результати переконливо підтверджують суттєві переваги ін'єкційних поліуретанових композицій, тому важливо розробити та освоїти технологію та

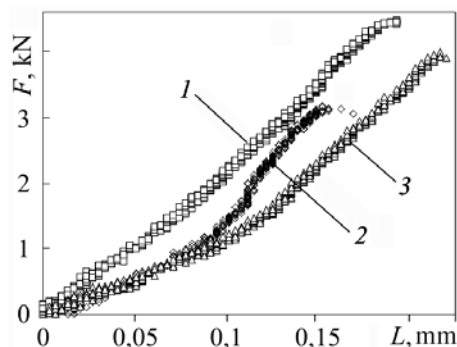


Рис. 5. Діаграми навантаження F – L призматичних бетонних зразків: 1 – з контрольної серії; 2, 3 – після витримки у неінгібованому та інгібованому середовищах.

Fig. 5. Load diagrams F – L for prismatic concrete specimens: 1 – control series; 2, 3 – after holding in uninhibited and inhibited solutions.

устаткування для випуску поліолієвих складників для них [18]. Опрацьовано нормативно-технічну документацію на виробництво таких складників.

Застосовуючи ін'єкційні технології, слід проаналізувати дефектність будівельних об'єктів, зокрема виявити, чи заповнені тріщини водою. Для заповнення сухих тріщин, розшарувань та інших пошкод переважно використовують не здатні до спінення плинні композиції на основі компактних поліуретанів. Вони утворюють міцно зв'язаний композит типу бетон–поліуретан–бетон, що практично відновлює тримкі та функціональні параметри конструкцій і споруд.

За наявності води необхідно використовувати поліуретанові композиції іншого типу. Це плинні матеріали, здатні швидко реагувати з водою зі значним спіненням. Кратність збільшення об'єму пінополіуретанових композицій 15–30 разів. На практиці такі властивості досягають, використовуючи преполімери з кінцевими ізоціанатними групами. Утворені в товщі конструкційного матеріалу пінополіуретанові полімери після короткого терміну структурування і тверднення, що не перевищує 5...10 min, блокують шляхи проникнення води крізь тріщини та пошкоди в бетоні. Крім того, пінополіуретани, подібно до компактних неспінених аналогів, формують адгезійні зв'язки з поверхнями дефектів бетонних матриць, зміцнюючи пошкоджену конструкцію. Проте через 15–30-кратне збільшення об'єму пінополіуретанових композицій сформовані ними адгезійні зв'язки з бетоном значно слабші, а отже, нижча адгезійна міцність. Крім того, незважаючи на закриті коміркову структуру ін'єкційного пінополіуретану, через окремі пори і нещільності в ньому під час експлуатації можуть проникати небезпечні для бетону корозійно-активні водні середовища.

Щоб усунути ці явища, через деякий час (10...30 min) після затримання першою порцією ін'єктованого пінополіуретанового полімера витікання чи просочування води крізь пошкодження в бетоні додатково подають під тиском спрямовувальними пакерами, вставленими у пробурених каналах, не здатну до спінення поліуретанову композицію. Утворений всередині композиційної системи бетон–пінополіуретан–бетон компактний поліуретановий еластомер підвищує адгезію, міцність та ізоляційні параметри не тільки пінополіуретаново-поліуретанового ремонтного матеріалу, але й композиційної системи з бетоном загалом.

Таким чином, розв'язано комплекс науково-технічних задач вибору матеріалів та розрахунку силових режимів ін'єктування пошкоджених бетонних (залізобетонних) конструкцій з можливістю суміщення з інгібіторним захистом оголеної арматури. Ці розробки доведені до інженерних технологій і широко використовуються на практиці.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены основные подходы к анализу технического состояния бетонных и железобетонных конструкций с эксплуатационными дефектами и проанализирована эффективность повышения их работоспособности инъекционными технологиями. Рассчитаны параметры этих технологий и предложен ряд инъекционных композиционных материалов на полиуретановой и полиэпоксидной основе, обладающих высокими технологическими характеристиками. Эффективность их применения подтверждена испытаниями лабораторных образцов из заполненными концентраторами напряжений. Выявлены дополнительные возможности противокоррозионной защиты оголенной стальной арматуры введением к инъекционным композициям ингибиторов коррозии, а также раскрыты технологические особенности упрочнения поврежденных конструкций заполнением выявленных дефектов.

SUMMARY. The main approaches to the analysis of the technical state of concrete and reinforced concrete constructions with in-service defects are considered and the effectiveness of the increase of their workability by the use of injection technologies is analysed. The injection technological parameters are calculated. A number of injection composite materials on the polyuretan and polyepoxy base which possess high technological properties, is proposed and the effectiveness of their use is confirmed by in-laboratory tests of the specimens with filled stress concentrators. The additional possibilities of corrosion protection of uncoated steel reinforce-

ment by adding corrosion inhibitors to the injection compositions are revealed and the technological peculiarities of repair works for strengthening the damaged structures by filling the revealed defects are found.

1. *Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 12: Ін'єкційні технології відновлення пошкоджених споруд тривалої експлуатації / В. І. Маруха, В. В. Панасюк, В. П. Силованюк. – Львів: СПОЛОМ, 2009. – 262 с.*
2. *Shamsad A. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review // Cement and Concrete Composites. – 2003. – 25, № 4–5. – P. 459–471.*
3. *Wieczorek G. Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonizację otuliny. – Wrocław: Dolnośląskie wydawnictwo, 2002. – 377 s.*
4. *Панасюк В. В., Силованюк В. П., Маруха В. І. Міцність пошкоджених тріщинами елементів конструкцій, залікованих ін'єкційними технологіями // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – 41, № 6. – С. 60–64.
(Panasyuk V. V., Sylovanyuk V. P., and Marukha V. I. Strength of cracked structural elements healed by injection methods // Materials Science. – 2005. – 41, № 6. – P. 777–783.)*
5. *Panasyuk V., Sylovanyuk V., and Marukha V. Static and cyclic strength of a cracked body which strengthened by injection technologies // Acta Mechanica et Automatica. – 2007. – 1, № 1. – P. 85–88.*
6. *Силованюк В. П., Маруха В. І., Онищак Н. В. Залишкова міцність циліндричних елементів з тріщинами, залікованими за ін'єкційними технологіями // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 1. – С. 99–103.
(Sylovanyuk V. P., Marukha V. I., and Onyshchak N. V. Residual strength of cylindrical elements with cracks healed by using the injection technology // Materials Science. – 2007. – 43, № 1. – P. 109–116.)*
7. *Середницький Я. А. Вплив структури поліефірного блока та ізоціанатних компонентів на властивості литевих поліуретанових еластомерів // Композиційні полімерні матеріали. – 2001. – № 2. – С. 45–50.*
8. *Просторово і наноструктуровані кремнійорганічними модифікаторами поліуретанові ін'єкційні матеріали для протикорозійного захисту залізобетонних споруд / В. Маруха, І. Галань, Н. Ласковенко та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Спецвип. № 9. – С. 550–555.*
9. *Деклараційний патент на корисну модель “Ін'єкційна композиція” / В. І. Похмурський, І. М. Зінь, В. І. Маруха та ін. // Реєстраційний номер заявки U 2008 12540 від 27.10.2008.*
10. *Маруха В. І., Середницький Я. А., Волошин М. П. Механізм хімічної та фізичної взаємодії ін'єкційно сформованих відновлювальних систем “бетон–поліуретан–бетон” // Міжвідомчий зб. – 2009. – Вип. 25, ч. 1. – С. 228–232.*
11. *Маруха В., Піддубний В., Середницький Я. Вплив низькомолекулярних епоксидних мономерів на життєздатність поліепоксидних ін'єкційних композицій // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2008. – № 3. – С. 51–56.*
12. *Зміцнення бетону в результаті заповнення пор та порожнин / В. П. Силованюк, В. І. Маруха, З. Я. Юхим, Н. В. Онищак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 1. – С. 62–66.
(Sylovanyuk V. P., Marukha V. I., Yukhym R. Ya., and Onyshchak N. V. Strengthening of concrete as a result of filling of the pores and cavities // Materials Science. – 2010. – 46, № 1. – P. 70–75.)*
13. *Вплив інгібіторів на корозію та міцність залізобетону / В. Похмурський, В. Маруха, І. Зінь та ін. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 805–810.*
14. *Інгібіторний захист сталеві арматури пошкодженого тріщинами залізобетону / В. І. Похмурський, В. І. Маруха, І. М. Зінь та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 5. – С. 5–14.
(Pokhmurs'kyi V. I., Marukha V. I., Zin' I. M., et al. Inhibitor protection of the steel reinforcement of armored concrete damaged by cracks // Materials Science. – 2010. – 46, № 5. – P. 573–582.)*
15. *Charniecki L., Emmons P. H. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. – Krakow: Polski Cement, 2002. – 434 s.*
16. *Podolski B., Suwalski J., Wydra W. Specyfika remontu starych konstrukcji budowlanych i zelbetonowych // Ochrona przed korozją. – 2000. – № 3. – S. 67–69.*
17. *Bauham T. I. Local repair of concrete canalization pipelines // J. Protective coatings & Linings. – 2000. – 17, № 3. – P. 49–65.*
18. *Розробка та виготовлення дослідно-промислового устаткування та створення діючого цеху для випуску поліольних компонентів поліуретанових ін'єкційних матеріалів / В. І. Маруха, Я. А. Середницький, А. Т. Пічугін та ін. // Наука та інновації. – 2009. – № 5. – С. 17–24.*

Одержано 07.06.2012