

УДК 624.01:691.322

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПОРИСТОСТІ НАПОВНЕНИХ ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНИХ ЗРАЗКІВ ЗА КІНЕТИКОЮ ЇХ ВОДОПОГЛИНАННЯ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, асп. О. С. Зінченко

STUDY OF CHANGES IN THE POROSITY OF FILLED CEMENT-SAND SAMPLES BY THE KINETICS OF THEIR WATER ABSORPTION

Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, postgrad. student O. Zinchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327345>



***Анотація.** У статті досліджено вплив наповнювачів на зміну пористості зразків цементно-піщаного розчину за кінетикою їх водопоглинання. Водопроникність таких матеріалів є функцією пористості й основним чинником, що забезпечує довговічність конструкцій і споруд із них. Як наповнювач використано дрібну фракцію подрібнення рециркульованого бетону. За кінетикою водопоглинання було оцінено такі параметри порової структури цементно-піщаного розчину: загальна пористість, відкрита і закрита пористість, показник середнього розміру відкритих капілярних пор. Експериментально встановлено, що заміна 40 % піску або 10 % цементу призводить до зміщення пористості зразків в область мікропор. Це підтверджено зменшенням показника середнього розміру пор удвічі, зменшенням загального об'єму пор і збільшенням кількості закритих пор, а також майже у три рази зменшенням відкритої пористості порівняно із закритою. На підставі отриманих даних зроблено висновок про ефективність застосування певної кількості наповнювача для зниження пористості і водопоглинання наповнених цементно-піщаних зразків.*

***Ключові слова:** цементно-піщаний розчин, пористість, водопоглинання, рециклінговий наповнювач.*

***Abstract.** The article deals the effect of fillers on the change in the porosity of cement-sand mortar samples based on the kinetics of their water absorption. Kinetics of water absorption of cement-sand samples is a research method that simulates the operation of concrete structures under real operating conditions. The water permeability of such materials is a function of porosity and the main factor that ensures the durability of structures and buildings. The following parameters of the pore structure of the cement-sand mortar were evaluated according to the kinetics of water absorption: total porosity, open and closed porosity, and the average size of open capillary pores. As a filler, a fine fraction of crushed recycled concrete sleepers was used. The results showed a change in the ratio of total, open and closed porosity, as well as the average size of open capillary pores. The ratio of open porosity to closed porosity is 2.95, i.e. open porosity is almost three times bigger than closed porosity for the unfilled sample. For filled samples, this ratio fluctuates within 2.1...0.98 and indicates that the number of closed pores increases due to the number of open ones. The biggest water absorption is demonstrated by samples with the biggest percentage of sand or cement replacement – 15.6 % and 11.4 %, respectively. This is because of both the overall loose structure due to the non-optimal arrangement of sand, cement and filler particles and the increased porosity of the filler itself. The smallest water absorption from 9.2 % to 8.4 % is found in filled samples. Consequently, the densest particle packing is achieved for these samples, which reduces water absorption even when using porous fillers. It was experimentally established that replacing 40 % of*

sand or 10 % of cement leads to a shift in the porosity of samples to the area of micropores. This has been confirmed by a twofold decrease in the average size, a decrease in the volume of total pores and an increase in the number of closed pores, as well as an almost threefold decrease in open porosity compared to closed porosity. Under these conditions, free movement of water from outside concrete structures into concrete is difficult. In turn, this rises the durability. Further studies will be aimed at determining the change in porosity of cement-sand samples over time to confirm the hypothesis of a self-compacting mechanism due to the slow release of water in the pores of secondary aggregates.

Keywords: *cement-sand mortar, porosity, water absorption, recycled filler.*

Вступ. Для промислового та цивільного будівництва характерне широкий спектр використовуваних конструкцій і споруд і різноманітність умов їх експлуатації, що визначено кліматом, особливостями технічних рішень, умовами навантаження та ін. Особливо складні умови для конструкцій, що зазнають безпосереднього атмосферного впливу. Контакт з агресивними середовищами призводить до руйнації конструкцій. Причому для таких конструкцій характерний комплексний вплив чинників, наприклад одночасно вологості та температури, ґрунтових вод, електричного струму. Отже, актуальним завданням є покращення непроникності матеріалу насамперед для води, оскільки саме вона визначає можливість розвитку корозійних процесів.

Властивості будівельних матеріалів визначені їхніми складом і будовою, а також величиною та характером пористості. Пористість є важливою характеристикою, оскільки з нею пов'язані такі технічні властивості матеріалу, як міцність, щільність, водопоглинання, морозостійкість, електропровідність, теплопровідність тощо. Пористому матеріалу, наприклад бетону, властиві загальна, відкрита і закрита пористість, розподіл пор за їхнім радіусом, показниками середнього розміру та однорідністю розмірів відкритих капілярних пор [1]. Загальну пористість P визначають як відношення об'єму пор до об'єму матеріалу. Під відкритою пористістю P_0 розуміють об'єм усіх пор матеріалу, сполучених між собою і з навколишнім середовищем. Відкриті пори заповнені водою у звичайних умовах

насичення, збільшують водопроникність і водопоглинання матеріалу, погіршують його морозостійкість. Решта об'єму пор характеризує закрити пористість (капілярну, гелеву). Збільшення закритої пористості за рахунок відкритої підвищує довговічність матеріалів і виробів. Вплинути на співвідношення закритої і відкритої пористості можна з ущільненням бетонної суміші та/або введенням різних наповнювачів. Такими наповнювачами можуть бути подрібнені залишки бетонних конструкцій, значна маса яких продовжує накопичуватися, створюючи великі звалища. У попередніх дослідженнях авторів [2, 3] показано, що зміна властивостей цементно-піщаних розчинів, насамперед середньої густини і міцності, з введенням таких наповнювачів відбувається циклічно зі збільшенням кількості заміщеного піску або цементу. Але залишилося нез'ясованим, як відсоток заміщення впливає на розподіл пористості в таких зразках, оскільки це напряму впливає на водопоглинання і довговічність вказаних матеріалів.

Аналіз попередніх досліджень. Розподіл пор за розмірами є важливим чинником, що впливає на дифузію вологи та проникність матеріалів на основі цементу. Раніше вважалося, що обсягом мезопор (діаметр 100 нм ÷ 0,01 мм) і макропор (діаметр 0,01 мм ÷ 1 см) можна знехтувати порівняно з об'ємом мікропор (діаметр < 100 нм). Розподіл за розмірами мікропор розглянуто в роботі [4] як пояснення адсорбції вологи. Використовуючи ізотерми адсорбції, оцінено розподіл розмірів мікропор. Також

мезопори та макропори враховані для моделювання проблем міцності, пов'язаних, наприклад, із замерзанням-відтаванням, водонепроникністю і усадкою з висиханням. У роботі [5] встановлено відмінність механічних властивостей залежно від обсягу гелевих пор. Так, гелева пористість від 12,4 до 27 % визначає пластичні властивості, а крихкі властивості визначає пористість нижче 12,4 % або вище 27 %. Зокрема, розрахунки в роботі [5] показують, що 20 % гелевої пористості дає кращу структурну стійкість і більш високу жорсткість. Значний інтерес становить дослідження змін відкритої пористості цементних паст залежно від водоцементного відношення (В/Ц). У роботі [6] досліджені мікропористість методом ртутної порометрії і макропористість за водопоглинанням. Встановлено, що збільшення В/Ц від 0,3 до 0,6 збільшує мікропористість з 10 до 30 %, а макропористість – з 30 до 45 %. Збільшення В/Ц від 0,3 до 0,6 збільшує обсяг пор розміром 100 нм і зменшує обсяг пор розмірами 50 нм. Збільшення пористості призвело до збільшення газопроникності вчетверо, що знижує довговічність конструкцій із такого матеріалу. Такі самі дані про вплив В/Ц на співвідношення мікро- і макропористості отримано в роботі [7].

В умовах агресивного навколишнього середовища довговічність бетону із вторинними заповнювачами є одним із найважливіших аспектів, які розглядають дослідники. Метою статті [8] було дослідження впливу різних співвідношень заповнювачів (переробленого крупного та дрібного) на механічні характеристики та довговічність бетону. Було вивчено п'ять серій бетонних сумішей, виготовлених із різними поєднаннями зерен (натуральні/перероблені). За отриманими результатами, капілярне водопоглинання бетонної суміші, виробленої з повною заміною природних заповнювачів на рециркульовані, показало значно вищі

результати, ніж інші бетони. Це пояснено тим, що вільна вода, використовувана не для гідратації цементу, а лише для виготовлення придатного для роботи бетону, сприяла створенню більшої системи капілярних пор. Крім того, результати показують, що відкрита пористість збільшилася для сумішей, що містять крупний рециклінговий заповнювач, і ще більше з використанням дрібного рециклінгового заповнювача. Для цих двох бетонних сумішей результати випробувань відкритої пористості були на 42 і 64 % вищими, ніж у стандартного бетону, відповідно. Отже, доступна для води пористість безпосередньо пов'язана з пористістю заповнювачів і використовуваним співвідношенням В/Ц, що призводить до більш пористої мікроструктури. У роботі [9] кількісно визначали основні елементи пористої структури бетонних розчинів як на природних, так і дрібних вторинних заповнювачах, а саме капілярну пористість, гелеву пористість і загальну пористість. Для цементно-піщаного розчину на натуральному піску гелева пористість дорівнює 27,96 %, капілярна – 13 %, загальна – 25,86 %, у той час як за використання рециркульованого піску ці значення становлять відповідно 29,51, 17, 38,84 %. На пористість гелю C–S–H припадає 56 % загальної пористості бетону з дрібного переробленого заповнювача, що свідчить про те, що методи покращення бетону з дрібного вторинного заповнювача мають бути спрямовані на зменшення пористості гелю C–S–H.

Безліч робіт зі збільшення міцності та довговічності матеріалів присвячено введенню дрібних наповнювачів, що знижують загальну пористість, наприклад, у дослідженні [10] порівнюють зміни пористості за рахунок введення як неорганічних наповнювачів, так і суперпластифікатора. Як наповнювачі використовували вапняний порошок, золу виносення та кремнезем. Виявилося, що пористість із часом зменшується на майже

однакову величину незалежно від виду добавки. Вимірюванням електричної провідності встановлено, що у випадку неорганічних заповнювачів має місце механічне заповнення дрібних пор. Застосування суперпластифікатора зменшує кількість вільної води в порах, що перешкоджає перенесенню електричного заряду. У деяких випадках модифікатор добавки більш впливає на пористість, ніж сама добавка, як було показано в роботі [11]. Мікроструктурні зміни, оцінювані азотною порометрією, показали, що розподіл пор за розмірами і особливо мікро- і мезопор гелевої структури, набагато більше залежить від типу модифікатора, ніж модифікованої добавки. Діаметр і кількість пор сумішей на основі рециркульованих заповнювачів досліджено в роботі [12]. Встановлено, що пористість і середній діаметр пор звичайної пасти становлять 26,7 % і 24,4 нм. З додаванням 30 % мелених відходів цементної пасти, 30 % мелених відходів цементно-піщаного розчину або 30 % мелених відходів бетону пористість становила 33,8, 35,1 і 36,2 %, а середній діаметр пор таких зразків дорівнював 28,4, 28,3 і 28,5 нм відповідно. Для зменшення пористості автори використовували такі мінеральні добавки, як подрібнена цегла, зола винесення, метакаолін і кремнезем. Найбільш значне зменшення пористості і діаметра пор продемонстрували зразки з кремнеземом, у яких пористість зменшилась до 27,3 %, а середній діаметр пор – до 16,5 нм. Автори пояснюють це пуцолановою активністю добавок, що призводить до зменшення діаметра пор всередині пасти. Схожі результати отримані в роботі [13], де встановлено, що 12 % нанокремнезему призводить до збільшення на 30,8 % щільності гідросилікатного гелю, зниження його пористості на 16,7 % і зниження загальної пористості на 24,4 %.

Вплив умов затвердіння на пористість досліджували в роботі [14]. Витримка зразків цементно-піщаного розчину у воді протягом семи днів або термічна обробка

зменшує пористість зразків на кілька відсотків, з витримкою протягом 28 діб досягнуте зменшення пористості становило 5 %. Ці результати свідчать про те, що пуцоланову активність мають залишки старого цементно-піщаного розчину, який потрапляє разом із рециклінговими дрібними заповнювачами. На відміну від цих даних, автори роботи [15] наводять результати дослідження пористості бетону на вторинних заповнювачах, яка збільшується зі збільшенням кількості заміни природних заповнювачів, але зменшується з часом твердіння. Автори також спостерігали неочікуваний ефект зменшення проникнення агресивних хлорид-іонів у бетон за достатньо великого значення пористості. Така поведінка може бути пов'язана з низкою ймовірних механізмів, що діють незалежно або в синергетичній манері, наприклад утворення первинної та вторинної контактної зони та/або швидке утворення оболонки під час цементування, гідратація завдяки високій дрібності цементу і внутрішній механізм затвердіння, активований у сумішах, що містять перероблені заповнювачі. Отже, можливий механізм підвищення міцності бетону на вторинних заповнювачах може бути таким: зайва сорбована волога в пористих повторно використаних заповнювачах із часом дифундує до негідратованих зерен як нового цементу, так і старого, спричиняючи їхні гідратацію, твердіння і ущільнення структури. Підтвердження цього механізму потребуватиме подальших досліджень. Ця робота сфокусована на вивченні пористості зразків цементно-піщаного розчину з різним відсотком використання дрібної фракції помелу залишків залізобетонних залізничних шпал.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вивчення пористості зразків цементно-піщаного розчину з різним відсотком використання дрібної фракції помелу залишків залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети поставлено

такі завдання: отримати дрібний заповнювач шляхом подрібнення і розсіву відходів шпал; виготовити зразки цементно-піщаного розчину з різним вмістом дрібної фракції; визначити водопоглинання зразків із часом; розрахувати показники пористості зразків.

Матеріали і методи дослідження.

Для дослідження змін пористості з введенням наповнювачів були виготовлені

зразки-балочки розміром 40×40×160 мм із суміші портландцементу, піску і води, у яких частину піску або цементу замінили пилюватою фракцією подрібнених шпальних відходів. Пісок заміщували наповнювачем, який пройшов крізь сито з розмірами чарунки 0,14 мм, цемент – із розмірами 0,09 мм. Співвідношення компонентів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Співвідношення компонентів у серіях зразків

Номер серії зразків	Витрати компонентів, кг/м ³					Вода/Цемент*
	Цемент	Пісок	Вода	Наповнювач (розмір зерен < 0,14 мм)	Наповнювач (розмір зерен < 0,09 мм)	
1	650	1950	260	-	-	0,5
2	650	1560	300	390	-	0,5
3	650	1170	340	780	-	0,5
4	650	975	360	975	-	0,5
5	650	780	380	1170	-	0,5
6	650	390	420	1560	-	0,5
7	650	-	460	1950	-	0,5
8	585	1950		-	65	0,5
9	520	1950		-	130	0,5
10	455	1950		-	195	0,5
11	390	1950		-	260	0,5
12	325	1950		-	325	0,5

Примітка. * Водо-цементне відношення вказано без урахування додаткової кількості води на змочування і поглинання пористими наповнювачами.

Після твердіння за нормальних умов протягом 28 діб зразки кожної серії висувували за температури 105±5 °С з періодичним зважуванням кожні 24 години до моменту, поки в разі двох послідовних зважувань маса зразка відрізнятиметься не більш ніж на 0,1 %. Потім зразки поміщали в ємність із водою так, щоб рівень води в ній був вище за верхній рівень зразків на 50 мм. Температура води в ємності була 20±2 °С. Водопоглинання кожного зразка за масою W_m , %, визначали з похибкою до 0,1 % за формулою [1]

$$W_m = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m_b – маса водонасиченого зразка, г;
 m_c – маса сухого зразка, г.

Водопоглинання кожного зразка за об'ємом W_o , %, визначали з похибкою до 0,1 % за формулою [1]

$$W_o = \frac{W_m \cdot \rho_0}{\rho_B}, \quad (2)$$

де W_m – водопоглинання окремого зразка за масою, %;

ρ_0 – середня густина сухого зразка, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_v – середня густина води, прийнято $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Вологість серії зразків визначали як середнє арифметичне значення результатів визначення вологості окремих зразків.

Для визначення параметрів порової структури цементно-піщаного розчину з наповнювачами використовували метод дослідження кінетики поглинання води, що дає змогу визначити показник середнього розміру та однорідності розмірів капілярних пор. Криві водопоглинання виражені рівнянням [1]

$$W_t = W_{\max} \left[1 - e^{-(\bar{\lambda}t)^\alpha} \right], \quad (3)$$

де W_t – водопоглинання зразка за час t за масою, %;

W_{\max} – повне водопоглинання зразка за масою, %;

e – основа натурального логарифма;

t – час водопоглинання, год;

$\bar{\lambda}$ – показник середнього розміру відкритих капілярних пор, який дорівнює границі відношення прискорення процесу водопоглинання до його швидкості і визначений за номограмами [1];

α – показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор, визначений за номограмами [1].

Для отримання кривих водопоглинання зважували зразки через 0,5 та 1 годину після занурення висушеного зразка у воду, а потім кожні 24 години до постійної маси. За результатами випробувань розраховують відносно водопоглинання масою в моменти часу $t_1 = 0,25$ і $t_2 = 1$ год. За цими величинами згідно з роботою [1]

визначають параметри $\bar{\lambda}$ та α .

Основна частина досліджень. На рис. 1 зображені криві водопоглинання серій зразків згідно з табл. 1. Криві мають плавний характер експоненційного типу, апроксимовані трипараметричною експоненційною функцією (3). Для більшої наочності криві для зразків із заміною піску і цементу наведені окремо (рис. 1, а і б).

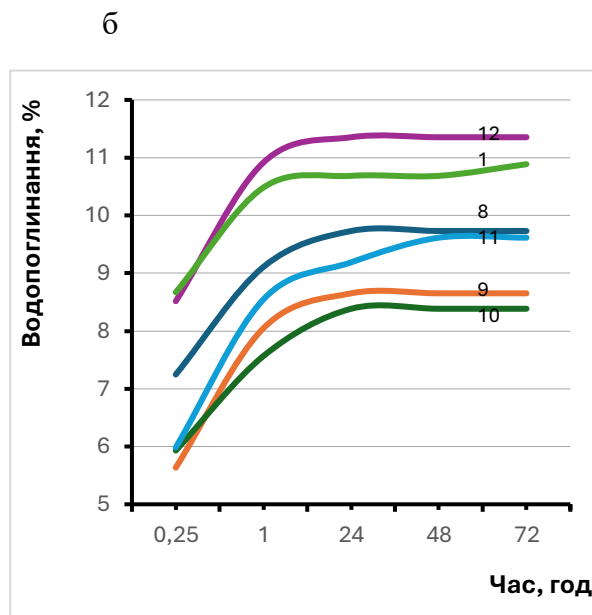
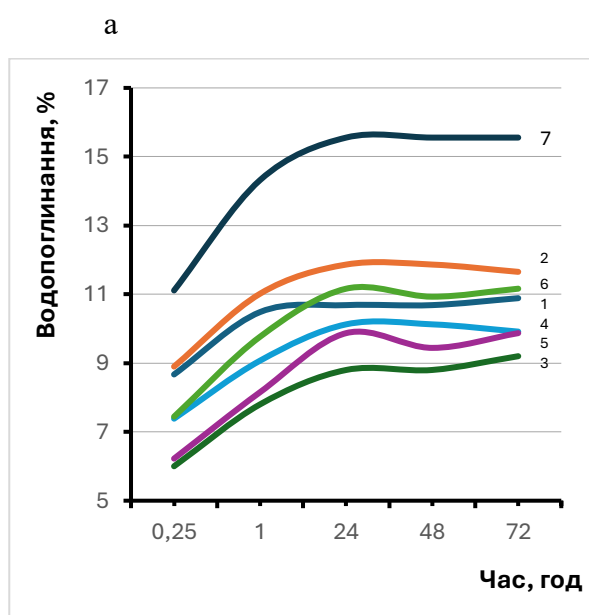


Рис. 1. Криві кінетики водопоглинання серій зразків із заміною піску (а) і заміною цементу (б). Номери поруч із кривими відповідають номерам серій у табл. 1

Як свідчать результати на рис. 1, найбільше водопоглинання мають зразки з найбільшим відсотком заміни піску або цементу – 15,6 і 11,4 % (відповідно серії 7 і 12). Це пов'язано як із загальною нещільною структурою за рахунок неоптимального розташування частинок піску, цементу і наповнювача, так і підвищеною пористістю самого наповнювача. Найменше водопоглинання мають зразки серій 3 і 10 (відповідно 9,2 і 8,4 %). Отже, для цих зразків досягнуто найбільш щільне пакування частинок, що зменшує водопоглинання навіть із використанням пористих наповнювачів.

Виконаємо розрахунок параметрів рівняння (3) згідно з роботою [1] і визначимо зміну закритої пористості зі збільшенням кількості наповнювача.

Загальну пористість матеріалу P визначали за значеннями істинної густини речовини ρ_0 та середньої густини матеріалу ρ , використовуючи співвідношення [1]

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100 \% \quad (4)$$

Відкриту пористість матеріалу визначали з міркувань, що об'єм відкритих капілярних пор P_0 у зразках дорівнює об'ємному водопоглинанню, що визначено формулою (2). Закриту пористість визначають як різницю цих величин:

$$P_z = P - P_0 \quad (5)$$

Результати розрахунків зведено в табл. 2 та 3, а також подано на рис. 2.

Таблиця 2

Розрахунок параметрів експоненційних кривих

Номер серії	$W_{\max}, \%$	$W_{t2}, \%$	W_{t2}/W_{\max}	$W_{t1}, \%$	W_{t1}/W_{\max}	$\bar{\lambda}_1$	α
1	10,89	10,48	0,96	8,67	0,80	3,15	0,50
2	11,65	11,02	0,95	8,90	0,76	3,00	0,55
3	9,20	7,80	0,85	6,00	0,65	1,90	0,42
4	9,92	9,07	0,91	7,38	0,74	2,35	0,40
5	9,87	8,15	0,83	6,22	0,63	1,75	0,40
6	11,16	9,77	0,88	7,44	0,67	2,10	0,48
7	15,56	14,32	0,92	11,11	0,71	2,50	0,50
8	9,73	9,11	0,94	9,73	0,74	2,51	0,45
9	8,65	8,05	0,93	8,65	0,65	2,60	0,65
10	8,38	7,57	0,90	8,38	0,71	2,25	0,42
11	9,62	8,55	0,89	9,62	0,62	2,20	0,60
12	11,35	10,92	0,96	11,35	0,75	3,00	0,53

Таблиця 3

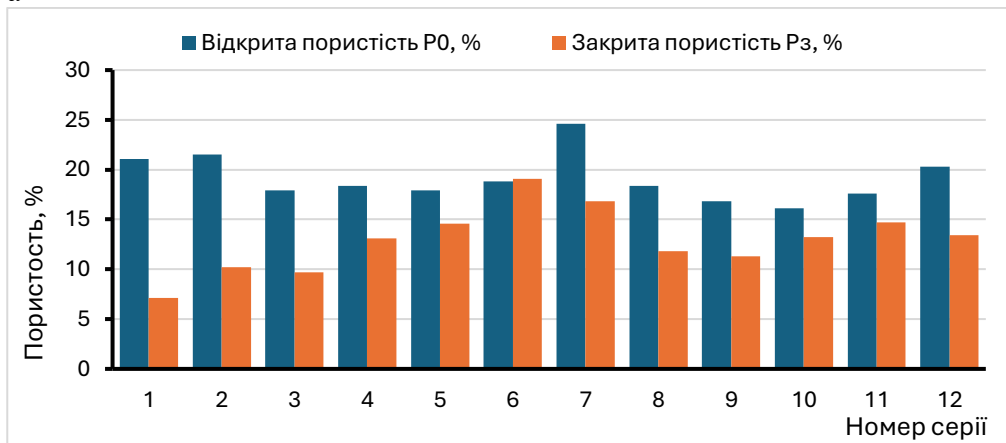
Розрахунок пористості серій зразків

Номер серії	Середня густина $\rho_0, \text{кг/м}^3$	Загальна пористість $P, \%$	Відкрита пористість $P_0, \%$	Закрита пористість $P_z, \%$	Показник середнього розміру відкритих капілярних пор $\bar{\lambda}$
1	2	3	4	5	6
1	1937,5	28,2	21,1	7,1	9,2
2	1843,8	31,7	21,5	10,2	7,2

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6
3	1953,1	27,7	17,9	9,7	4,5
4	1851,6	31,4	18,4	13,1	8,3
5	1820,3	32,6	17,9	14,6	4,0
6	1679,7	37,8	18,8	19,1	4,6
7	1582,1	41,4	24,6	16,8	6,3
8	1886,7	30,1	18,4	11,8	7,8
9	1941,4	28,1	16,8	11,3	4,8
10	1910,2	29,2	16,1	13,2	6,8
11	1828,1	32,3	17,6	14,7	4,2
12	1789,1	33,7	20,3	13,4	8,2

а



б

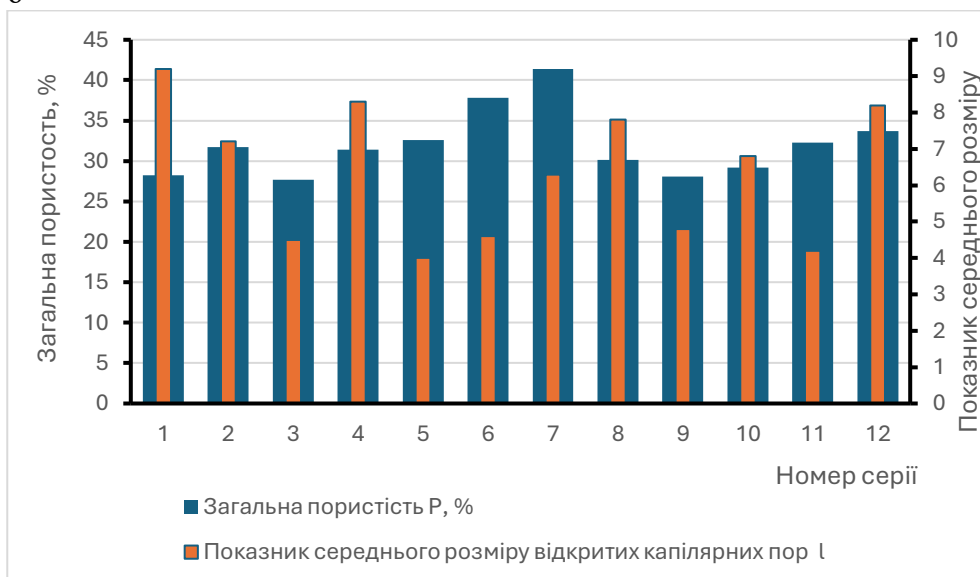


Рис. 2. Значення закритої, відкритої (а) і загальної пористості і показника середнього розміру відкритих капілярних пор \bar{l} (б) для серій зразків

Аналізуючи діаграми на рис. 2, а бачимо, що співвідношення відкритої та закритої пористості відрізняється для зразків із заміною цементу і заміною піску. Значення відкритої пористості найменше для серій 9 і 10. Закрита пористість спочатку зростає від серії 1 до серії 6, а потім знов зменшується для тих самих зразків серій 9 і 10. Співвідношення відкритої та закритої пористості для ненаповненого зразка (серія 1) становить 2,95, тобто відкрита пористість майже втричі більша за закриту. Для наповнених зразків це співвідношення коливається в межах 2,1...0,98 і свідчить про збільшення кількості закритих пор за рахунок кількості відкритих. З точки зору довговічності найкраще співвідношення загальної, відкритої та закритої пористості мають зразки серії 10 – цей склад має найменшу загальну і відкриту пористість, що запобігає проникненню води ззовні, і

майже таку саму величину закритої пористості, що збільшує морозостійкість і довговічність матеріалу такого складу. За рис. 2, б, добавка наповнювачів сильно впливає на показник середнього розміру відкритих капілярних пор, найменше значення якого демонструють зразки серій 5 і 11, що означає найменше адсорбційне поглинання вологи з повітря матеріалом такого складу. Найбільшу загальну пористість, як і відкриту, мають зразки серій 6 і 7. Фото зразків на рис. 3 також підтверджують цей висновок. Отже, додавання наповнювачів замість цементу або піску за певного співвідношення компонентів призводить до зниження капілярних пор у зразках з добавками, що позитивно вплине на такі характеристики, як водопроникність, морозостійкість, солестійкість.

а



б



Рис. 3. Фото перерізів зразків із заміною 40 % піску (а) і 10 % цементу (б)

Висновки. Кінетика водопоглинання цементно-піщаних зразків є методом дослідження, що моделює роботу бетонних споруд у реальних умовах експлуатації. Вологе середовище призводить до розвитку деструктивних процесів у бетоні. За рахунок використання наповнювачів, які є подрібненими відходами залізобетонних шпал, досягнуто регулювання структури цементно-піщаних зразків, що проявилось у

зміні співвідношення загальної, відкритої та закритої пористості, а також показника середнього розміру відкритих капілярних пор. Експериментально встановлено, що заміна 40 % піску або 10 % цементу призводить до зміщення пористості зразків в область мікропор, про що свідчить зменшення вдвічі показника середнього розміру, зменшення обсягу загальних пор і збільшення кількості закритих пор, а також

майже втричі зменшення відкритої пористості порівняно із закритою. У цих умовах вільне переміщення води зовні бетонних конструкцій усередину бетону ускладнено, що підвищує його довговічність. Наступні дослідження будуть

спрямовані на з'ясування зміни пористості цементно-піщаних зразків із часом для підтвердження гіпотези про механізм самоущільнення за рахунок повільного вивільнення води в порах вторинних заповнювачів.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 38 с.
2. Дослідження міцності і деформацій композиційних матеріалів на основі наповнених полімерів / Л. В. Трикоз, С. М. Камчатна, О. С. Зінченко та ін. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2024. № 8. С. 72-79. URL: <http://dx.doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-72-79> (in English).
3. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Науковий вісник будівництва*. 2024. Вип. 111. С. 135-141. URL: <http://dx.doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>.
4. Gong F., Zhang D., Sicut E., Ueda T. Empirical Estimation of Pore Size Distribution in Cement, Mortar, and Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol. 26. No. 7. P. 04014023. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000945](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000945).
5. Sekkal W., Zaoui A., Benzerzour M., Abriak N. Role of porosity on the stiffness and stability of surface of the nanogranular C-S-H gel. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 87. P. 45-52. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.014>.
6. Tracz T. Open porosity of cement pastes and their gas permeability. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2016. Vol. 64. No. 4. P. 775-783. URL: <http://dx.doi.org/10.1515/bpasts-2016-0086>.
7. Kurumisawa K., Nawa T. Electric conductivity and chloride ingress in hardened cement paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2016. Vol. 14. P. 87-94. URL: <http://dx.doi.org/10.315/jact.14.87>.
8. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. P. 118421. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
9. Akono A.-T., Zhan M., Chen J., Shah S. P. Nanostructure of calcium-silicate-hydrates in fine recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. P. 103827. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103827>.
10. Sanish K. B., Neithalath N., Santhanam M. Monitoring the evolution of material structure in cement pastes and concretes using electrical property measurements. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49. P. 288-297. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.038>.
11. Kalpokaitė-Dičkuvienė R., Lukošiuūtė I., Čėsniėnė J., Brinkienė K., Baltušnikas A. Cement substitution by organoclay – The role of organoclay type. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 62. P. 90-96. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.021>.
12. Ma Z., Zhang Z., Hu R., Liu X., Shen J., Wang C. Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>.

13. Buettner N., Iyacu G., Akono A.-T. Colloidal nanosilica promotes high-density calcium-silicate-hydrates in fine recycled concrete aggregate mortar. *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 180. P. 107498. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107498>.

14. Akgul Ü. M., Akgul M. Effect of curing conditions on cement based self-compacting mortar produced with mortar waste aggregate. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 16. P. e36423. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36423>.

15. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaides D., Petrou M. F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 2871. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15082871>.

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68.

E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Зінченко Олексій Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com.

ORCID 0009-0000-3858-8258.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Zinchenko Oleksii, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com.

ORCID 0009-0000-3858-8258.

Статтю прийнято 27.03.2025 р.