

ВПЛИВ СКЛАДУ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ ЛУЖНО-АКТИВОВАНИХ ШЛАКОПОРТЛАНЦЕМЕНТНИХ БЕТОНІВ НА ЕВОЛЮЦІЮ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF REACTIVE POWDER ALKALINE-ACTIVATED SLAG PORTLAND CEMENT CONCRETE ON THE EVOLUTION OF ITS PROPERTIES

Руденко І. І., д.т.н., проф., <http://orcid.org/0000-0001-5716-8259>,
Гелевера О. Г., к.т.н., доц., <http://orcid.org/0000-0002-6285-9780>,
Разсмакін А. В., аспірант, <http://orcid.org/0000-0001-5130-6059>,
(Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ)

Rudenko I. I., Ph.D., Prof., <http://orcid.org/0000-0001-5716-8259>, **Gelevera O.G.,** Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0002-6285-9780>,
Razsamakin A.V., graduate student, <http://orcid.org/0000-0001-5130-6059>,
V.D. Glukhovsky Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv
(National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv)

Встановлено вплив складу лужно-активованих реакційно-порошкових бетонів та інших факторів на еволюцію їх властивостей. У результаті отримано високоміцний надшвидкотверднучий лужно-активований цементний реакційно-порошковий бетон класу міцності С80/95 з високою кінетикою ранньої міцності (52,3; 76,3; 85,0 МПа на 1, 2, 3 добу відповідно), високою тріщиностійкістю (з відношенням міцності на стиск до міцності на згин 5,3...5,9), зниженими деформаціями усадки (0,5...0,6 мм/м), стабільними експлуатаційними характеристиками у часі та технологічно прийнятними строками тужавлення. За швидкістю набору міцності у ранні строки надшвидкотверднучий РПБ значно перевершує бетони на основі глиноземного цементу, супершвидкотверднучого портландцементу та цементу з низькою водопотребою маючи прийнятні деформації усадки. Враховуючи високі фізико-механічні, експлуатаційні та спеціальні характеристики отриманих РПБ, їх можна віднести до "високофункціональних".

The influence of the composition of alkali-activated reactive powder concretes (RPC) and other factors on the genesis of their properties is established. It was shown that an increase in the binder content in the composition caused an increase in strength, and the dependence of strength on the sand content at all stages of hardening is almost direct at water-cement

ratio ≤ 0.35 . Optimization of sand granulometry allowed to improve the rheological properties of the mixture and to increase the strength by 5...6%. The effect of increasing the OPC within 5...45% in the mixture with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on the strength of RPC is ambiguous – in the early stages (up to 3 days) it causes an acceleration of strength gain, but in the long term, composition with 5% OPC and 95% GGBFS has the highest strength. Shrinkage deformations decrease with an increase of OPC/GGBFS ratio and part of fine aggregate. The introduction of an optimal amount of dispersed calcite additive allows to reduce the shrinkage deformations. The admixtures allow regulating the initial setting times within 19...118 min. The performed work resulted in obtaining high-strength, ultra-rapid-hardening, alkali-activated cement reactive powder concrete of strength class C80/95 with high early strength (52.3 MPa at 1 d; 76.3 MPa at 2 d; 85.0 MPa at 3 d), high crack resistance (compressive strength / flexural strength ratio = 5.3...5.9), reduced shrinkage (0.5...0.6 mm/m), stable performances, and technologically acceptable setting times. In terms of early strength gain, the designed ultra-rapid-hardening RPC significantly surpasses concretes based on alumina cement, super-rapid-hardening portland cement and low-water-demand cement, while having acceptable shrinkage. Considering the high physical, mechanical, operational and special characteristics, the obtained RPC can be classified as high performance concrete.

Ключові слова: Лужно-активовані шлаковміщуючі цементы, реакційно-порошкові бетони, власні деформації усадки, міцність.
Alkali-activated slag-containing cements, reactive powder concrete, shrinkage, strength.

Вступ. Аналіз сучасних тенденцій у світовому матеріалознавстві вказує на пріоритетність розробки і використання будівельних матеріалів з високими та надвисокими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками. Це, у першу чергу, цементы і бетони на їх основі. Існує попит і зацікавленість в отриманні подібних матеріалів [1-4].

У даній роботі вирішувалась задача розробки реакційно-порошкових бетонів (РПБ) підвищеної ефективності за рахунок використання лужно-активованих цементів на основі побічних продуктів та промислових відходів виробництва і дослідження їх поведінки у часі. Розробка може бути використана для створення фортифікаційних споруд, захисту атомних електростанцій, підстанцій, контейнерів для радіоактивних відходів, гідротехнічних споруд, колекторів різного призначення та інших об'єктів критично важливої інфраструктури – там де необхідні високі гарантії захисту, непроникності та довговічності.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.

Високоперспективними з цього напрямку, як показано багатьма роботами, є лужні цементы і бетони [5, 6], а цементы, виготовлені з використанням розчинного скла, як лужного компоненту, заслуговують особливої уваги як основа для отримання РПБ у зв'язку з їх здатністю при правильному виборі параметрів технологічного процесу і композиційного складу демонструвати надшвидкий набір міцності і високу стандартну кінцеву міцність при збереженні високих експлуатаційних властивостей у часі [7, 8], що обумовлено модифікуючою дією аморфного високоактивного кремнезему, присутнього у розчинному склі.

Питаннями, які потребують уточнення і вирішення у першу чергу виходячи з особливостей використання шлаколужних цементів і бетонів на основі розчинних силікатів натрію і поставленої задачі, є збільшення строків тужавлення до технологічно прийнятних, встановлення залежності властивостей РПБ від їх складу, регулювання власних деформацій усадки та відстеження змін основних експлуатаційних властивостей РПБ (міцності, тріщиностійкості, ударної міцності) у часі.

Відомі спроби регулювання строків тужавлення лужно-активованих цементів на основі розчинних силікатів натрію, але вони малоефективні [9], відносно ефективні тільки при $M_c \geq 2$ [10] або токсичні і дорогі [11, 12].

Залежність властивостей РПБ від їх складу, регулювання власних деформацій усадки та відстеження змін основних експлуатаційних властивостей РПБ (міцності, тріщиностійкості, ударної міцності) у часі при використанні шлаколужних цементів взагалі не досліджувались.

Сировинні матеріали та методи досліджень. Як алюмосилікатні компоненти цементу були використані тонкодисперсний Дніпродзержинський доменний гранульований шлак (далі за текстом - шлак) і портландцемент СЕМ І 42,5 N (далі за текстом - ПЦ) з питомою поверхнею 4100...4200 $\text{см}^2/\text{г}$ (за Блейном) із співвідношенням у шлако-портландцементній суміші 95:5, 75:25 і 55:45 (шлак : ПЦ). Характеристики шлаку та ПЦ представлено у Табл.1 і Табл.2.

Таблиця 1

Характеристика шлаку								
Вміст оксидів, % мас.							В.п.п., %	М _о
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

Як лужний компонент використовувався метасилікат натрію пентагідрат ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) за CAS 497-19-8 у вигляді негігроскопічного порошку та у вигляді розчину з $\rho = 1,24 \text{ г/см}^3$. Метасилікат натрію вводили до складу цементних систем в однаковій кількості у перерахунку на безводну суху речовину. В якості лужного компоненту використовувалося також розчинне натрієве скло з $M_c = 2 \dots 3$ і $\rho = 1,35 \text{ г/см}^3$.

Таблиця 2

Хіміко-мінералогічний склад клінкеру у складі СЕМ І 42,5 N

Вміст оксидів, % мас.							в.п.п.	Вміст мінералів, % мас.			
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O	%	C_3S	$\beta-C_3S$	C_3A	C_4AF
21,0	5,6	4,8	65,0	2,5	0,7	0,15	0,25	58,0	19,0	7,25	15,5

В якості регуляторів строків тужавлення і структуроутворення композицій з метасилікатом натрію використовувалася добавка ЛСТМ (лігносульфонат технічний модифікований натрієвий) у вигляді концентрованого розчину з $\rho = 1,25$, $K = 45\%$ і $pH = 9$.

Для регулювання строків тужавлення композицій на основі високомодульних натрієвих розчинних стекел з $M_c \geq 2$ використовувалися добавки тринатрійфосфату – $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ (далі за текстом ТНФ) і гліцерину – $C_3H_8O_3$ або $C_3H_5(OH)_3$ з $\rho = 1,228$ г/см³. Відповідно до [13-16], сіль $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ була використана як модифікатор для підвищення стійкості високомодульних натрієвих силікатів до коагуляції при взаємодії зі шлаком (цементом) і, таким чином, для сповільнення тужавлення досліджуваних цементних композицій. Вміст солі визначали експериментально, доки не досягалися прийнятні терміни початку тужавлення не менше 15...20 хв. для цементів з високою ранньою міцністю [17], які визначались за методом EN 196-3. Цю сіль попередньо розчиняли у розчині високомодульного силікату натрію з подальшим доведенням отриманого однорідного розчину до середньої густини 1,35 г/см³. Добавка гліцерину здатна підсилювати дію ТНФ у напрямку управління термінами тужавлення та впливати на структуроутворення цементного каменю.

Для регулювання усадки використовувався тонкодисперсний карбонат кальцію ($CaCO_3$) за CAS 471-34-1 у порошкоподібній формі.

Як дрібний заповнювач у цементно-піщаних розчинах використовували річковий кварцовий пісок з $M_k = 1,16$. Оптимізація фракційного складу річкового піску, з метою отримання безперервної гранулометрії, виконувалась за допомогою модифікованого рівняння Фуллера [18-20]. Фракційний склад оптимізованого піску представлено таким чином: 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. Для наближеного розрахункового визначення питомої поверхні дрібних заповнювачів була використана формула Ладінського А.С. [21].

Приготування цементно-піщаного розчину здійснювалось у стандартному змішувачі типу "Hobart".

Для оптимізації складів дрібнозернистих бетонів, зручності обробки отриманих даних було використано математичне планування експерименту типу ПФЕ-2³ та ПФЕ-3³, яке традиційно добре зарекомендувало себе у наукових дослідженнях.

Результати досліджень

Міцність

Вплив співвідношення "в'яжуча речовина : пісок" на міцність бетонів

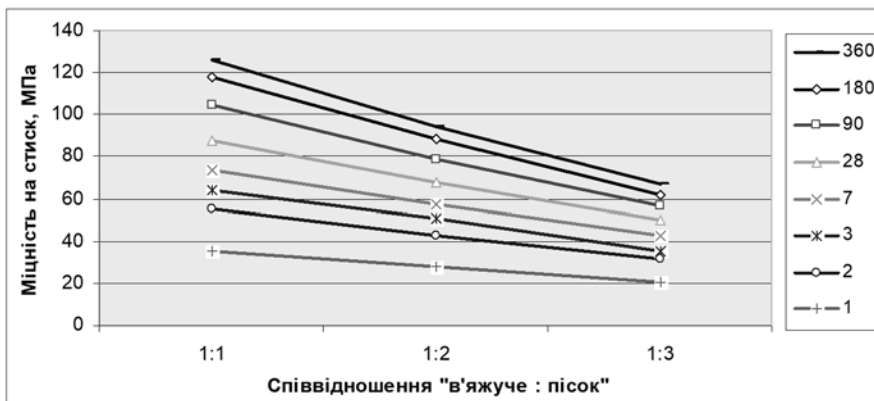
Досліджено вплив в'яжуче-піщаного співвідношення на міцність з використанням кремнеземистого піску з не оптимізованою гранулометрією, $M_k = 1,16$. Як лужний компонент використано метасилікат натрію пентагідрат у вигляді порошку. Склади замішувалися водою. Результати досліджень наведено у Табл.3.

Таблиця 3

Фізико-механічні характеристики дрібнозернистих лужно-активованих бетонів залежно від співвідношення "в'яжуча речовина : пісок"

№ з/п	Склад в'яжучої речовини, мас. %			В:П	В/В	Роз-плив, мм	Міцність на стиск/згин, МПа, у віці, діб							
	шлак	ПЦ	м/си-лікат				1	2	3	7	28	90	180	360
1	85	5	10	1:1	0,218	180	<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	<u>118,1</u> 19,8	<u>123,9</u> 20,7
2				1:2	0,237	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	<u>88,5</u> 15,5	<u>92,6</u> 16,3
3				1:3	0,334	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	<u>61,7</u> 14,7	<u>64,8</u> 15,4

Як видно з Рис.1, залежність міцності від вмісту піску практично пряма за умови $V/B \leq 0,35$.



Залежність міцності цементно-піщаних бетонів у різні строки твердіння від співвідношення "в'яжуча речовина : пісок"

Як видно з результатів Табл.1 і Рис.1, 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; 57,0 МПа, у віці 180 діб – 118,1; 88,5; 61,7 МПа, у віці 360 діб – 123,9; 92,6; 64,8 МПа відповідно. Найбільш високу міцність продемонстрував склад № 1 (див.Табл.1) із співвідношення "в'язуче : пісок" – 1 : 1, який приймається до подальших досліджень.

Вплив гранулометрії заповнювача на міцність РПБ

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 Табл.4. Згідно результатів Табл.4, усі склади продемонстрували особливо швидкий набір міцності на стиск – 35,7...40,0 МПа через 1 добу. Через 28 діб – 87,5...91,8, через 90 діб – 104,5...109,4, через 180 діб – 118,1...122,2 МПа, через 360 діб – 123,9...128,3 МПа.

Таблиця 4

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

№ з/п	Склад суміші					Питома поверхня піску, см²/г	В/В	Розплив, мм	Міцність на стиск/згин, МПа, у віці, діб							
	в'язуча речовина, мас. %			вид піску і В:П					1	2	3	7	28	90	180	360
	шлак	ПЩ	метасилікат	оптимізований	не оптимізований											
4	85	5	10	1:1	—	111	0,214	200	<u>40,0</u> 7,5	<u>61,1</u> 7,9	<u>68,8</u> 9,6	<u>77,8</u> 14,3	<u>91,8</u> 17,3	<u>109,4</u> 19,9	<u>122,2</u> 21,0	<u>128,3</u> 21,9
5				—	1:1	345	0,218	180	<u>35,7</u> 6,3	<u>55,1</u> 6,8	<u>63,8</u> 7,5	<u>73,6</u> 10,8	<u>87,5</u> 15,8	<u>104,5</u> 18,4	<u>118,1</u> 19,8	<u>123,9</u> 20,7

Співвідношення міцності на стиск до міцності на згин складало загалом 5,3...5,5 у віці 28 діб і 5,5...5,7 через 90 діб, що вказує на достатньо високу в'язкість руйнування [22]. Хоча відомо, що цей зв'язок не є прямо пропорційним, зазвичай вважається, що міцність на стиск приблизно в десять разів більша міцності на вигин, що передбачає фіксований зв'язок між цими двома змінними.

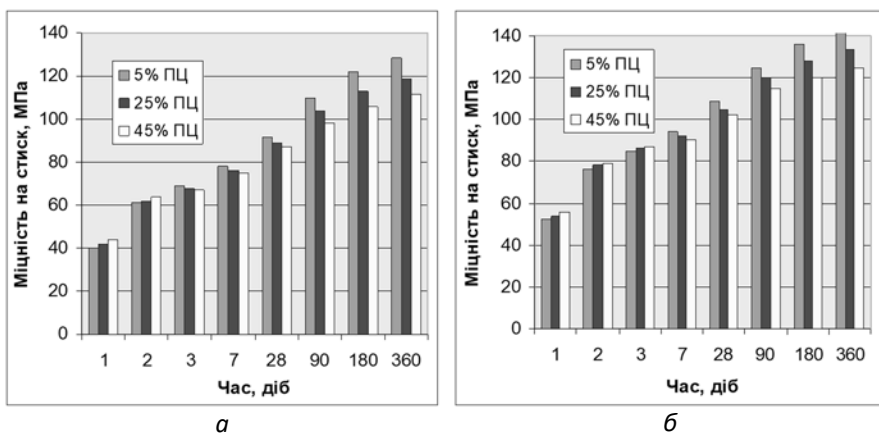
Оптимізація фракційного складу річкового піску дозволила поліпшити

показники міцності в усі терміни твердіння на 5...6%, 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 позитивний вплив на консистенцію суміші – розплив 200 мм на складі № 4 порівняно зі 180 мм на складі № 5.

Вплив вмісту портландцементу у в'язучій речовині та агрегатного стану лужного компоненту на міцність РПБ

Генезис міцності РПБ з різним вмістом портландцементу у цементно-шлаковій суміші при використанні метасиликату натрію у різному агрегатному стані представлено на Рис.2.



Генезис міцності РПБ на основі метасиликату натрію:

а – метасиликат натрію у вигляді порошку, 10%; *б* – метасиликат натрію у вигляді розчину, $\rho = 1,24$ г/мл; склад 1 : 1; пісок з оптимізованою гранулометриєю

Строки початку тужавлення композицій при використанні порошку метасиликату натрію і вмісті портландцементу у шлакоцементній суміші 5...55 % склали 19...100 хв., а при введенні 2% добавки ЛСТМ – 40...118 хв. Збільшення вмісту портландцементу викликає скорочення строків тужавлення.

Вплив силікатного модуля розчинного скла на міцність РПБ

В якості лужного компоненту використовувалося натрієве розчинне високомодульне скло з $M_c = 2...3$, $\rho = 1,3$ г/см³, добавка тринатрійфосфату для регулювання строків тужавлення у кількості 12% від маси скла.

Співвідношення "в'яжуча речовина : пісок" – 1 : 1. Оптимізація складів виконувалась з використанням математичного планування експерименту типу ПФЕ-2³. Фактори, рівні їх варіювання та результати експерименту представлені у Табл.5 і Табл.6.

Таблиця 5

Вихідна дані					
Фактори	Одиниці виміру.	Код	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
Силікатний модуль скла, Мс	–	X1	2	2,5	3
Вміст ПЦ у в'яжучій речовині	%	X2	5	25	45

Таблиця 6

План і результати експерименту												
№ з/п	Матриця плану у кодах		Матриця плану у натур. величинах		Міцність на стиск, R _{ст.} , МПа, через							
					3 год.	1 доба	3 доби	7 діб	28 діб	90 діб	180 діб	360 діб
	X1	X2	Мс	ПЦ %								
1	+1	+1	3	45	26,9	45,7	66,2	82,8	96,6	102,7	105,3	109,5
2	+1	-1	3	5	24,1	40,0	62,4	89,8	119,3	126,7	129,9	134,1
3	-1	+1	2	45	21,1	36,2	53,2	66,4	77,7	82,7	84,8	88,2
4	-1	-1	2	5	19,0	32,1	50,4	72,1	91,1	96,8	99,3	102,9
5	+1	0	3	25	25,5	40,9	64,4	86,3	108,1	114,9	117,8	121,7
6	-1	0	2	25	20,1	32,0	51,9	69,2	84,5	89,8	92,1	95,7
7	0	+1	2,5	45	28,0	45,4	69,2	88,9	111,9	118,9	121,9	125,8
8	0	-1	2,5	5	25,6	40,7	65,9	95,3	129,8	138,0	141,5	144,6
9	0	0	2,5	25	26,8	40,8	67,6	92,1	121,0	128,6	131,8	136,1

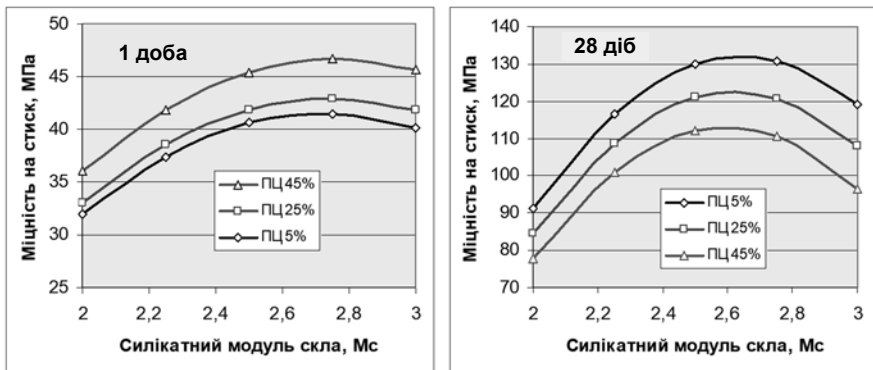
У результаті обробки даних Табл.6 отримані рівняння регресії на усі терміни твердіння, які адекватно описують результати експерименту.

Виходячи з регресійного аналізу рівнянь зроблений висновок, що на ранніх етапах твердіння (до 3 діб включно) обидва фактори позитивно впливають на міцність (Рис.3, 1 доба). Причому вплив фактора X1 (Мс) дещо більш сильний, ніж вплив X2 (вміст ПЦ).

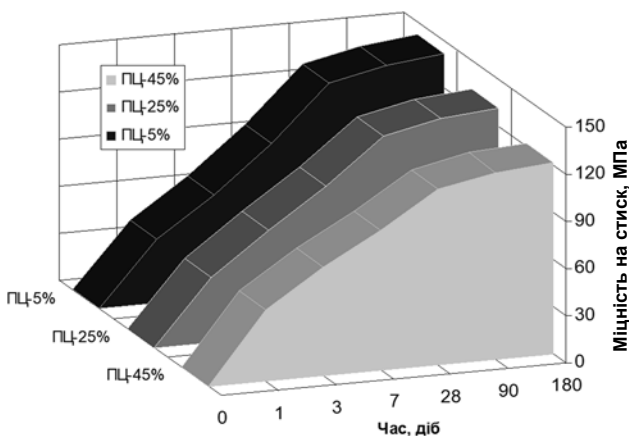
Надалі картина дещо змінюється. Починаючи з 7 доби і далі вплив фактора X1 (Мс) залишається позитивним, а вплив фактора X2 (ПЦ) міняється на протилежний, тобто він уже не сприяє збільшенню міцності (Рис.3, 28 доба).

Генезис міцності РПБ на основі розчинного високомодульного натрієвого скла представлено на Рис.4.

У результаті показано, що використанням розчинних силікатів натрію з $M_c = 2 \dots 3$ забезпечило отримання надшвидкотверднучих високоміцних реакційно-порошкових бетонів з міцністю на стиск через 3 години – 19,0...28,0 МПа, 1 добу – 32,1...45,7 МПа, через 7 діб – 66,4...95,3 МПа, через 28 діб – 77,7...129,8 МПа, через 90 діб – 82,7...138 МПа, через 180 діб – 84,8...141,5 МПа, 360 діб – 88,2...144,6 МПа. Оптимальним є використання розчинного натрієвого скла з $M_c = 2,5 \dots 2,6$ (Рис.3).



Вплив силікатного модуля розчинного скла на міцність РПБ на основі лужно-активованих цементів через 1 та 28 діб твердіння. Густина розчину – 1,35 г/см³, вміст ТНФ у розчині – 12%



Генезис міцності РПБ на основі розчинного високомодульного скла:

$M_c = 2,6$; вміст ПЦ у в'язучому – 5; 25; 45%; добавка ТНФ – 12%; склад 1 : 1; пісок з оптимізованою гранулометрією

При цьому співвідношення міцності "стиск : згин" склало 5,8 на 28 добу і 6,2 через 90 діб для оптимального складу із вмістом портландцементу у суміші "шлак – ПЦ" 5% і $M_c = 2,5$ (Табл.6, поз.8), що вказує на достатньо високу ударну міцність і тріщиностійкість бетону.

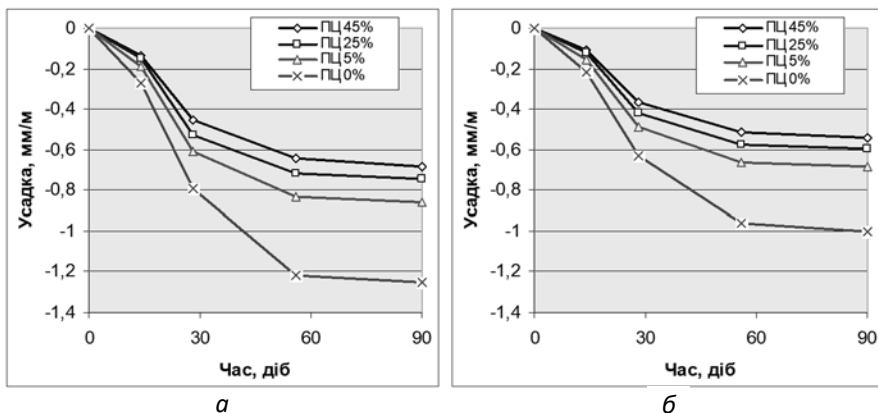
Строки початку тужавлення склали 34...46 хв. Можливе додаткове збільшення строків тужавлення за рахунок використання комплексної добавки "ТНФ + гліцерин" із співвідношенням 3:1 відповідно, що дозволяє розширити строки початку тужавлення до 60...90 хвилин.

Усадка

Вплив співвідношень "портландцемент : шлак" та "в'язуча речовина : пісок" на усадку РПБ

Усадочні деформації часто є критично важливою характеристикою для бетонів взагалі і особливо для РПБ зокрема. Для РПБ характерна, головним чином, аутогенна та повітряна усадка [23, 24]. Високий вміст цементу та низьке В/В в РПБ може призвести до високої аутогенної усадки і, відповідно, до утворення мікротріщин у ранньому віці, які розвиваються і збільшуються на більш пізніх стадіях твердіння [25].

На Рис.5 показано вплив вмісту портландцементу у шлакоцементній суміші складу (1:1) і (1:3) на розвиток деформацій усадки дрібнозернистих бетонів. Використано пісок з оптимізованою гранулометриєю, лужний компонент – метасилікат натрію пентагідрат (порошок) у кількості 10%.



Вплив на деформації усадки дрібнозернистих бетонів складу 1:1 (а) та складу 1:3 (б) на основі лужно-активованих цементів у присутності портландцементу у суміші "шлак - портландцемент" у кількості 5...45%

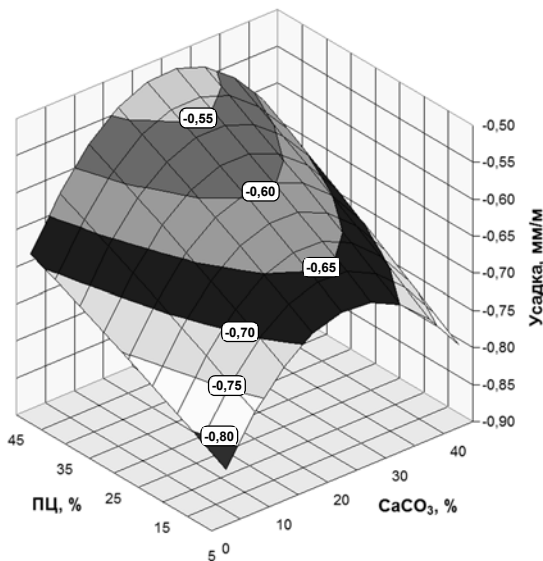
Результати вказують, що власні деформації усадки зростають зі збільшенням вмісту цементного тіста та зменшенням вмісту заповнювача у

композиції, тобто вони вищі у складі 1:1 (Рис.5, а). Збільшення долі піску у складі з 1:1 до 1:3 (в'язуча речовина : пісок) зменшує усадку приблизно на 20...22%.

Крім того, як видно з Рис.5, навіть невелика кількість ПЦ – 5% у алюмосилікатній складовій лужно-активованого цементу суттєво знижує усадкові деформації. Збільшення вмісту ПЦ у в'язучій речовині з 5% до 45% ще більше зменшує усадку. Це може бути пояснене тим, що введення СЕМ І з високим вмістом клінкеру сприяє інтенсифікації побудови жорсткого кристалічного каркасу лужно-активованих шлаковмішуючих цементів, мікроармуванню гелевидних мас нитковидними і голковидними кристалами низкоосновних гідратних сполук, зміщенню співвідношення гелевидних і кристалічних новоутворень у сторону кристалічних, що позитивно позначається на власній деформативності.

Вплив добавки CaCO_3 на усадку РПБ

Надалі був перевірений комплексний вплив на усадку вмісту портландцементу у лужно-активованому цементі і добавки CaCO_3 (Рис.6).



Вплив на усадку РПБ на основі лужно-активованих цементів вмісту портландцементу і добавки CaCO_3 :

вміст портландцементу – 5...45%, CaCO_3 – 0...40%, кількість метасилікату натрію пентагідрату (порошок) – 10%; співвідношення "в'язуча речовина : пісок" – 1 : 1; термін – 90 діб

Аналіз Рис.6 свідчить, що введення оптимальної кількості добавки CaCO_3 дозволяє додатково знизити усадку на 17,5...24,6% (з 0,69...0,83 до 0,52...0,68 мм/м).

Оптимальною кількістю добавки CaCO_3 є 20...25% (Рис.6). Збільшення кількості добавки кальциту понад оптимальну суттєво підвищує водопотребу, що призводить до розушільнення структури цементного каменю, до зниження міцності і зростання усадки РПБ.

Висновки

Встановлено вплив складу лужно-активованих реакційно-порошкових бетонів та інших факторів на генезис їх властивостей.

Показано, що збільшення вмісту в'язучої речовини у композиції веде до зростання міцності, а залежність міцності від вмісту піску в усі терміни тверднення практично пряма за умови $V/B \leq 0,35$.

Доведено, що оптимізація гранулометрії піску дозволила покращити реологічні властивості суміші і підвищити міцність на 5...6%.

Виявлено, що вплив збільшення вмісту ПЦ у суміші "ПЦ : шлак" у межах 5...45% на міцність РПБ неоднозначний – у ранні строки (до 3 діб включно) це викликає прискорення швидкості набору міцності, але у перспективі найбільшу міцність мають склади з 5% портландцементу і 95% шлаку.

З точки зору міцності РПБ, оптимальним є використання високомодульного розчинного скла з характеристиками – $M_c = 2,5...2,6$ і $\rho = 1,35$ г/мл.

Деформації усадки зменшуються із збільшенням частки портландцементу у суміші "ПЦ : шлак" і збільшенні дрібного заповнювача (піску). Введення оптимальної кількості добавки дисперсного кальциту дозволяє додатково зменшити власні деформації усадки.

Показано, що введення модифікуючих добавок дозволяє регулювати строки початку тужавлення у межах 19...118 хв.

У результаті виконаних робіт отримано високоміцний надшвидкотверднучий лужно-активований цементний реакційно-порошковий бетон класу міцності С80/95 з високою кінетикою ранньої міцності (52,3; 76,3; 85,0 МПа на 1, 2, 3 добу відповідно), високою тріщиностійкістю (з відношенням міцності на стиск до міцності на згин 5,3...5,9), зниженими деформаціями усадки (0,52...0,68 мм/м), стабільними експлуатаційними характеристиками у часі та технологічно прийнятними строками тужавлення. За швидкістю набору міцності у ранні строки, розроблений надшвидкотверднучий РПБ значно перевершує аналоги на основі глиноземного цементу, супершвидкотверднучого портландцементу та цементу з низькою водопотребою, маючи прийнятні значення деформацій усадки. Враховуючи високі фізико-механічні, експлуатаційні та спеціальні характеристики отриманих РПБ, їх можна віднести до "високофункціональних".

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.

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, ChakrabortyR, Pourbaba M, Belarbi A, YeonJ H. A New insight into the design compressive strength of ultra-highperformance concrete. *Buildings* 2023, 13(12), 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. Volume 195. Pages 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. Krivenko P.V., Petropavlovsky O.N., Gelevera A.G., Vozniuk G.V., Pushkar V.I. Commercially-produced alkaline cements and their efficiency *Scientific-Technical Collection "Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Structures"*, no. 18, 2009. P. 64-71.
6. Fernández-Jiménez A., García-Lodeiro I., Maltseva O., Palomo A. Hydration mechanisms of hybrid cements as a function of the way of addition of chemicals. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(1), 2018. P. 427-436. <https://doi.org/10.1111/jace.15939>.
7. Shi C., Krivenko P.V., Della Roy *Alkaline activated cements and concretes* (in Chinese, Authorized translation from English) : Monograph. Taylor & Francis: London. 2014. 392 p. <https://doi.org/10.1201/9781482266900>
8. Krivenko P. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *Ceram. Sci. Technol.*; V.8(3), 2017. P. 323-334. DOI: 10.4416/JCST2017-00042.
9. Чехов А. П., Сергеев А. М., Дибров Г. Д. Справочник по бетонам и растворам : Довідник. 3-тє вид. Київ : Будівельник, 1983. 214 с.
10. Кривенко П.В., Рунова Р.Ф., Саницкий М.А., Руденко И.И. Щелочные цементы : монография. Киев: ООО "Основа", 2015. 448 с.
11. Blazhis A.R. Rostovskaya G.S. Super quick hardening high strength alkaline clinker and clinker-free cements. *Alkaline cements and concretes. First Int. Conf.* v.I, Kiev, 1994. P. 193-302.
12. Krivenko P.V., Petropavlovsky O.N., Blazhis A.R. Super quick hardening alkali-activated cements. *First Int. Conf. on Advances of Chemically-activated Materials (CAM' 2010 – China)*. Jinan, Shandong, China, 2010, May, 9-12. P.79-86.
13. J.J. Chang A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 2003; Vol. 33, P. 1005-1011. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01096-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01096-7).
14. Pacheco-Torgal F., Barroso de Aguirre J., Ding Y., TahriW., Baklouti S. Performance of alkali activated mortars for the repair and strengthening of OPC concretes : *Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes*. Edited by Pacheco-Torgal et al, Elsevier. 2015; P. 627-642.

15. Krivenko P., Petropavlovsky O., Petranek V., Pushkar V., Vozniuk G. High strength alkali activated slag cements with controlled setting times and early strength gain. *Advanced Materials Research*, 2015. Vol. 1100, P. 44-49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.44>.
16. Krivenko P., Petropavlovskii O., Pushkar V. Methods of regulation of the properties of alkali slag cements and concretes based on the liquid-glass. *Proceedings of 18th Ibaasil Internationale Baustofftagung*, Weimar, Tagungsbericht. 2012; Band 2, P. 1-1178-1-1185.
17. [Krivenko](#) Pavel., [Petropavlovskiy](#) Oleh, [Rudenko](#) Igor, [Lakusta](#) Sergei Control of early age cracksng in early-strength concrete based on alkali-activated slag cement Conference: *2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures - EAC212-14, ULB-VUB*, Brussels, Belgium September, 2017. Volume 2. <https://www.researchgate.net/publication/320306250>.
18. Г.А. Статюха, Н.Е. Телицына, И.В. Суруп Оптимизация гранулометрического состава наполнителей для сухих строительных смесей. *Химические технологии и экология. Вестник ЧДТУ*. 2008. № 4. С. 57–61.
19. Зозуля П.В. Штукатурные материалы: традиции и современность. Докл. конф. *Baltimix-2006*. URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-215924.html> (дата звернення: 15.12.2024).
20. Дорошенко В.С. Оптимизация гранулометрического состава сухих сыпучих формовочных смесей. *Литве и металургия*. 2(75). 2014. С.15-18.
21. Кривенко П. В., Пушкарёва К. К., Кочевих М. О. Заповнювачі для бетону : підручник. Київ: ФАДА ЛТД, 2001. 399 с.
22. Ahmed M, El Hadi KM, Hasan MA, Mallick J, Ahmed A. Evaluating the co-relationship between con-crete flexural tensile strength and compressive strength. *International Journal of Structural Engineering*. 2014. 5[2]. P. 115–131. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2014.060902>
23. Zhang M.H., Tam C.T., Leow M.P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, P. 1687–1694.
24. Tazawa E. Miyazawa S. Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology. *Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium, E & FN Spon*, London. 1993. P.159-168.
25. Aitcin P.C. Autogenous Shrinkage Measurement. *Autogenous Shrinkage of Concrete, edited by Eiichi Tazawa*. London, UK. 1999. P. 257–267.