

ЕФЕКТИВНІ ІН'ЄКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ПОШКОДЖЕНИХ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В. В. ПАНАСЮК¹, В. І. МАРУХА², В. П. СИЛОВАНЮК¹

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

²Державне підприємство "Інженерний Центр "Техно-Ресурс" НАН України, Львів

Узагальнено результати досліджень, виконані науковцями Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України та Державного підприємства "Інженерний Центр "Техно-Ресурс" НАН України за останні 15 років з відновлення роботоздатності пошкоджених будівельних залізобетонних споруд тривалої експлуатації.

Ключові слова: міцність, бетон, ін'єкційні технології, руйнування.

Значна частина житлово-будівельного фонду та інших бетонних і залізобетонних споруд – це об'єкти, що вже тривалий час експлуатуються і потребують ремонту через виникнення в них різних пошкоджень. Багато унікальних об'єктів з історичною та архітектурною цінністю доведені до практично аварійного (за мірою пошкоженості) стану. Деградація службових характеристик матеріалів залізобетонних споруд, атомних електростанцій, шахтних стволів і колекторів комунальних комунікацій обумовлює необхідність їх відновлення для забезпечення роботоздатності цих відповідальних об'єктів. Тому розроблення інженерних методів діагностики технічного стану таких будівельних об'єктів, ефективних технологій відновлення їх роботоздатності та експлуатаційної надійності має велике економічне, наукове та технічне значення.

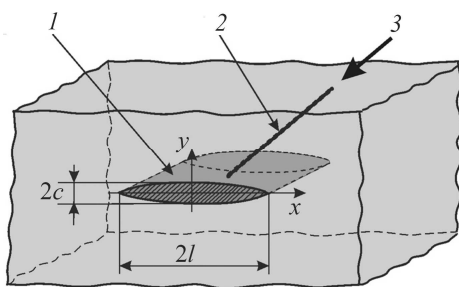


Рис. 1. Схема реалізації технології ін'єктування шляхом заповнення тріщини:
1 – тріщина; 2 – пробураний отвір;
3 – подача ін'єкційного матеріалу.

Fig. 1. Injecting technology realization by crack filling: 1 – crack; 2 – drilled hole; 3 – supply of injection material (schematically).

Одним із перспективних способів відновлення пошкоджених елементів конструкцій є технології ін'єктування дефектних зон, які передбачають заповнення пошкоджених місць бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд (у вигляді тріщин, порожнин, викришувань, відшарувань тощо) рідкими (найчастіше полімерними) матеріалами, здатними після кристалізації або полімеризації формувати з бетонною матрицею міцні адгезійні зв'язки (рис. 1).

У результаті таких технологій елемент конструкції зміцнюється і здатний витримувати робочі навантаження. Ступінь відновлення його роботоздатності та залишковий ресурс відновленого об'єкта залежать від багатьох чинників, зокрема, адгезії між поверхнею експлуатованого матеріалу та полімеризованих заповнювачів, співвідношення пружних характеристик цих матеріалів,

геометрії дефекту, міцності (короткочасної та тривалої) ін'єкційного матеріалу в твердому стані, зміни об'єму (збільшення або зменшення) заповнювача під час його тверднення тощо. В останні роки ці технології широко застосовують у вітчизняній та зарубіжній практиці для відновлення суцільності, міцності та робото-здатності багатьох об'єктів [1–4].

Ін'єкційні матеріали. Аналіз літературно-патентних джерел про використання ін'єкційних полімерних матеріалів і технологій для відновлення робото-здатності пошкоджених бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд, виявив основні техніко-експлуатаційні чинники стимулювання цих процесів [1].

Для відновлення міцності та робото-здатності пошкоджених тріщинами бетонних і залізобетонних конструкцій часто використовують ін'єкційні матеріали на цементній і цементно-полімерній основах. Головна їх перевага – близькість фізико-механічних характеристик у твердому стані до властивостей бетонних матриць. Водночас бетонні чи бетонно-полімерні розчини не здатні проникати у тріщини з невеликим розкриттям берегів, оскільки крупнозернисті частинки забивають прохід до вершини тріщини під час ін'єктування. Цих недоліків позбавлені плинні двокомпонентні поліуретанові та поліепоксидні композиції, які за тисків нагнітання 10...150 бар проникають у тріщини в бетонах і, структуру-ючись, тверднуть при $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ [5–9].

Як сировину для ін'єкцій композицій використали преполімери на поліефірній, поліізоціануратній та олігодієндіоловій основах із кінцевими реакційноздатними ізоціанатними групами (компоненти “А”) і розчини 4,4'-діаміно-3,3'-дихлордифенілметану марок “МВОСА” або “Діамет-Х” у ди- або трифункціональних простих поліефірах (компоненти “Б”). Як гідрофобні модифікатори застосували поліметилфенілсилоксановий кремнійорганічний лак КО-921 і синтезований в Інституті хімії високомолекулярних сполук НАН України наноструктурований органонеорганічний олігомер ОНО-2, а для спінених поліуретанів – 50%-й водний розчин кремнійорганічного продукту – силану “DOW Corning Z-6137” фірми “DOW” (США). На основі цих складників створили ефективні неспінені та спінені ін'єкційні композиції, щоб реалізувати технології відновлення робото-здатності пошкоджених конструкцій.

Зауважимо, що двокомпонентні поліуретанові композиції зберігають плинність до первинної поліконденсації або “ниткоутворення” після змішування полі-мерної основи з твердником і володіють задовільним часом повного тверднення. Ці технологічні показники регулювали, змінюючи природу та структуру вихідної сировини – полільних, аміних та ізоціанатних складників. У таблиці подано параметри композицій, за якими характеризують їх технологічність як ін'єкційних матеріалів. Встановили, що композиції на основі поліолу Лапрол-1002 за рецептурами № 1 і 3 тривалий час не втрачали плинності (50...80 min) і відповідали нормативним вимогам. Поліуретанова композиція № 2 на основі преполімеру простого поліефіру “Імутан” малоприсадає через недостатній час збереження плинності (5 min).

Важливо під час використання ін'єкційних поліуретанових композицій вдало вибрати природу та вміст мінерального наповнювача (кварцового піску, воластоніту, глини). У досліджуваних поліуретанових ін'єкційних композиціях його вміст становив до 50%. Це суттєво зменшувало різницю за жорсткістю та міцністю бетону та твердого ін'єкційного поліуретану, а також забезпечувало ефективне відновлення техніко-експлуатаційних параметрів пошкодженого бетону. Крім того, мінеральні наповнювачі знижували вартість ін'єкційних матеріалів, що особливо важливо для заповнення пошкоджень з великим об'ємом.

Технологічні параметри формування компактних поліуретанів з ін'єкційних композицій на полієфірі Лапрол-1002

№ композиції	Складники компонентів "А" і "Б" та їх концентрація в композиціях, mass%	Час			Об'ємне усаджування, %
		втрати плинності	первинно і полімери зації	повної полімери зації	
1	Лапромол-294/1,43; "Діамет-Х"/5,00; поліізоціанат/49,69; преполімер 10-000/12,40	50	150	1,5	1,6
2	Лапромол-294/1,80; 1,4-бутандіол/6,90; МВОСА/8,20; поліізоціанат/60,10; преполімер "Імутан" /15,0	5	30	4,1	2,3
3	1,4-бутандіол/1,30; МВОСА/4,00; поліізоціанат/113,50; преполімер "Сурізон АТГД"/28,40	80	170	3,0	1,8
4	Лапромол-294/0,50; 1,4-бутандіол/4,44; МВОСА/16,50; поліізоціанат/63,50; преполімер "Сурізон АТГД"/63,50	60	180	2,0	1,5

Особливості тривалої експлуатації бетонних конструкцій і споруд. Деструкційні процеси під впливом корозивних і мікробіологічно-активних середовищ та статичних чи циклічних навантажень призводять до утворення та росту великої кількості мікро- та макротріщин, розшарувань, викришувань, які на завершальних стадіях розвитку у багатьох випадках стають причиною корозійно-механічного руйнування таких об'єктів (рис. 2).

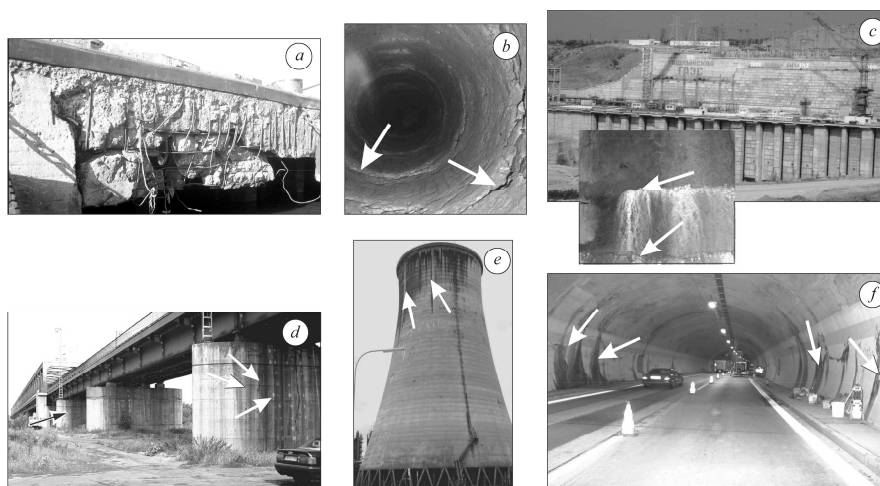


Рис. 2. Пошкодження об'єктів тривалої експлуатації (позначені стрілками): *a* – причал морського порту; *b* – підземний колектор; *c* – дамба гідроелектростанції; *d* – опори моста; *e* – градирня; *f* – тунель.

Fig. 2. Damages of the objects of long-term operation (indicated by arrows): *a* – seaport berth; *b* – underground collector; *c* – hydroelectric power station dam; *d* – bridge supports; *e* – cooling tower; *f* – road tunnel.

До переліку бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд, що експлуатуються за умов посиленних корозійно-механічних впливів комплексу техніко-експлуатаційних чинників, входять такі підземні споруди: міські та промислові каналізаційні колектори; тунелі метрополітену; фундаменти та опори широкого діапазону будівель, що контактують з корозивно і мікробіологічно-активними середовищами і ґрунтами тощо.

Для надійної експлуатації відновлених об'єктів з використанням ін'єкційних технологій група науковців та інженерів ФМІ і Державного Центру "Техно-Ресурс" розробила необхідні методи та технології оцінювання міцності та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій із заповненими пошкодами, а також методи оптимізації технологій відновлення робоздатності об'єктів за їх пошкодження під час тривалої експлуатації [1, 10–13]. В основу таких підходів покладені концепції механіки руйнування та міцності матеріалів і конструкцій з дефектами типу тріщин, зокрема, заповненими іншим матеріалом.

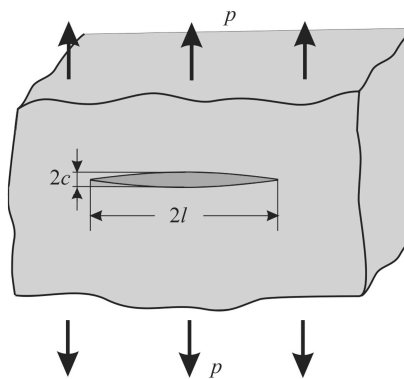


Рис. 3. Тіло з тріщиною за розтягу.

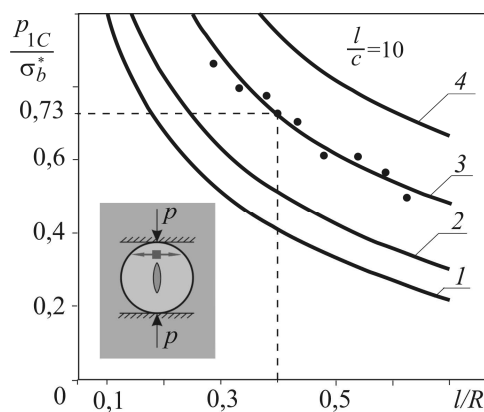
Fig. 3. A body with a crack in tension.

Оцінимо (рис. 3) міцність товстої пластини з тріщиною. Відомо [14], що міцність такої пластини з незаповненою тріщиною визначає формула $p = K_{IC} / \sqrt{\pi l}$, де K_{IC} – характеристика тріщиностійкості матеріалу; l – довжина тріщини; p – інтенсивність зусиль розтягу, а зі заповненою – формула [1, 2] $p_c^* = K_{IC} (1 + 2\beta\varepsilon) \times [\sqrt{\pi l} (1 - \varepsilon)]^{-1}$, де, окрім відомих характеристик матеріалу K_{IC} і l , введені вже нові параметри: $\varepsilon = E_1/E$ та $\beta = l/c$, E і E_1 – модулі Юнга матеріалів бетону і заповнювача відповідно; c – максимальне розкриття берегів тріщини.

Рис. 4. Міра відновлення робоздатності конструкційного елемента у вигляді диска з тріщиною залежно від її довжини: 1 – $\varepsilon = 0$; 2 – 0,01; 3 – 0,03; 4 – 0,05.

Fig. 4. The restoration degree of workability of the disk-like structural element with a crack versus its length: 1 – $\varepsilon = 0$; 2 – 0.01; 3 – 0.03; 4 – 0.05.

Побудували залежність ступеня відновлення міцності пошкодженого дискового елемента конструкції з бетону радіусом R від геометрії дефекту типу тріщини β та жорсткості полімеризованого ін'єкційного матеріалу ε (рис. 4). Очевидно, що необхідного зміцнення (навіть подвійного) можна досягти ін'єкуванням таких дефектів матеріалом, модуль Юнга якого суттєво менший, ніж основного. При цьому легше "заліковувати" тріщини малих розмірів і з малим розкриттям берегів. Точками на рис. 4 позначені експериментальні дані заліковування тріщини поліуретаном ($\varepsilon = 0,03$). Зауважимо, що тут важливо дослідити матеріали, які можуть перебувати у рідкому стані при низьких температурах, а



внаслідок тверднення набувають певної міцності та адгезійних властивостей з основним матеріалом пошкоджених бетонних і залізобетонних об'єктів. На сьогодні вже розроблено низку полімерних матеріалів, які широко використовують під час ремонтних робіт [6–9].

Але часто з тих чи інших причин важко повністю заповнити дефекти типу тріщин. Тому доцільно оцінити вплив їх часткового заповнення на ефективність відновлення роботоздатності елемента конструкції. Для цього розв'язали задачі, які ілюструє рис. 5.

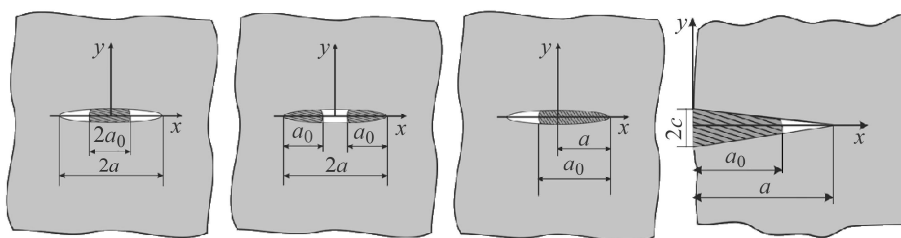


Рис. 5. Варіанти заповнення тріщин (заштрихована частина).

Fig. 5. Options of filling cracks (shaded part).

Виявили [10–13], що під час ін'єктування важливо повністю заповнити дефекти ін'єкційним матеріалом. Якщо це неможливо, то і за часткового їх заповнення можна суттєво відновити роботоздатність пошкодженого елемента конструкції, особливо, коли заповнити вершини тріщини. Ін'єктуванням вершин тріщини всього на 10% від загальної довжини можна відновити роботоздатність елемента конструкції до 80% від максимально можливої (для повністю заповненої тріщини).

На рис. 6 схематично проілюстровані інші задачі, які розв'язали, щоб оцінити ступінь відновлення роботоздатності елементів конструкцій зі системою дефектів типу тріщин. Якщо тіло пошкоджене не однією, а системою тріщин, важливо не допустити їх злиття у магістральну тріщину. Для цього необхідно заповнювати в першу чергу найближчі вершини між сусідніми тріщинами.

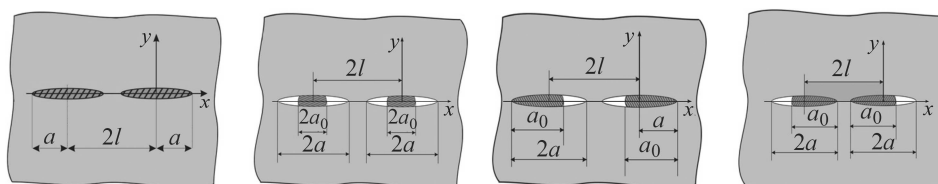


Рис. 6. Варіанти заліковування дефектів у вигляді системи тріщин у матеріалі.

Fig. 6. Possible types of the filled defects as a system of cracks in material.

Для міцності пошкодженої конструкції небажаним може стати ефект розклинювання тріщини ін'єкційною сумішшю, що надходить у тріщину під тиском та, тверднучи, тисне на її поверхні [1, 2]. За результатами розв'язку низки сформульованих задач обґрунтували оптимальні тиски подавання ін'єкційного матеріалу з урахуванням жорсткості наповнювача.

Вплив циклічного навантаження. Окрім статичних навантажень, для практики експлуатації конструкцій актуально також встановити вплив ін'єктування на ріст утомних тріщин, коли елемент конструкцій підданий циклічному навантаженню. Виявили, що вдалим вибором ін'єкційного матеріалу та технології заповнення можна зупинити їх проростання або зменшити швидкість росту [11].

Дослідження міцності бетонних суцільних зразків і з концентраторами типу незаповнених і заповнених тріщин (рис. 7) засвідчили узгодженість експериментальних і розрахункових результатів [12, 13].

Запропоновані співробітниками ФМІ та ДПШЦ “Техно-Ресурс” теоретичні моделі та результати експериментальних випробувань [1, 2, 4, 10–13] засвідчили, що одним з найефективніших способів відновлення роботоздатності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд є заповнення під тиском тріщин та інших корозійно-механічних пошкоджень в’язкоплинними поліуретановими композиціями.

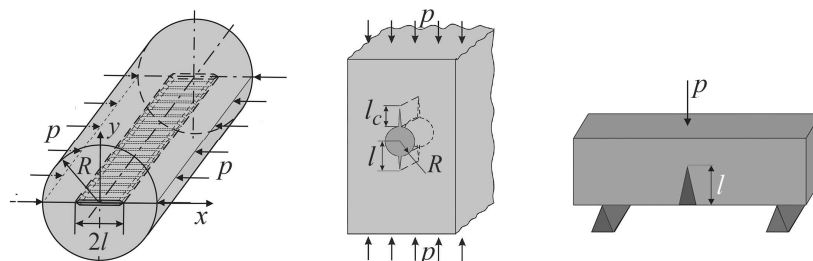


Рис. 7. Схеми навантаження бетонних зразків із залікованими дефектами.

Fig. 7. The loading modes of the concrete specimens with injected defects.

Практичне застосування. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень розробили необхідні ін’єкційні матеріали та технології, які впровадили на підприємствах НАЕК “Енергоатом України” та Держбуду України для зміцнення і відновлення роботоздатності важливих об’єктів (рис. 8).



Рис. 8. Тривалоексплуатовані масштабні будівельні (а) та культурно-історичні (b–d) об’єкти, відновлені ін’єктуванням.

Fig. 8. Large-scale constructions (a) and cultural-historical (b–d) objects after long-term operation restored by injection technology.

Це підтвердило перспективність ін’єкційного зміцнення та відновлення роботоздатності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд шляхом діагнос-

тики об'єктів, вибору ін'єкційних матеріалів, технологій та необхідного устаткування для їх реалізації. Такий алгоритм відновлення робоздатності об'єктів різного призначення відповідає досягненням передових зарубіжних фірм і будівельних підприємств [3, 5].

ВИСНОВКИ

Технологічний процес відновлення робоздатності пошкоджених бетонних конструкцій і споруд (у тому числі підземних каналізаційних колекторів) полягає у введенні під тиском (через пробуровані отвори) текучих поліуретанових композицій у місця пошкоджень (тріщини, розшарування) які, взаємодіючи з поверхнями бетону в дефектах, формують композиційні з'єднання типу “бетон–полімер–бетон”. Практичну ефективність поліуретанових ін'єкційних матеріалів підтвердили відновленням низки відповідальних об'єктів (рис. 8).

З урахуванням широкого діапазону рецептур вітчизняних і зарубіжних одно- і двокомпонентних поліуретанових композицій (компонентів “А” і “Б”) та специфіки їх використання для відновлення пошкоджених бетонних матриць, обґрунтували вибір ін'єкційних матеріалів з оптимальними властивостями для реалізації технології відновлення робоздатності пошкоджених бетонних і залізобетонних об'єктів [8, 9].



Рис. 9. Мобільний діагностично-відновлювальний комплекс з його інструментальним наповненням.

Fig. 9. A moving diagnostic and restoration complex with its instrumental filling.

В Інженерному центрі “Техно-Ресурс” спільно з ФМІ створили мобільний діагностично-відновлювальний комплекс (рис. 9а), який містить: прилади для діагностики пошкоджень (рис. 9b), комп'ютерну систему запису і обробки діагностичної інформації (рис. 9c); пристрої з дистанційним управлінням для діагностування стану підземних колекторів, трубопроводів, об'єктів житла тощо (рис. 9d), комплект ін'єкційного устаткування (рис. 9e); допоміжне обладнання (рис. 9h, g). Його можна використовувати для ремонтних робіт об'єктів комунального господарства.

За участі фахівців, акредитованих у системі Держспоживстандарту України, виконані атестаційні випробування і сертифіковані ін'єкційні поліуретанові матеріали та з'єднувальні системи на їх основі на відповідність чинним технічним умовам.

РЕЗЮМЕ. Обобщены результаты исследований, выполнены учеными Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины и Государственного предприятия “Инженерный Центр “Техно-Ресурс” НАН Украины за последние 15 лет, по восстановлению работоспособности поврежденных строительных железобетонных сооружений длительной эксплуатации.

SUMMARY. The results of investigation over of the past 15 years obtained by the scientists of the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine and the State Enterprise Engineering Center “Techno-Resource” of the NAS of Ukraine on the restoration of workability of damaged reinforced concrete structures after their long-term operation were summarized.

1. *Panasyuk V. V., Marukha V. I., and Sylovanyuk V. P.* Injection technologies for repair of damaged concrete structures // Springer. – 2014. – 230 p.
2. *Панасюк В. В., Силованюк В. П., Маруха В. І.* Міцність пошкоджених тріщинами елементів конструкцій, залікованих за ін’екційними 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.)
3. *Carnecki L. and Emmons P. H.* Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. – Krakow: Polski Cement, 2002. – 434 s.
4. *Механіка руйнування, як наукова основа технології ущільнювальних ін’екцій під час реконструкції об’єктів тривалої експлуатації / В. П. Силованюк, В. І. Маруха, Б. Я. Генегга, Н. А. Івантишин // Зб. наук. пр. “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій”. – Львів: Каменяр, 2002. – Вип. 5. – С. 373–382.*
5. *ACI-89 M12 503-5R* Guide for the selection of polymer adhesives with concrete // ACI Material J. – 1992. – № 1–2. – P. 90–105.
6. *Маруха В. І., Середницький Я. А.* Особливості ін’екційного зміцнення поліуретанами бетонних конструкцій і споруд з тріщинами // Фіз.-хім. механіка матеріалів – 2008. – **44**, № 6. – С. 99–103.
7. *Удосконалені поліуретанові та поліепоксидні ін’екційні матеріали для відновлення бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд / В. І. Маруха, Я. А. Середницький, В. К. Піддубний, М. П. Волошин // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 72. – С. 465–470.*
8. *Marukha W. Serrednicki J., Voloshyn M.* Injekcyjne compozycje plynne i wkładki polimerowe do wypełniania pęknięć i rys przy odnowieniu budowli żelbetonowych // Tworzywa sztuczne i chemia. – 2009. – № 6. – S. 20–22.
9. *Розробка двокомпонентних полімерних матеріалів “холодного” тверднення та впровадження їх у промислове виробництво / В. І. Маруха, В. М. Федірко, Я. А. Середницький, А. Т. Пічугін, О. Г. Лук’яненко, М. П. Волошин // Наука та інновації. – 2012. – **8**. – № 5. – С. 49–56.*
10. *Силованюк В. П., Маруха В. І., Онищак Н. В.* Залишкова міцність циліндричних елементів з тріщинами, залікованими за ін’екційною технологією // 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.)
11. *Panasyuk V., Sylovanyuk V., and Marukha V.* Static and cyclic strength of a cracked body which strengthened by injection technologies // Acta mechanica and automatica. – 2007. – **1**, № 1. – P. 85–88.
12. *Силованюк В. П., Маруха В. І., Онищак Н. В.* Міцність тіла з тріщиною, частково заповненою ін’екційним матеріалом // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 5. – С. 77–80.
(*Sylovanyuk V. P., Marukha V. I., and Onyshchak N. V.* Strength of a body containing crack partially filled with injection material // Materials Science. – 2009. – **45**, № 5. – P. 696–701.)
13. *Зміцнення бетону в результаті заповнення пор та порожнин / В. П. Силованюк, В. І. Маруха, Р. 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.)*
14. *Irwin G. R.* Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. – 1957. – **24**, № 3. – P. 361–364.

Одержано 16.03.2018