

РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ НА ОСНОВІ ЛУЖНО-АКТИВОВАНОГО ЦЕМЕНТУ

Ігор РУДЕНКО¹, Олександр ГЕЛЕВЕРА²,
Олександр КОНСТАНТИНОВСЬКИЙ³, Андрій РАЗСАМАКІН⁴,

^{1,2,3,4}Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітряних сил, 31, Київ, Україна, 03037

¹igor.i.rudenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5716-8259>

²a-gelevera@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-6285-9780>

³alexandrkp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7936-5699>

⁴razsamakin.a@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5130-6059>

Анотація. Розробка реакційно-порошкових бетонів на основі лужно-активованих цементів для будівництва та захисту об'єктів критичної інфраструктури є актуальною у світі з урахуванням підвищення безпеки їх функціонування.

У статті встановлено фактори впливу на кінетику набору міцності та власні деформації усадки реакційно-порошкових бетонів при використанні силікату натрію пентагідрату як лужного активатора. Показано, що підвищення співвідношення між цементом і піском від 1:3 до 1:1 та використання активатора у вигляді водного розчину забезпечує інтенсифікацію набору міцності бетону: міцність на стиск складала 52,3 МПа, 85,0 МПа, 100,6 МПа та 124,7 МПа у віці 1, 3, 28 та 90 діб твердіння відповідно. Співвідношення міцності на стиск до міцності на згин протягом досліджуваного терміну складало 5,3...5,9, що свідчить про високу тріщиностійкість та в'язкість руйнації отриманого матеріалу. Підвищення вмісту цементу, активованого лугом у складі бетону, визначає зменшення впливу гранулометрії піску на міцність бетону, що обумовлено "плаваючим" розміщенням його у цементній матриці. Введення добавки тонкодисперсного кальциту (8...10 мкм) забезпечило зменшити усадку бетону в 1,3...1,5 рази на момент стабілізації через 90 діб за рахунок ущільнення мікроструктури та інтенсифікації кристалізаційних процесів.

Підвищення дисперсності частинок кальциту до 1...5 мкм підсилило структуроутворюючий ефект і ще у більшій мірі зменшило усадкові деформації. Шляхом зазначених заходів отримано



Ігор РУДЕНКО,

головний наук. співробітник
НДІВМ,
д.т.н., професор



Олександр ГЕЛЕВЕРА,

доцент кафедри технології
будівельних конструкцій і
виробів (ТБКВ),
к.т.н., доцент



**Олександр
КОНСТАНТИНОВСЬКИЙ**

доцент кафедри технології
будівельних конструкцій і
виробів (ТБКВ),
к.т.н.



Андрій РАЗСАМАКІН

аспірант кафедри технології
будівельних конструкцій і
виробів (ТБКВ)

високоміцний лужно-активованим цементний реакційно-порошковий бетон класу міцності С80/95, з високою тріщиностійкістю та зниженою усадкою.

Ключові слова: реакційно-порошковий бетон; лужно-активованим цемент; міцність; усадка.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасні потреби в галузі безпеки та обороноздатності України актуалізують розробку надвисокоєфективних бетонів (далі УНРС) для впровадження в конструкціях, до яких висуваються високі вимоги щодо забезпечення захисту, непроникності та довговічності (фортифікаційні споруди, атомні електростанції, гідротехнічні споруди, мости тощо) [1, 2, 3].

УНРС забезпечують отримання високої міцності (45...55 МПа та 70...150 МПа на 1 та 28 добу) [4], тріщиностійкості [5], корозійної стійкості [6]. Однак, УНРС потребують використання дорогих добавок-модифікаторів, а також високої культури технології виготовлення та догляду до початку експлуатації [7].

Ефективними УНРС для згаданих конструкцій є реакційно-порошкові бетони (далі RPC), які характеризуються високою міцністю, тріщиностійкістю, енергією руйнування, граничною деформацією розтягування, вогнестійкістю тощо [1]. RPC отримують за допомогою підходу, який виключає використання крупного заповнювача, і ґрунтується на зниженні співвідношення води до цементу, зменшенні співвідношення CaO/SiO_2 за рахунок введення кремнеземного пилу, а також використання мікрволокна [8, 9, 10]. Високий вміст у RPC цементу (до 1000 кг/м^3) і кремнеземного пилу обумовлює зниження привабливості матеріалу через низьку екологічність і високу вартість, а також обумовлює високі деформації усадки [11]. Для вирішення зазначених недоліків рекомендується заміна частини цементу (до 50% за масою) або кремнеземного пилу (10...15% за масою) такими додатковими матеріалами як вапняк, різні шлаки, зола-виносу, скляний порошок тощо [12].

Як основа для RPC досить ефективними є цементы, отримані шляхом лужної активації цементів за ДСТУ Б EN 197-1:2015, в яких 95% клінкеру замінено доменним гранульованим тонкодисперсним шлаком. Такі лужно-активовані цементы (ДСТУ Б В.2.7-

181:2009) ефективні з урахуванням комплексного підходу до споживання природних ресурсів та енергії, а також відповідального ставлення до навколишнього середовища [13, 14]. Відомо, що найбільш ефективними активаторами є силікати натрію, аніони яких аналогічні гідратованим первинним продуктам деструкції алюмокремнекисневого каркасу, і служать їх додатковим резервом [15]. Використання силікатів натрію як водного розчину сприяє більшій інтенсифікації процесів структуроутворення цементів у порівнянні з використанням у вигляді сухих порошоків [16]. Використання лужно-активованих цементів на основі метасилікату натрію в RPC, окрім високої міцності, зумовлює високу жаростійкість [17], сульфатостійкість [18], морозостійкість [19, 20], стійкість в умовах впливу морської води [21] тощо. Суттєвою перевагою лужно-активованих цементів є також підвищена в'язкість руйнування матеріалів на їх основі [22].

Відомо, що лужно-активовані цементы порівняно з портландцементами характеризуються більш високими деформаціями усадки, що обумовлено підвищеним вмістом фаз гелеподібної та субмікрокристалічної структури у складі продуктів гідратації за відсутності кристалічних фаз портландиту Ca(OH)_2 та еtringіту $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [15]. Зазначена особливість загострює питання регулювання усадкових деформацій в RPC на основі лужно-активованих цементів. Відомим шляхом зменшення усадкових деформацій лужно-активованих цементів є використання мінеральних добавок (вапняк, летюча зола, мікрокремнезем), хімічних добавок (агентів, що зменшують усадку, розширювальних агентів, поверхнево-активних речовин, суперабсорбуючих полімерів і наночастинок), а також різних волокон (сталевих, вуглецевих, полімерних волокон, скловолна) [15, 23, 24].

Метою даної роботи є проектування складів високоміцного надшвидкотверднучого лужно-активованого цементного реакційно-порошкового бетону зі зниженими власними деформаціями усадки.

СИРОВИННІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як алюмосилікатні компоненти цементу були використані тонкодисперсний доменний гранульований шлак і портландцемент

Табл. 1. Характеристика шлаку
Table 1. Characteristics of slag

Вміст оксидів, % мас.							в.п.п., %	M _o
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	SO ₃	Na ₂ O		
32,13	11,48	50,27	1,14	0,4	1,8	0,77	1,30	1,18

Табл. 2. Хіміко-мінералогічний склад клінкерної складової СЕМ І
Table 2. Chemical and mineralogical composition of the clinker component of СЕМ І

Вміст оксидів, % мас.							в.п.п., %	Вміст мінералів, % мас.			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O		C ₃ S	β-C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
21,0	5,6	4,8	65,0	2,5	0,7	0,15	0,25	58,0	19,0	7,25	15,5

Як лужний активуючий компонент використовувався метасилікат натрію пентагідрат (Na₂O·SiO₂·5H₂O) за CAS 497-19-8 у вигляді негігроскопічного порошку та у вигляді водного розчину з ρ = 1,24 г/см³. Метасилікат натрію вводили до складу цементних систем в однаковій кількості у перерахунку на безводну суху речовину.

Як структуроутворююча добавка для регулювання усадки використовувався тонкодисперсний карбонат кальцію (CaCO₃) за CAS 471-34-1 у порошкоподібній формі.

Приготування цементно-піщаних розчинів здійснювали у стандартному змішувачі типу Hobart. Їхня консистенція визначалася за розпливом на струшуючому столику після 30 ударів.

Як дрібний заповнювач у цементно-піщаних розчинах використовували стандартний пісок (ДСТУ Б В.2.7-189:2009) та річковий кварцовий пісок з M_к = 1,16. Річковий пісок використовувався у двох видах: фракціонованому (оптимізованому) та не фракціонованому (не оптимізованому). Оптимізація

$$S = \frac{16,5 \cdot (0,5 \cdot a + b + 2 \cdot v + 4 \cdot z + 8 \cdot d + 16 \cdot e + 32 \cdot ж)}{1000} \cdot k \quad (2)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від виду піску та форми його частинок: 2,0 – для піску

СЕМ І з питомою поверхнею 4000...4100 см²/г (за Блейном). Характеристики шлаку та портландцементу представлені у таблиці 1 та 2.

фракційного складу річкового піску, з метою отримання безперервної гранулометрії, виконувалась за допомогою модифікованого рівняння Фуллера:

$$A = 100 - 100 \cdot \sqrt{\frac{d_1}{D}}, \% \quad (1)$$

де A – прохід через сито з отвором d, мм;
d_i – розмір отвору сита, мм;
D – найбільший розмір зерна у суміші заповнювачів, мм.

У результаті оптимізації отримано склад піску, що містить фр.1,25 мм – 45,17%, фр.0,63 – 32,36% та фр.0,315 – 22,47%. Пилувата фракція, що пройшла через сито 016, не використовувалася.

Стандартний пісок кремнеземистий монофракційний згідно ДСТУ Б В.2.7-189:2009. Залишок на ситі: 0,16 мм – 0,2%, 0,315 мм – 16,5%, 0,63 мм – 83,3%.

Для наближеного розрахункового визначення питомої поверхні дрібних заповнювачів була використана формула Ладинського А. С.:

з гірських порід; 1,65 – для річкових та морських пісків; 1,3 – для дрібних пісків.

a, б, в, г, д, е, ж – власні залишки на ситах з

розміром отворів відповідно 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,325; 0,14 та на дні.

Міцність цементно-піщаних розчинів визначали на зразках-балочках складу 1:1, 1:2 і 1:3 (в'язуча речовина : пісок) розміром 4×4×16 см.

Власні деформації усадки визначалися на зразках розміром 4×4×16 см. Після виготовлення та твердіння у формах із закритою поверхнею протягом 1 доби зразки виймалися з форм та зберігалися протягом 7 діб у нормальних умовах ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 95 \pm 5\%$). Потім зразки зберігалися над насиченим розчином аміачної селітри (NH_4NO_3) при $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ і $W = 65\%$ до контрольного віку. Довжина зразків через 1 добу приймалася за

вихідну.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

1. Вплив співвідношення "цемент: пісок" на міцність RPC

Досліджено вплив цементно-піщаного співвідношення на міцність з використанням кремнеземистого піску з не оптимізованою гранулометриєю, $M_k = 1,16$. Як лужний компонент використано метасилікат натрію пентагідрат у вигляді порошку. Склади замішувалися водою. Результати досліджень наведено у таблиці 3.

Табл. 3. Фізико-механічні характеристики дрібнозернистих лужно-активованих бетонів залежно від співвідношення "в'язуча речовина : пісок"

Table 3. Physical and mechanical characteristics of fine-grained alkali-activated concrete depending on the ratio "binder : sand"

№ з/п	Склад в'язучої речовини, мас. %			В : П	В/В	Роз-плив, мм	Міцність на стиск/згин, МПа, у віці, діб					
	шлак	портланд-цемент	метасилікат				1	2	3	7	28	90
1	85	5	10	1:1	0,218	200	<u>35,7</u> 5,9	<u>55,1</u> 6,7	<u>63,8</u> 7,4	<u>73,6</u> 10,5	<u>87,5</u> 14,8	<u>104,5</u> 17,9
2				1:2	0,227	165	<u>27,1</u> 6,0	<u>42,8</u> 7,1	<u>50,7</u> 8,8	<u>57,7</u> 9,2	<u>67,7</u> 11,0	<u>78,5</u> 13,0
3				1:3	0,200	145	<u>20,7</u> 5,6	<u>31,4</u> 5,8	<u>35,7</u> 6,1	<u>42,4</u> 8,3	<u>49,8</u> 10,5	<u>57,0</u> 12,5

Примітки:

1. В: П – в'язуче : пісок.
2. В/В – водо-в'язуче відношення.
3. Метасилікат натрію використовувався у вигляді порошку.

Як і слід було очікувати, і як видно з результатів наведених у таблиці 3, збільшення вмісту в'язучої речовини у композиції веде до зростання міцності. Міцність на стиск складу 1:1 у віці 28 діб становила 87,5 МПа, складу 1:2 – 67,7 МПа, складу 1:3 – 49,8 МПа. А у віці 90 діб – 104,5, 78,5 та 57,0 МПа відповідно.

Виходячи з класифікації [1], до швидко-тверднучих бетонів відносяться склади, які набирають через 3 доби $\geq 50\%$ від марочної міцності, а до особливо швидко-тверднучих – які набирають через 1 добу ≥ 30 МПа, а через 3 доби ≥ 45 МПа, склади зі співвідношенням 1:1 і 1:2 можна віднести до особливо швидко-тверднучих, а склад 1:3 – до

швидко-тверднучих.

Співвідношення міцності на стиск до міцності на вигин склало 4,7...5,9 у віці 28 діб і 4,6...5,8 через 90 діб, що вказує на достатньо високу тріщиностійкість матеріалу [25].

2. Вплив гранулометрії піску на міцність RPC

Як дрібний заповнювач були використані три види піску – річковий пісок оптимізований шляхом фракціонування з досягненням безперервної гранулометрії; річковий пісок не оптимізований без фракціонування; та стандартний пісок монофракційного складу. Контролювалася питома поверхня пісків.

В усіх випадках було використано співвідношення "в'язуча речовина: пісок" – 1:1.

Як лужний компонент використано метасилікат натрію пентагідрат у вигляді порошку. Склади замішувалися водою. Результати випробувань наведено у таблиці 4.

Табл. 4. Фізико-механічні характеристики дрібнозернистих лужно-активованих бетонів залежно від гранулометрії піску

Table 4. Physical and mechanical characteristics of fine-grained alkali-activated concrete depending on granulometry of sand

№ з/п	Склад суміші						Питома поверхня піску, $\text{см}^2/\text{г}$	В/В	Розплив, мм	Міцність на стиск/згин, МПа, у віці, діб					
	в'язуча речовина, мас. %			вид піску і співвідношення В:П						1	2	3	7	28	90
	шлак	портланд-цемент	метасилікат натрію	оптимізований	не оптимізований	стандартний									
4				1 : 1	–	–	111	0,218	200	40,0 7,5	61,1 7,9	68,8 9,6	77,8 14,3	91,8 17,3	109,4 19,7
5	85	5	10	–	1 : 1	–	345	0,227	180	35,7 6,3	55,1 6,8	63,8 7,5	73,6 10,8	87,5 14,8	104,5 17,9
6				–	–	1 : 1	85	0,200	160	38,0 7,2	58,0 7,8	65,8 8,1	76,3 13,2	90,0 15,8	106,3 17,1

Примітки:

1. В: П – в'язуча речовина : пісок.
2. В/В – водо-в'язуче відношення.
3. Метасилікат натрію використано у вигляді порошку.

Як видно з отриманих результатів (табл.4), усі склади продемонстрували особливо швидкий набір міцності на стиск – 35,7...40,0 МПа через 1 добу. Марочна міцність складала 87,5...91,8 МПа, через 90 діб – 104,5...109,4 МПа.

Співвідношення міцності на стиск до міцності на згин складало загалом 5,3...5,9 у віці 28 діб і 5,6...6,2 через 90 діб, що свідчить про підвищену тріщиностійкість матеріалу.

Оптимізація фракційного складу річкового піску дозволила поліпшити показники міцності у віці 28 діб на 5%, очевидно за рахунок більш щільної упаковки зерен заповнювача і зменшення водопотреби, пов'язаної зі зменшення питомої поверхні заповнювача (див.табл.4, поз.4 і 5).

При цьому склад з оптимізованою гранулометриєю піску, поряд із найвищою міцністю, демонстрував найбільший вплив на

консистенцію суміші – розплив 200 мм на складі №4 порівняно зі 160...180 мм на складах №5 та №6.

3. Вплив агрегатного стану лужного компоненту на міцність RPC

У цих дослідженнях метасилікат натрію використовувався не у вигляді порошку, а у вигляді водного розчину з $\rho = 1,24 \text{ г/см}^3$. Розчин використовувався замість води замішування. В обох випадках, як при використанні порошку, так і при використанні розчину, кількість безводної солі метасилікату натрію була приблизно однаковою.

Як і у попередньому випадку (табл.4), використовувалося три типу піску. Результати випробувань дрібнозернистого бетону складу 1:1 при використанні в якості замішувача розчину метасилікату натрію ($\rho = 1,24 \text{ г/см}^3$), наведено у таблиці 5.

Табл. 5. Фізико-механічні характеристики дрібнозернистих лужно-активованих бетонів, замішаних розчином лужного компонента**Table 5.** Physical and mechanical characteristics of fine-grained alkali-activated concrete mixed by water solution of alkaline component

№ з/п	Склад суміші					Питома поверхня піску, см ² /г	Р/В	Розплив, мм	Міцність на стиск/згин, МПа, у віці, діб					
	в'язуча речовина, мас. %		вид піску і співвідношення В:П						1	2	3	7	28	90
	шлак	портланд-цемент	оптимізований	не оптимізований	стандартний									
7			1 : 1	–	–	111	0,24	205	<u>52,3</u> 7,5	<u>76,3</u> 8,0	<u>85,0</u> 8,9	<u>94,3</u> 9,0	<u>100,6</u> 14,7	<u>124,7</u> 18,0
8	95	5	–	1 : 1	–	345	0,26	190	<u>49,1</u> 7,4	<u>73,8</u> 8,5	<u>81,1</u> 9,6	<u>87,8</u> 10,2	<u>96,3</u> 13,8	<u>120,6</u> 17,5
9			–	–	1 : 1	85	0,22	170	<u>51,0</u> 7,0	<u>74,4</u> 7,2	<u>83,0</u> 7,7	<u>91,3</u> 9,1	<u>98,8</u> 14,2	<u>118,6</u> 16,2

Примітки:

1. В: П – в'язуче : пісок.
2. Р/В – розчино-в'язуче відношення.
3. Метасилікат натрію використовувався у вигляді водного розчину ($\rho = 1,24 \text{ г/см}^3$).

Таким чином, якщо порівнювати результати випробувань, які представлені у табл.4 і табл.5, то можна сказати наступне:

- вплив характеристик піску залишився аналогічним – найвищі результати продемонстрував склад із оптимізованою гранулометриєю піску;
- усі склади продемонстрували супершвидкий набір міцності на стиск – 49,4...52,3 МПа через 1 добу та 81,1...85,0 МПа через 3 доби. Активність у віці 28 діб становила 96,3...100,6 МПа, міцність через 90 діб – 118,6...124,7 МПа;
- використання метасилікату у вигляді розчину дозволило підвищити міцність у віці 2 діб на 28,2...33,9%, у віці 28 діб – на 9,6...10%, у віці 90 діб – на 11,5...13,96% у порівнянні з порошковим варіантом використання метасилікату натрію;
- співвідношення міцності на стиск до міцності на згин склало на 28 добу 6,8...6,9, через 90 діб – 6,9...7,3;
- нижча активність в'язучої речовини при використанні порошку метасилікату у порівнянні із замішуванням розчином, очевидно, пов'язана з витратами часу та

енергії на розчинення порошку порівняно з водним розчином метасилікату, який відразу ж вступає у взаємодію з компонентами в'язучої композиції. Це особливо помітно на ранніх стадіях твердіння. Однак, згодом ця різниця суттєво скорочується.

4. Власні деформації усадки RPC

Усадка вимірювалася з використанням цементно-піщаних зразків-балочок 4×4×16 см складу 1:1 і 1:3. Для управління деформаціями усадки було використано добавку тонкодисперсного CaCO_3 з розміром частинок 9...10 мкм. Результати вимірів представлені на рис.1.

Результати вказують, що власні деформації усадки зростають зі збільшенням вмісту цементного тіста та зменшення кількості заповнювача композиції, тобто вони вищі у складі 1:1 (рис.1, а). До моменту стабілізації усадка складів 1:1 та 1:3 без добавки CaCO_3 становила 0,88 та 0,66 мм/м відповідно.

Виходячи з результатів, показаних на рис.1, а, оптимальною кількістю добавки CaCO_3 , яка забезпечує мінімальну усадку, є 20%.

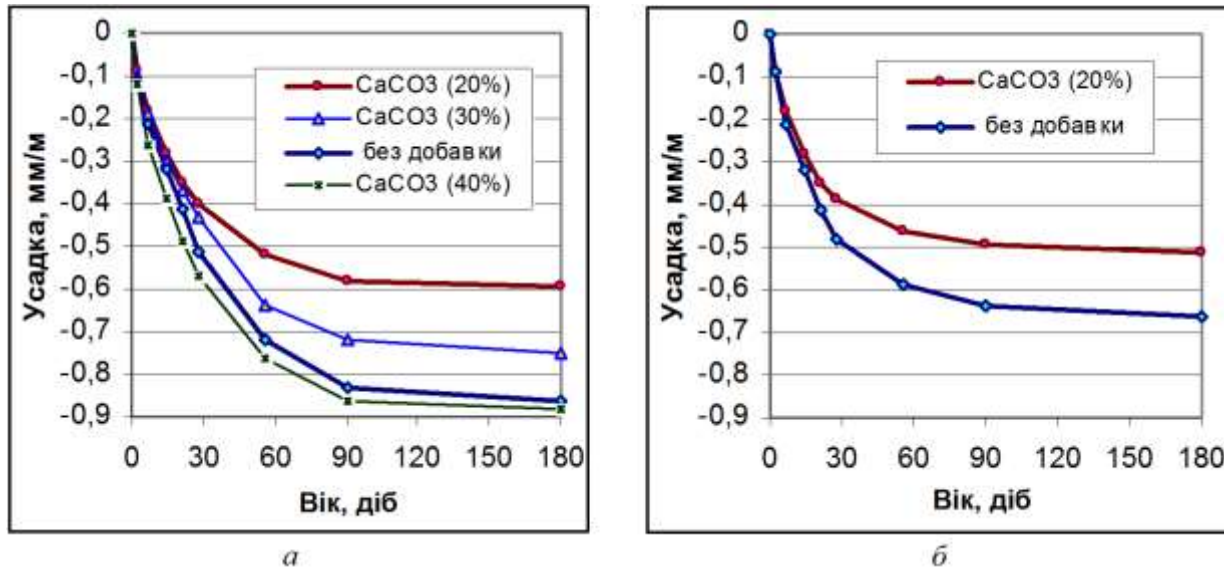


Рис.1. Власні деформації усадки дрібнозернистих бетонів складу 1:1(*а*) та складу 1:3(*б*) на основі лужно-активованих цементів

Fig.1. Natural shrinkage deformations of fine-grained concretes of 1:1 composition (*a*) and 1:3 composition (*b*) based on alkali-activated cements

ВИСНОВКИ

Введення оптимальної кількості добавки $CaCO_3$ дозволило знизити усадку у складі 1:1 з 0,88 до 0,59 мм/м, а у складі 1:3 з 0,66 до 0,51 мм/м. Підвищення дисперсності частинок $CaCO_3$ підсилює структуроутворюючий ефект і ще у більшій мірі зменшило усадкові деформації. Так, використання більш дисперсного кальциту з розміром частинок 5 мкм і 1 мкм дозволило знизити усадку у складах 1:1 до 0,54...0,52 мм/м і у складах 1:3 – до 0,49...0,46 мм/м відповідно.

Це можна пояснити тим, що частинки високодисперсного $CaCO_3$ здатні виступати як центри кристалізації і швидко формувати жорсткий кристалічний каркас, який перешкоджає усадці, а також здатні заповнювати пористий простір цементного каменю і формувати більш щільну структуру. Все це забезпечує зниження усадкових деформацій.

Враховуючи, що розмір частинок кальциту співставний з розмірами капілярів цементного каменю, можна припустити, що присутність кальциту в оптимальній кількості буде сприяти, у цілому, утворенню щільної і жорсткої структури цементного каменю типу "мікробетону".

Доведена можливість отримання високоміцних лужно-активованих реакційно-порошкових бетонів зі зниженою усадкою шляхом максимального ущільнення структури та підвищення ступеня закристалізованості продуктів гідратації цементної матриці. Окрім лужної активації, значимими факторами міцності таких бетонів виділено вміст цементу, агрегатний стан лужного компоненту, зерновий склад заповнювача.

Встановлено, що збільшення частки лужно-активованого цементу у системі "в'язуча речовина: пісок" від 1:3 до 1:1 зумовлює підвищення міцності на стиск бетонів у межах 75,7...83,3% при забезпеченні значень 35,7; 55,1; 63,8; 73,6; 87,5 і 104,5 МПа на 1, 2, 3, 7, 28 і 90 добу відповідно.

Розкрита роль агрегатного стану лужного компоненту – використання метасилікату натрію у вигляді водного розчину значно інтенсифікує структуроутворення цементного каменю на самих ранніх стадіях гідратації. Це обумовлює подальше підвищення кінетики розвитку міцності бетону при забезпеченні міцності на стиск 49,1; 73,8; 81,1; 87,8; 96,3 і 120,6 МПа відповідно на 1, 2, 3, 7, 28 і 90 добу. Оптимізація зернового

складу дрібного заповнювача дозволяє додатково підвищити міцнісні показники – 52,3; 76,3; 85,0; 94,3; 100,6 і 124,7 МПа відповідно. Висока тріщиностійкість та ударна в'язкість бетону підтверджується співвідношеннями міцності на стиск до міцності на згин у межах 5,3...5,9 у віці 28 діб.

Виявлено, що ущільнення мікроструктури та інтенсифікація кристалізаційних процесів в цементній матриці досягається модифікацією добавкою тонкодисперсного карбонату кальциту ($CaCO_3$) і визначає зменшення деформацій усадки бетону в 1,3...1,5 рази на момент стабілізації через 90 днів. Крім того, зменшення розміру частинок кальциту зумовлює прискорення та поглиблення структуроутворюючих процесів реакційно-порошкових бетонів і ще більше зменшення усадкових деформацій.

Показано зменшення впливу гранулометрії піску на міцність бетону зі збільшенням вмісту цементу. Зазначений ефект обумовлений "плаваючим" розміщенням піску у цементної матриці. Міцність у цьому випадку забезпечується щільністю мікроструктури бетону.

У результаті вказаних заходів отримано високоміцний лужно-активованим цементний реакційно-порошковий бетон класу міцності C80/95 з високою кінетикою ранньої міцності (52,3; 76,3; 85 МПа на 1, 2, 3 добу відповідно), високою тріщиностійкістю (відношення міцності на стиск до міцності на згин 5,3...5,9) та зниженими деформаціями усадки.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту (реєстраційний № 0123U101832), який виконуються за рахунок бюджетного фінансування у 2023...2025 рр.

ЛІТЕРАТУРА

1. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі: монографія / за редакцією д.т.н., професора Л.Й. Дворкіна. – Рівне : НУВГП, 2020. – 305 с

2. Pourbaba M, Chakraborty R, Pourbaba M, Belarbi A, Yeon J H. A New insight into the design compressive strength of ultra-high performance concrete. *Buildings* 2023, 13, 2909. <https://doi.org/10.3390/buildings13122909>
3. Krivenko P, Petropavlovskii O, Vozniuk H, Lakusta S. The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 195. P. 142-146. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.536>
4. Du J, Meng W, Khayat KH. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B Engineering*. 2021; 224(9):109220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>.
5. Sanytsky M, Kropyvnytska T, Vakhula O, Bobetsky Y. Nanomodified ultra high-performance fiber reinforced cementitious composites with enhanced operational characteristics. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 438: 362–371. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_36
6. Li J, Wu Z, Shi C, Yuan Q, Zhang Z. Durability of ultra-high performance concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2020; 255: 119296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>.
7. Marvila MT, de Azevedo ARG, de Matos PR, Monteiro SN, Vieira CMF. Materials for production of high and ultra-high performance concrete: review and perspective of possible novel materials. *Materials*. 2021; 14(15):4304. <https://doi.org/10.3390/ma14154304>.
8. Aydın S, Baradan B. Engineering properties of reactive powder concrete without Portland cement. *ACI Materials Journal*. 2013; 110(6): 619-627.
9. Mayhoub OA, Nasr E.-SAR, Ali YA, Kohail M. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12: 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016>
10. Ahmad S, Zubair A, Maslehuddin M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*. 2015; 99: 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010>
11. Yalçınkaya Ç, Yazıcı H. Early-age shrinkage properties of ecofriendly reactive powder concrete with reduced cement content. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2019.

- <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1665105>.
12. **Ahmed S, Al-Dawood Z, Abed F, Mannan MA, Al-Samarai M.** Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete - A review. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44: 103238, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103238>.
 13. **Naqi A, Jang JG.** Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: a review. *Sustainability*. 2019; 11: 537. <https://doi.org/10.3390/su11020537>.
 14. **Sanytsky M, Kropyvnytska T, Ivashchyshyn H.** Sustainable modified pozzolanic supplementary cementitious materials based on natural zeolite, fly ash and silica fume. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023; 1254: 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012004>
 15. **Kryvenko P, Rudenko I, Sikora P, Sanytsky M, Konstantynovskiy O, Kropyvnytska T.** Alkali-activated cements as sustainable materials for repairing building construction: a review. *Journal of Building Engineering*. 2024; 90: 109399. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109399>
 16. **Кривенко П. В., Руденко І. І., Гелевера О. Г., Разсамакін А. В.** Вплив агрегатного стану лужного компоненту на властивості лужно-активованих цементів. *Збірник наукових праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди"*, №44, С.39-50. 2023. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.05>
 17. **Aydin S, Baradan B.** High temperature resistance of alkali-activated slag- and Portland cement-based reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*. 2012; 109(4): 463. <https://doi.org/10.14359/51683921>.
 18. **Aydin S, Baradan B.** Sulfate resistance of alkali-activated slag and Portland cement based reactive powder concrete. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43: 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103205>.
 19. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O.** Effect of technological factors on freeze-thaw resistance of alkali-activated slag cement concrete in NaCl solution. AIP Conference Proceedings. 2023; 2684: 040011 <https://doi.org/10.1063/5.0120034>.
 20. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O, Rzasamakin A.** Sustainable performance of alkali-activated blast furnace cement concrete with high freeze-thaw resistance. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2023; 1254: 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012003>.
 21. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O, Boiko O, Vaičiukynienė D.** Effect of sodium phosphate and sodium nitrate on microstructure of alkali-activated slag cement pastes and properties of reinforced concrete under cyclic drying-wetting in sea water. AIP Conference Proceedings. 2023; 2840: 020006-1–020006-11. <https://doi.org/10.1063/5.0168007>.
 22. **Yao W, Shi Y, Xia K, Peterson K.** Dynamic fracture behavior of alkali-activated mortars: Effects of composition, curing time and loading rate. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019; 208: 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.01.017>
 23. **Kryvenko PV, Gots VI, Petropavlovskiy OP, Rudenko II, Konstantynovskiy OP.** Complex shrinkage-reducing additives for alkali activated slag cement fine concrete. *Solid State Phenomena*. Vol. 321. 2021; 321: 165–170. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.321.165>.
 24. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O.** Comparison of influence of surfactants on thermokinetic characteristics of alkali-activated slag cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021; 6(6 (114)): 39–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245916>
 25. **Ahmed M, El Hadi KM, Hasan MA, Mallick J, Ahmed A.** Evaluating the corelationship between concrete flexural tensile strength and compressive strength. *International Journal of Structural Engineering*. 2014; 5[2]: 115–131. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2014.060902>

REFERENCES

1. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі : монографія / за редакцією д.т.н., професора **L.J.Dvorkina**. – Рівне : NUVGP, 2020. – 305 p.
2. **Pourbaba M, ChakrabortyR, Pourbaba M, Belarbi A, YeonJ H.** New insight into the design compressive strength of ultra-high performance concrete. *Buildings*, (2023) 13, 2909. <https://doi.org/10.3390/buildings13122909>
3. **Krivenko P, Petropavlovskii O, Vozniuk H, Lakusta S.** The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures. *Procedia*

- Engineering*. Vol. 195. P. 142-146. (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.536>
4. **Du J, Meng W, Khayat KH.** New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B Engineering*.; 224(9):109220 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>
 5. **Sanytsky M, Kropyvnytska T, Vakhula O, Bobetsky Y.** Nanomodified ultra high-performance fiber reinforced cementitious composites with enhanced operational characteristics. *Lecture Notes in Civil Engineering*.; 438: 362–371. (2024)
https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_36
 6. **Li J, Wu Z, Shi C, Yuan Q, Zhang Z.** Durability of ultra-high performance concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 255: 119296. (2020)
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
 7. **Marvila MT, de Azevedo ARG, de Matos PR, Monteiro SN, Vieira CMF.** Materials for production of high and ultra-high performance concrete: review and perspective of possible novel materials. *Materials*. 14(15):4304. (2021)
<https://doi.org/10.3390/ma14154304>
 8. **Aydın S, Baradan B.** Engineering properties of reactive powder concrete without Portland cement. *ACI Materials Journal*.; 110(6): 619-627. (2013).
 9. **Mayhoub OA, Nasr E.-SAR, Ali YA, Kohail M.** The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review. *Ain Shams Engineering Journal*.; 12: 145–158. (2021)
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016>
 10. **Ahmad S, Zubair A, Maslehuiddin M.** Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*; 99: 73–81. (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010>
 11. **Yalçınkaya Ç, Yazıcı H.** Early-age shrinkage properties of ecofriendly reactive powder concrete with reduced cement content. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. (2022)
[DOI: 10.1080/19648189.2019.1665105](https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1665105)
 12. **Ahmed S, Al-Dawood Z, Abed F, Mannan MA, Al-Samarai M.** Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete - A review. *Journal of Building Engineering*.; 44: 103238. (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103238>
 13. **Naqi A, Jang JG.** Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: a review. *Sustainability*.; 11: 537. (2019).
<https://doi.org/10.3390/su11020537>
 14. **Sanytsky M, Kropyvnytska T, Ivashchyshyn H.** Sustainable modified pozzolanic supplementary cementitious materials based on natural zeolite, fly ash and silica fume. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.; 1254: 012004. (2023).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012004>
 15. **Kryvenko P, Rudenko I, Sikora P, Sanytsky M, Konstantynovskiy O, Kropyvnytska T.** Alkali-activated cements as sustainable materials for repairing building construction: a review. *Journal of Building Engineering*.; 90: 109399. (2024)
<https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109399>
 16. **Kryvenko P. V., Rudenko I. I., Gelevera O. G., Razsamakin A. V.** Vplyv agregat-nogo stanu luzhnogo komponentu na vlasty-vosti luzhno-aktyvovanyh cementiv. *Zbirnyk naukovykh prac' "Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudy"*, №44, P.39-50. (2023).
<https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.05>
 17. **Aydın S, Baradan B.** High temperature resistance of alkali-activated slag- and Portland cement-based reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*.; 109(4): 463. (2012).
<https://doi.org/10.14359/51683921>
 18. **Aydın S, Baradan B.** Sulfate resistance of alkali-activated slag and Portland cement based reactive powder concrete. *Journal of Building Engineering*.; 43: 103205. (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103205>
 19. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O.** Effect of technological factors on freeze-thaw resistance of alkali-activated slag cement concrete in NaCl solution. *AIP Conference Proceedings*.; 2684: 040011. (2023).
<https://doi.org/10.1063/5.0120034>
 20. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O, Razsamakin A.** Sustainable performance of alkali-activated blast furnace cement concrete with high freeze-thaw resistance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing.; 1254: 012003. (2023).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012003>

21. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O, Boiko O, Vaičiukynienė D.** Effect of sodium phosphate and sodium nitrate on microstructure of alkali-activated slag cement pastes and properties of reinforced concrete under cyclic drying-wetting in sea water. *AIP Conference Proceedings*; 2840: 020006-1–020006-11. (2023).
<https://doi.org/10.1063/5.0168007>
22. **Yao W, Shi Y, Xia K, Peterson K.** Dynamic fracture behavior of alkali-activated mortars: Effects of composition, curing time and loading rate. *Engineering Fracture Mechanics*; 208: 119-130. (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.01.017>
23. **Kryvenko, P. V.; Gots, V. I.; Petropavlovskiy, O. N.; Rudenko, I. I.; Konstantynovskiy, O. P.** Complex Shrinkage-Reducing Additives for Alkali Activated Slag *Cement Fine Concrete*. *SSP*, 321, 165–170. (2021).
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.321.165>
24. **Krivenko P, Rudenko I, Konstantynovskiy O.** Comparison of influence of surfactants on thermokinetic characteristics of alkali-activated slag cement. *Eastern - European Journal of Enterprise Technologies*; 6(6 (114)): 39–48. (2021).
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245916>
25. **Ahmed M, El Hadi KM, Hasan MA, Mallick J, Ahmed A.** Evaluating the co-relationship between concrete flexural tensile strength and compressive strength. *International Journal of Structural Engineering*; 5[2]: 115–131. (2014).
<https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2014.060902>.

REACTIONARY POWDER CONCRETE BASED ON ALKALI-ACTIVATED CEMENT

*Igor RUDENKO,
Oleksandr GELEVERA,
Oleksandr KONSTANTYNOVS'KYJ,
Andrij RAZSAMAKIN*

Abstract. The development of reactive powder concretes based on alkali-activated cements for the construction and protection of critical infrastructure is of worldwide importance for improving the safety of their exploitation. The factors influencing the kinetics of strength gain and drying shrinkage of reactive powder concretes using sodium silicate pentahydrate as an alkaline activator were determined. It was shown that increasing the ratio of alkali-activated cement to sand from 1:3 to 1:1 and using the activator in the liquid state increased the concrete strength gain: the compressive strength was 52.3 MPa, 85.0 MPa, 100.6 MPa, and 124.7 MPa at the ages of 1, 3, 28, and 90 days of hardening, respectively. The ratio of compressive strength to flexural strength was 5.3...5.9 at an age of 28 days, indicating a high fracture toughness of the obtained material. An increase in the content of alkali-activated cement in concrete determined a decrease in the influence of sand granulometry on concrete strength, due to its “floating” placement in the cement matrix. The introduction of a fine calcite additive ensured to reduce the shrinkage of concrete by 1.3...1.5 times at an age of 90 days due to the densification of the microstructure and the intensification of crystallisation processes. The implementation of these measures resulted in a high strength alkali-activated cement reactive powder concrete of strength class C80/95, high fracture toughness and reduced drying shrinkage.

Keywords: reactive powder concrete; alkali-activated cement; high strength; drying shrinkage

Стаття надійшла до редакції 30.09.2024