

**УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ШЛАКОЛУЖНИХ  
ЦЕМЕНТІВ, АКТИВОВАНИХ СИЛКАТАМИ НАТРІЮ**

<sup>1</sup>**Кривенко П.В.**, д.т.н., професор,  
pavlo.kryvenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7697-2437

<sup>1</sup>**Гелевера О.Г.**, к.т.н., доцент,  
a-gelevera@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6285-9780

<sup>1</sup>**Руденко І.І.**, д.т.н., професор,  
igor.i.rudenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5716-8259

<sup>1</sup>**Константиновський О.П.**, к.т.н., доцент,  
alexandrkp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7936-5699

<sup>1</sup>*Київський національний університет будівництва та архітектури  
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна*

**Анотація.** У статті розглянуто підходи до формування складу шлаколуужних цементів при використанні в якості лужного компонента високомодульного розчинного скла, представленого товарним продуктом у вигляді рідини. Метою даної роботи було дослідження впливу модифікуючих добавок, силікатного модуля гідросилікатів натрію та режимів технології на процеси структуроутворення штучного цементного каменю для ефективного управління строками тужавлення, власними деформаціями усадки та досягнення високої міцності на стиск ( $\geq 80$  МПа у нормативному віці 28 діб і  $\geq 20$  МПа через 3 години твердіння у нормальних умовах). У результаті виконаних досліджень встановлено позитивний вплив від використання добавки гліцерину у складі комплексної добавки на формування структури та властивостей штучного каменя. Відмічено, що використання досліджених модифікуючих добавок сприяє підвищенню ступеню гідратації шлаку, формуванню поряд з гідросилікатними сполуками ксерогелевих структур та целітоподібних сполук, які відкладаються на гідросилікатній основі матриці у вигляді блоків-агрегатів та підвищують загальний об'єм структуроутворюючих одиниць. Встановлено позитивний синергетичний ефект від використання гліцерину у якості додаткового модифікуючого компонента комплексної добавки "тринатрійфосфат + гліцерин" для управління строками тужавлення у шлаколуужних цементах на основі високомодульних розчинних стекел. Це дозволило розширити строки початку тужавлення шлаколуужних цементів при використанні розчинних високомодульних стекел з 3...5 хв. до значень 26...83 хв. Отримані цементи з міцністю на стиск через 3 години 16,7...23,1 МПа, через 1 добу 34,1...38,2 МПа, через 28 діб 86,2...117,1 МПа при прийнятних строках початку тужавлення. Тепловиділення таких цементів через 72 години, незважаючи на їх високу активність, складає всього 150...180 Дж/г, що в 1,7...2 рази менше, ніж у швидкотверднучого портландцементу марки 600 і у 2...2,4 рази нижче, ніж у глиноземного цементу. Власні деформації усадки складів з модифікуючими добавками на момент стабілізації дорівнювали 0,5...0,6 мм/м.

**Ключові слова:** структуроутворення, строки тужавлення, лужна активація, розчинне високомодульне скло, власні деформації усадки.

**Вступ.** У світовій будівельній практиці все більше зростає потреба у високоміцних бетонах з інтенсивним набором міцності у ранні строки. Це зумовлено постійним підвищенням вимог до фізико-механічних та експлуатаційних характеристик бетонів та прагненням до скорочення термінів будівництва.

З цієї точки зору все більше зростає інтерес до лужноактивованих цементів, що обумовлено комплексом особливих властивостей, зокрема, високою міцністю і довговічністю штучного отриманого каменю, які перевершують традиційні цементи [1-7].

А цементі, виготовлені з використанням розчинного скла як лужного компоненту, заслуговують особливої уваги у зв'язку з їх здатністю при правильному виборі параметрів технологічного процесу і композиційного складу демонструвати високу міцність і швидкий набір міцності при збереженні високих експлуатаційних властивостей [3, 4]. Окрім того, це особливо актуально і з точки зору захисту та будівництва об'єктів критичної інфраструктури країни, там де необхідні високі гарантії захисту, непроникності та довговічності.

Але проблемою ефективного використання в'язучих цементних композицій, активованих розчинними високомодульними силікатами натрію, і максимальної реалізації їх спеціальних властивостей є, у першу чергу, короткі строки тужавлення.

Тому метою даної роботи було дослідження впливу модифікуючих добавок, силікатного модуля гідросилікатів натрію та режимів технології на процеси структуроутворення штучного цементного каменю для ефективного управління строками тужавлення, власними деформаціями усадки та досягнення високої міцності на стиск ( $\geq 80$  МПа у нормативному віці 28 діб і  $\geq 20$  МПа через 3 години твердіння у нормальних умовах) і строків початку тужавлення не менше 15 хв., що допускається для супершвидкотверднучих систем.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Враховуючи, що взаємодія силікатів кальцію клінкера з лужними компонентами у вигляді розчинних силікатів натрію характеризується активною коагуляцією [8], виникає необхідність пошуку і використання модифікуючих добавок з уповільнюючим ефектом, стійких до дії високолужного середовища. Авторами [9, 10] у якості уповільнювачів тужавлення запропоновано використання добавки KF. Показано, що ефективність добавки підвищується по мірі зростання силікатного модуля розчинного скла і зменшенню його середньої густини. Але широкому використанню добавки KF перешкоджає її відносно висока ціна і токсичність. Відомі спроби регулювання строків тужавлення в'язучих систем на основі клінкерних цементів, шлаків та високомодульних стекел введенням добавки тринатрйфосфату натрію (далі по тексту ТНФ) до розчинного скла [11]. Але через відносно невисоку розчинність ТНФ і високу хімічну активність шлаколужних цементів тієї кількості ТНФ, що розчинялась, було не завжди достатньо для забезпечення технологічно прийнятних строків тужавлення.

Триатомний поліол (гліцерин) застосовувався як модифікатор гідрату силікату натрію у якості, так званої, зшиваючої добавки для ксерогелевих структур гідрату силікату натрію з підвищеною міцністю і водостійкістю. Крім того, відомо, що гліцерин прискорює гідратацію шлаку у присутності гідрату силікату натрію з утворенням додаткових структурних швів у цементному камені [12]. Це визначає підвищену міцність цементної матриці при згинальних навантаженнях. Застосування гліцерину як модифікатора дозволило запропонувати систему "шлак – гідрат силікату натрію – гліцерин" для розчинів та бетонів, призначених для швидкого відновлення різних бетонних поверхонь [12]. Проте автори не розглядали вплив цього модифікатора на структуроутворення лужно-активованих цементів, а лише констатували високі експлуатаційні властивості розчинів та бетонів на їх основі.

Використання інших традиційних добавок-уповільнювачів тужавлення – етилсиліконату натрію, ЛСТ, УПБ, ГКЖ, бурі, кератину, етилгідридсеквіоксану та ін. [13] малоефективне або зовсім неефективне через високу лужність середовища лужно-активованих цементів. Утворення захисних адсорбційних плівок та оболонок на поверхні частинок цементу у таких умовах неможливе. Зниження ефективності добавок викликане ще й природою аніонної складової лужного компоненту. Збільшення силікатного модуля скла викликає збільшення концентрації груп  $\text{SiO}_3^{2-}$  у розчині, що визначає збільшення концентрації протонів  $\text{H}^+$  [14], а це веде до значної зміни структури добавок. Таким чином, варіант використання високомодульних розчинних стекел як лужного компонента є найбільш проблематичним з точки зору термінів тужавлення. Тому розробка ефективних методів регулювання термінами тужавлення лужно-активованих цементів на основі високомодульних розчинних стекел залишається задачею актуальною.

**Мета та завдання роботи** – дослідження процесів структуроутворення і визначення шляхів направленої керування ними для підвищення ранньої міцності шлаколузних цементів, активованих силікатами натрію.

Виходячи з аналізу літературних джерел і теоретичних передумов, мета дослідження полягала у підвищенні ранньої міцності шлаколузних цементів, що може бути реалізовано при використанні силікатів натрію, але за умови вирішення задач направленої процесу структуроутворення та ефективного управління термінами тужавлення таких в'язучих систем.

**Матеріали та методики досліджень.** Як алюмосилікатний компонент використовували мелені гранульовані доменні шлаки різного хімічного складу. Характеристики шлаків представлені у табл. 1. Питома поверхня шлаків становила 4420...4500 см<sup>2</sup>/г за Блейном.

Таблиця 1 – Характеристика шлаку, використаного у дослідженнях

Шлак	Вміст оксидів, % мас.							в.п.п.	M <sub>o</sub>
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O		
Шлак №1	32,13	11,48	50,27	1,14	0,4	1,8	0,77	1,30	1,18
Шлак №2	37,5	9,52	34,9	11,2	2,2	0,66	–	2,51	1,01

Як лужні компоненти використовувалися розчинні високомодульні силікати натрію (M<sub>c</sub>=2,6 і M<sub>c</sub>=3,0 з p = 1,4 г/мл) та розчин метасилікату натрію з p = 1,25 г/мл.

Відповідно до [14-17], сіль Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O (тринаїтрийфосфат – далі за текстом ТНФ) була використана як модифікатор для підвищення стійкості натрієвих гідратів силікату 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 [18], які визначались за методом EN 196-3. Цю сіль попередньо розчиняли у розчині високомодульного силікату натрію у кількості 10% від маси скла з подальшим доведенням отриманого однорідного розчину до середньої густини 1,4 г/мл.

За результатами попередніх досліджень модифікуючим агентом була обрана добавка гліцерину, яка здатна підсилювати дію ТНФ у напрямку управління термінами тужавлення та впливати на структуроутворення цементного каменю. З іншого боку, так як гліцерин, це поліфункціональна органічна сполука, яка здатна зв'язувати поверхневі групи кремнекисневих олігомерів за допомогою водневих зв'язків шляхом зшивки молекул кремнієвої кислоти, тому за рахунок цього він здатний принагідно також покращувати міцність на згин та еластичність затверділого бетону [19]. Добавка гліцерину вводилася у розчин розчинного скла, що містить ТНФ, і перемішувалась з ним. Отриманою сумішшю замішували цементи.

Портландцемент ПЦ І-500 (СЕМ І 42,5) використовувався як модифікуючи добавка для регулювання швидкості набору міцності шлаколузних цементів.

Приготування тіста та цементно-піщаних розчинів здійснювали у стандартному змішувачі типу Хобарт. Як дрібний заповнювач у цементно-піщаних розчинах використовували стандартний пісок Гусарівського родовища.

Міцність цементів визначали відповідно до EN 196-1 на зразках-балочках складу 1:3 (цемент : пісок) розміром 4×4×16 см. Відношення об'єму розчинного силікату до маси цементу (далі Р/Ц) при приготуванні цементно-піщаних розчинів підбирали експериментально, щоб величина діаметру розпливу, виміряна на стандартному струшуючому столику, становила 106...115 мм.

Умови затвердіння зразків для визначення міцності були наступними: після виготовлення та до 3 діб – відносна вологість φ = 95...100%, t = 20±2°C. А після 3 діб і до моменту випробувань зразки витримувалися у воді.

Дослідження мікроструктури цементного каменю виконувалося за допомогою растрового скануючого електронного мікроскопа PEMA 102-02.

Калориметрія гідратації у поєднанні з кінетикою твердіння цементу дозволяє достатньою мірою охарактеризувати початкові процеси структуроутворення з точки зору простоти виробництва та застосування, міцності, напружено-деформованого стану розчинів та бетонів [20-25]. Тепловиділення гідратованих цементних композицій визначалося напівдіабатичним (термосним) методом відповідно до ДСТУ Б В.2.7-289:2011 (EN 196-9:2010, MOD) за допомогою калориметра власної конструкції, принципова схема якого представлена на рис. 1.

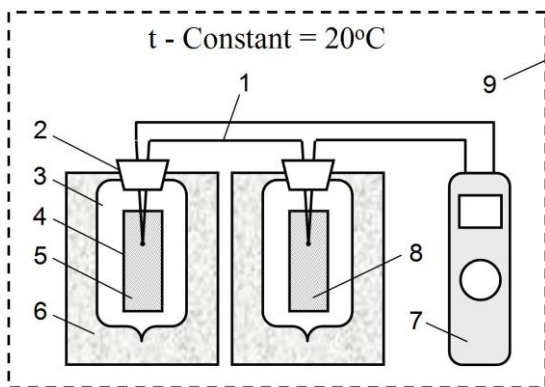


Рис. 1. Схема установки для визначення теплоти гідратації цементу термосним методом:  
 1 – диференціальна термопара; 2 – пробка;  
 3 – посудина Дюара; 4 – посудина для цементного тіста або розчину; 5 – цементне тісто або цементно-піщаний розчин; 6 – теплоізоляція;  
 7 – прилад для електронного запису показників із заданою періодичністю; 8 – модель цементного тіста; 9 – замкнутий об'єм (термостат) з термостабілізованою температурою

Власні деформації усадки вимірювали відповідно до методу, описаного в [26]. Зразки складу 1:3 (цемент: пісок) нормальної консистенції залишали тверднути у формах на 48 год., а потім ще на 5 діб. у воді. Базовий (нульовий) замір фіксувався на 8 добу. Після цього зразки зберігалися в ексикаторі до моменту випробувань над перенасиченим розчином поташу, який забезпечував відносну вологість близько 65% при  $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Для визначення водостійкості було випробувано два комплекти зразків лужно-активованих цементів віком 28 днів. Перший комплект твердів у нормальних умовах ( $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $W = 95 \pm 5\%$ ), а потім визначали міцність на стиск. Другий комплект був попередньо насичений водою. Коефіцієнт водостійкості визначали як відношення середньої міцності водонасичених зразків до зразків нормального твердіння.

**Результати досліджень.** *Строки тужавлення шлаколужних цементів.* На першому етапі було досліджено вплив модифікуючих добавок і силікатного модуля силікатів натрію на строки тужавлення та технологічні й фізико-механічні характеристики зразків з цементного тіста нормальної густини. Прийняті для проведення досліджень цементні композиції та їх характеристики наведені у табл. 2.

Як видно з табл. 2, збільшення модуля скла, за умови регулювання строків тужавлення до прийнятних значень, веде до зростання ранньої початкової міцності цементного каменю. І якщо склади на метасилікаті натрію особливо не потребують регулювання строків тужавлення – початок тужавлення 25...39 хв. (склади 1...5), то склади на високомодульних стеклах з  $M_c = 2,6...3,0$  без добавки ТНФ до використання практично непридатні – початок тужавлення складає 3...5 хв. Добавка ТНФ дозволяє отримати строки початку тужавлення у межах 17...28 хв. (склади 6, 9, 11, 16), а додаткове введення гліцерину дозволяє розширити цей діапазон до 28...83 хв. (склади 7, 8, 10, 12, 13, 17).

Введення підвищеної кількості гліцерину до 6% (склад 14) дозволяє збільшити строки початку тужавлення з 32 хв. до 83 хв., але призводить до суттєвого зменшення швидкості набору міцності у ранні строки (табл. 2, поз. 14 і 15), хоча на 28 добу міцність таких композицій вирівнюється і навіть дещо перевищує міцність композицій без добавки гліцерину.

Як видно з табл. 2, збільшення модуля скла з  $M_c = 1$  до  $M_c = 2,6...3$ , за умови регулювання строків тужавлення до прийнятних значень, веде до зростання ранньої початкової міцності цементного каменю.

Введення добавки портландцементу ПЦ I-500 у кількості 1,5...3% дозволяє компенсувати деяке падіння міцності у ранні строки при введенні добавки гліцерину.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні характеристики цементних паст

№ з/п	Склад цементної композиції, % мас.					ТНГ, %	Технологічні та фізико-механічні характеристики (зразки розміром 2×2×2 см з ТНГ)						
	шлак		добавки, %				строки тужавлення, хв.		міцність на стиск, МПа, через				
	тип	кількість	гліцерин	ЛСТ	ПЦ		поч.	кін.	3 год.	1 добу	3 доби	7 діб	28 діб
Лужний компонент – розчин матасилікату натрію, $M_c = 1$ , $\rho = 1,25$ г/мл													
1	№1	100	–	–	–	19,1	28	44	4,7	33,7	55,1	76,3	91,3
2		100	–	0,5	–	19,0	30	39	5,1	32,0	58,8	76,7	96,6
3		100	–	0,5	1,5	19,5	25	30	15,9	48,8	66,3	82,9	98,8
4	№2	100	–	–	–	19,0	39	54	2,9	12,6	33,6	58,9	82,1
5		100	–	0,5	3,0	19,2	35	40	4,8	32,4	48,1	68,0	93,7
Лужний компонент – розчинне скло з добавкою 10% ТНФ, $M_c = 2,6$ , $\rho = 1,4$ г/мл													
6	№1	100	–	–	–	27,0	17	20	22,5	36,5	56,9	71,5	88,1
7		100	2	–	–	26,8	28	31	16,9	30,1	46,4	78,8	103,3
8		100	2	–	1,5	28,0	26	29	19,7	34,1	48,4	80,8	107,3
9	№2	100	–	–	–	27,0	24	31	6,8	10,5	35,2	60,6	87,1
10		100	2	–	3,0	28,0	37	49	9,5	27,1	46,0	73,6	101,2
Лужний компонент – розчинне скло з добавкою 10% ТНФ, $M_c = 3,0$ , $\rho = 1,4$ г/мл													
11	№1	100	–	–	–	27,0	19	23	20,3	38,5	59,4	75,2	89,4
12		100	2	–	–	26,9	32	37	16,7	29,8	47,8	79,4	106,3
13		100	2	–	1,5	28,1	30	35	18,7	34,3	49,8	80,4	111,3
14		100	6	–	–	26,5	83	110	–	12,5	35,9	55,6	90,1
15		100	6	–	1,5	26,3	72	81	6,3	20,3	44,0	66,1	96,8
16	№2	100	–	–	–	27,3	28	35	6,5	10,0	35,1	60,0	86,2
17		100	2	–	3,0	28,5	44	56	9,0	26,8	45,5	73,1	109,1

Примітки:

1. Шлак №1 –  $M_o = 1,18$ ; шлак №2 –  $M_o = 1,01$ .
2. Добавки дозувалися понад 100%.
3. Початок тужавлення складів № 6, 11 при використанні розчинного високомодульного скла з  $M_c = 2,6$  і  $M_c = 3,0$  без будь яких добавок складає 3...5 хв.
4. ЛСТ – лігносульфонат технічний натрієвий, ПЦ – портландцемент ПЦ I-500.

Зменшення  $M_o$  шлаку призводить до зниження міцності на усіх етапах твердіння і в усіх складах, але при цьому зростають строки початку тужавлення композицій.

Далі була перевірена дія комплексної добавки "ТНФ + гліцерин" на строки тужавлення. Результати представлені на рис. 2, з якого видно, що тільки гліцерин, навіть у доволі значній кількості, мало впливає на збільшення терміни тужавлення – вони короткі. Дещо кращі результати з розчинним склом, яке містить добавку тринатрійфосфату. І тільки комплексна добавка "гліцерин + ТНФ", як регулятор термінів тужавлення, діє більш результативно, очевидно за рахунок синергетичного ефекту. У даному випадку використовувалися два розчини розчинного скла з середньою густиною 1,4 г/мл і  $M_c=3,0$  із вмістом в них 5% і 10% тринатрійфосфату, до яких додавався гліцерин у різних співвідношеннях.

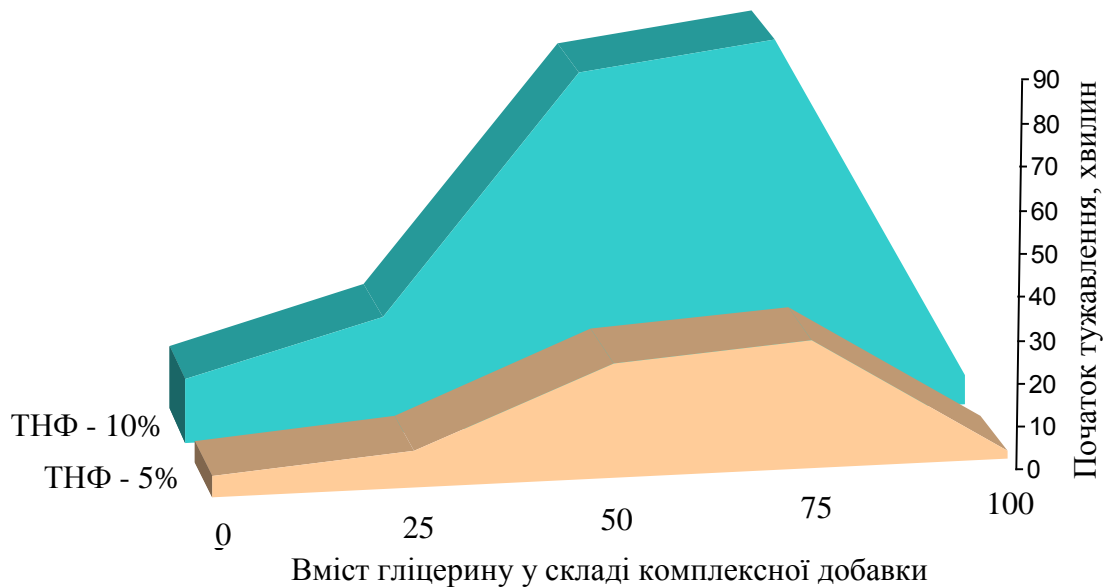


Рис. 2. Вплив складу комплексної добавки "ТНФ + гліцерин" на строки тужавлення лужного портландцементу на основі розчинного високомодульного скла ( $\rho=1,4$  г/мл,  $M_c=3,0$ )

Таким чином, результатом, який забезпечує строки початку тужавлення 25...30 хвилин є співвідношення "гліцерин : ТНФ" як 1:3 з вмістом у розчинному склі 10% ТНФ (рис. 2).

*Тепловиділення.* Відомо [26, 27], що калориметрія процесів гідратації та тверднення цементних систем, знаходиться у тісному взаємозв'язку з кінетикою процесів їх структуроутворення. Це послужило основою вибору даного методу у дослідженнях, як одного з найбільш розповсюджених та достовірних прийомів визначення впливу добавок-модифікаторів на початкові процеси структуроутворення.

Результати проведених досліджень представлені на рис. 3.

Аналіз процесів твердіння та набору міцності базових цементних композицій №6 і №11 (без органічних модифікаторів) показує наявність невеликих теплових ефектів одразу після отримання паст, які характерні для змочування шлакових зерен і початку їх гідратації.

Характер тепловиділення композицій на основі скла з  $M_c = 2,6$  і  $M_c = 3,0$  якісно практично однаковий (комп. №6 і №11). Кількісно тепловиділення складу №11 дещо нижче. Це вірогідно пов'язано з підвищеним ступенем заполімеризованості кремнію у склі з  $M_c=3,0$  та пониженням його активності, що забезпечує уповільнення початку тужавлення такої композиції, яке при використанні розчинного скла з  $M_c=3,0$  починається через 20 хв. у порівнянні з 17 хв. для композиції на розчинному склі з  $M_c=2,6$ .

Аналіз процесів твердіння та набору міцності базових цементних композицій №6 і №11 (без органічних модифікаторів) показує наявність невеликих теплових ефектів одразу після отримання паст, які характерні для змочування шлакових зерен і початку їх гідратації.

Відмічено, що для композиції №11 з використанням рідкого скла з підвищеним силікатним модулем ( $M_c=3,0$ ) у порівнянні з композицією №6 (рідке скло з  $M_c=2,6$ ) має місце деякий індукційний період перед початком тужавлення та формування основних початкових гідратних структур. Це вірогідно пов'язано з підвищеним ступенем заполімеризованості кремнію у склі з  $M_c=3,0$  та пониженням його активності, що забезпечує уповільнення початку тужавлення такої композиції, який при використанні розчинного скла з  $M_c=3,0$  починається через 19 хв. у порівнянні з 17 хв. для композиції на рідкому склі з  $M_c=2,6$ .

Подальший розвиток структуроутворюючих процесів таких композицій практично однаковий до проявлення основного екзо ефекту (через 5...7 год.) з деяким відставанням у часі для композиції на рідкому склі з  $M_c=3,0$ .

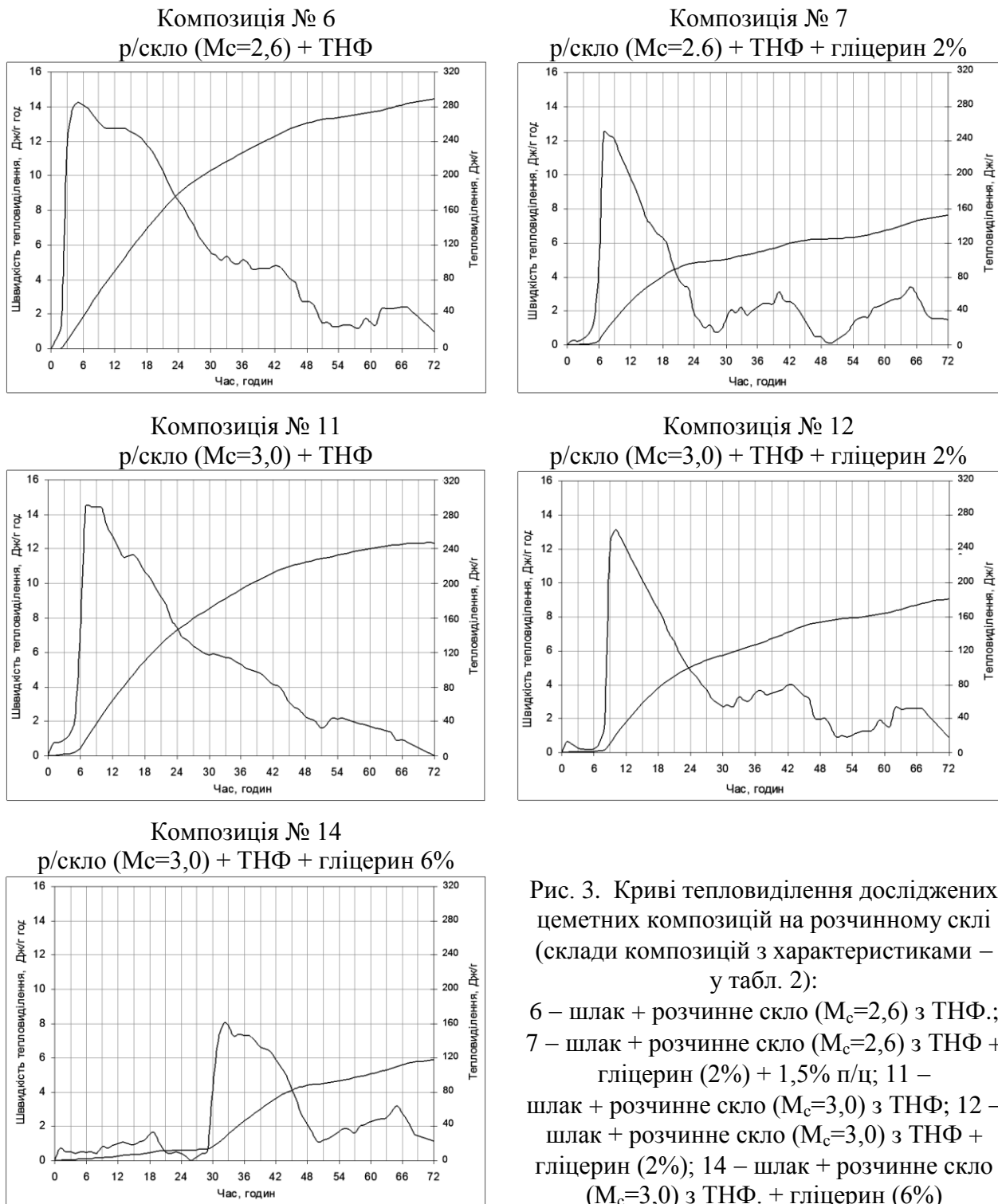


Рис. 3. Криві тепловиділення досліджених цементних композицій на розчинному склі (склади композицій з характеристиками – у табл. 2):

6 – шлак + розчинне скло ( $M_c=2,6$ ) з ТНФ.;  
 7 – шлак + розчинне скло ( $M_c=2,6$ ) з ТНФ + гліцерин (2%) + 1,5% п/ц; 11 –  
 шлак + розчинне скло ( $M_c=3,0$ ) з ТНФ; 12 –  
 шлак + розчинне скло ( $M_c=3,0$ ) з ТНФ + гліцерин (2%); 14 – шлак + розчинне скло ( $M_c=3,0$ ) з ТНФ. + гліцерин (6%)

Після досягнення максимуму тепловиділення його зниження при використанні скла з  $M_c=3,0$  носить більше крутий характер, що позначає інтенсифікацію процесів упорядкування структуроутворюючих сполук та формування структур підвищеної міцності, як на 1 добу твердіння, так і послідовного відносного її нарощування. При цьому цементна композиція на склі з  $M_c=2,6$  за 3 добу твердіння характеризується максимальним значенням питомого тепловиділення 288 Дж/г у порівнянні з цементом на рідкому склі з  $M_c=3,0$ , характеристика якого позначена значенням 244 Дж/г. Це вірогідно пов'язано з наявністю у склі з  $M_c=3,0$  підвищеного вмісту кремнекисневих структур зі ступенем зв'язаності  $Q^4$ , які не приймають участі у реакціях структуроутворення, а являють собою самостійні полімерні структури цементного каменя.

Введення в якості модифікатора гліцерину сприяє деякій пластифікації цементних паст (склади №7 та №12), а також уповільненню початку тужавлення до 28 хв. та 32 хв. відповідно при використанні скла з  $M_c=2,6$  та  $M_c=3,0$ . Це узгоджується з наявністю відповідних індукційних періодів на початкових стадіях гідратації цементних композицій зі зміною швидкості (зсув у часі) та характеру розвитку теплових ефектів (рис. 3). Це може бути пояснене дисоційованим станом кремнієвої кислоти на початковому етапі структуроутворення у присутності гліцерину, і полімеризацією кремнекисневих аніонів пізніше у період агломерації гідратів силікатів кальцію.

Подальший розвиток формування міцності розглянутих композицій супроводжується різким підвищенням інтенсивності її прирощення з досягненням у віці 7 діб міцності при стиску 78,8...79,4 МПа, а у віці 28 діб – 103,3...106,3 МПа (табл. 2, склади №7 та №12).

Цікавим є результат уведення до цементної композиції на розчинному склі з  $M_c=3,0$  підвищеної кількості гліцерину (табл. 2, склад №14). Це забезпечує уповільнення строків початку тужавлення до 83 хв. Однак це супроводжується також і зниженням інтенсивності набору міцності штучного каменя з досягненням на 1-у добу значення  $R_{ct} = 12,5$  МПа. Відмічено, що для даної композиції має місце інтенсифікація розвитку міцності після 7 доби, що супроводжується досягненням на 28-у добу міцності при стиску 90,1 МПа. Тобто, цей показник дещо перевищує міцність штучного каменя на цементі без добавки гліцерину.

З розвитку тепловиділення цієї твердіючої композиції (рис. 3, склад №14) видно, що до 1-ї доби воно характеризується незначними коливаннями теплових ефектів. Максимальна швидкість процесу формування початкової структури зміщується до 32 год., а загальне питоме тепловиділення за 3 доби характеризується значенням 119,6 Дж/г.

Термокінетичні процеси при гідратації лужно-активованих цементів добре кореспондуються із властивостями розчинів на цих цементах (табл. 3). Так, модифікатори дещо знижують показники ранньої міцності (3 години) цементного каменя, але через 7 діб міцність різко зростає і до 28 діб стає близькою або вищою, ніж у еталонного складу. Дуже важливо, що межа міцності при згині розчинів на основі модифікованих лужно-активованих цементів у всіх випадках перевищувала значення контрольних складів, що опосередковано вказує на підвищення тріщиностійкості таких складів.

*Мікроструктура.* У розвиток зазначених процесів початкового структуроутворення та синтезу міцності розглянуті особливості формування мікроструктури таких композицій за допомогою електронного мікроскопу після 28 діб твердіння у нормальних умовах. Мікроструктура штучних каменів, досліджених цементних композицій з використанням розчинних стекел з  $M_c=2,6$  та  $M_c=3,0$ , показана на рис. 4.

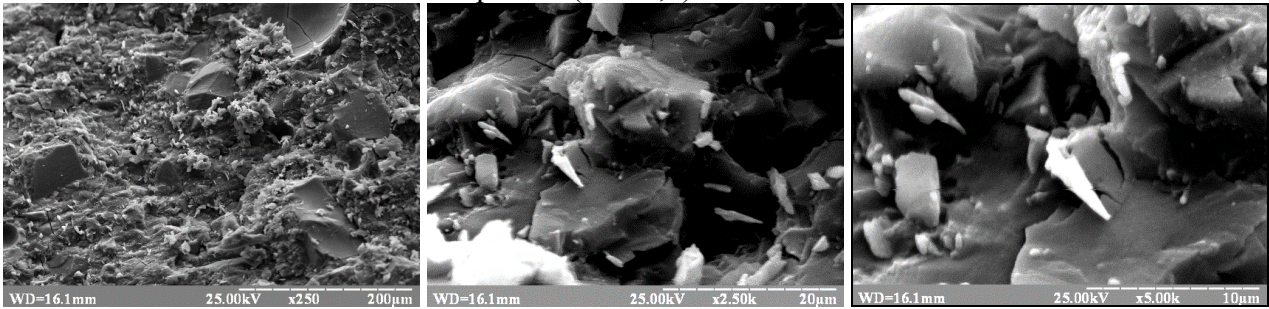
З наведених мікрознімків структури штучних каменів на цементних композиціях з використання розчинного скла з  $M_c=2,6$  можна зробити висновки, що на відміну від базових композицій без добавки гліцерину (рис. 4, композиція №6) введення гліцерину у кількості 2% (рис. 4, композиція №7) сприяє підвищенню об'єму структуроутворюючих гідратних фаз, які відкладаються на основній склоподібній матриці у вигляді субмікрокристалічних сполук сферолітної форми, які об'єднуються у агломерати та блоки-агрегати.

Аналогічна картина спостерігається і при формуванні структур цементного каменя у композиціях з використанням розчинного скла з  $M_c=3,0$  при введенні гліцерину 2% (рис. 4, композиція №12) та особливо при використанні гліцерину у кількості 6% (рис. 4, композиція №14).

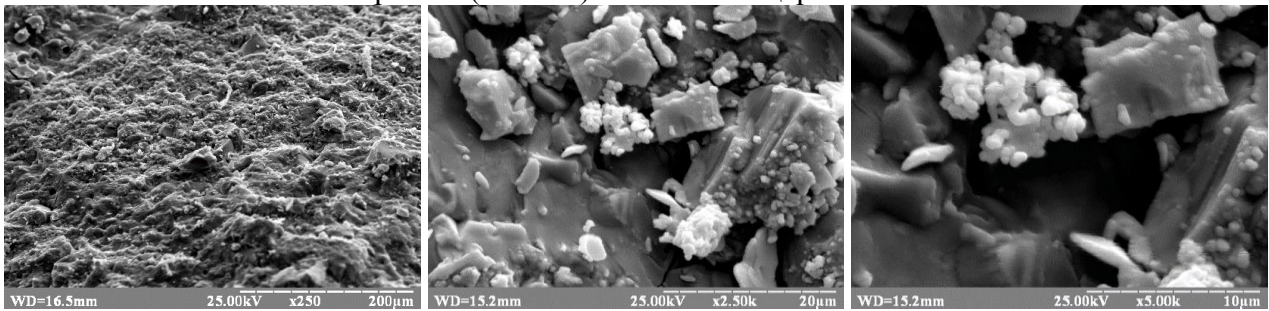
Вивчення мікроструктури лужно-активованого цементного каменя підтверджує наведені вище результати та показує перевагу модифікованого лужно-активованого цементу у порівнянні з еталонним складом. Така мікроструктура позитивно впливає на тріщиностійкість дрібнозернистого бетону, а значення усадки нижчі (рис. 5).



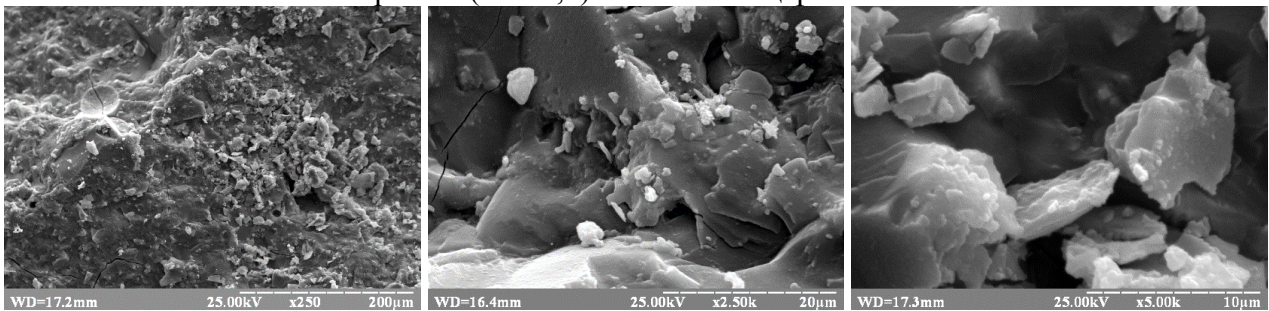
Композиція №6  
р/скло ( $M_c=2,6$ ) + ТНФ



Композиція №7  
р/скло ( $M_c=2,6$ ) + ТНФ + гліцерин 2%



Композиція №12  
р/скло ( $M_c=3,0$ ) + ТНФ + гліцерин 2%



Композиція №14  
р/скло ( $M_c=3,0$ ) + ТНФ + гліцерин 6%

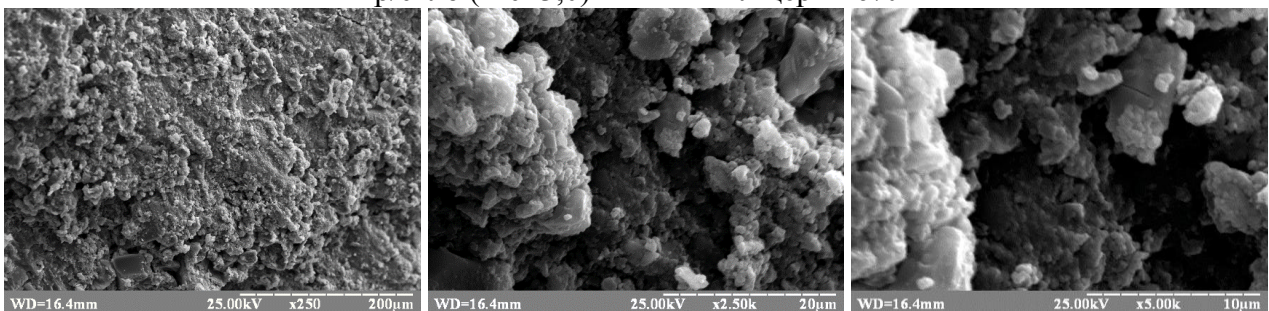


Рис. 4. Мікроструктура цементного каменя з використанням розчинного високомодульного скла:

6 – шлак + розчинне скло ( $M_c=2,6$ ) з ТНФ.; 7 – шлак + розчинне скло ( $M_c=2,6$ ) з ТНФ. + гліцерин (2%); 12 – шлак + розчинне скло ( $M_c=3,0$ ) з ТНФ + гліцерин (2%); 14 – шлак + розчинне скло ( $M_c=3,0$ ) з ТНФ + гліцерин (6%)

*Власні деформації усадки.* На рис. 5 добре видно, що введення запропонованих модифікаторів дозволило знизити деформації удвічі і більше. Більш високі співвідношення між міцністю на вигин і міцністю на стиск, ніж у еталонних зразків, вказують на більш високу тріщиностійкість модифікованих лужно-активованих розчинів (табл. 3).

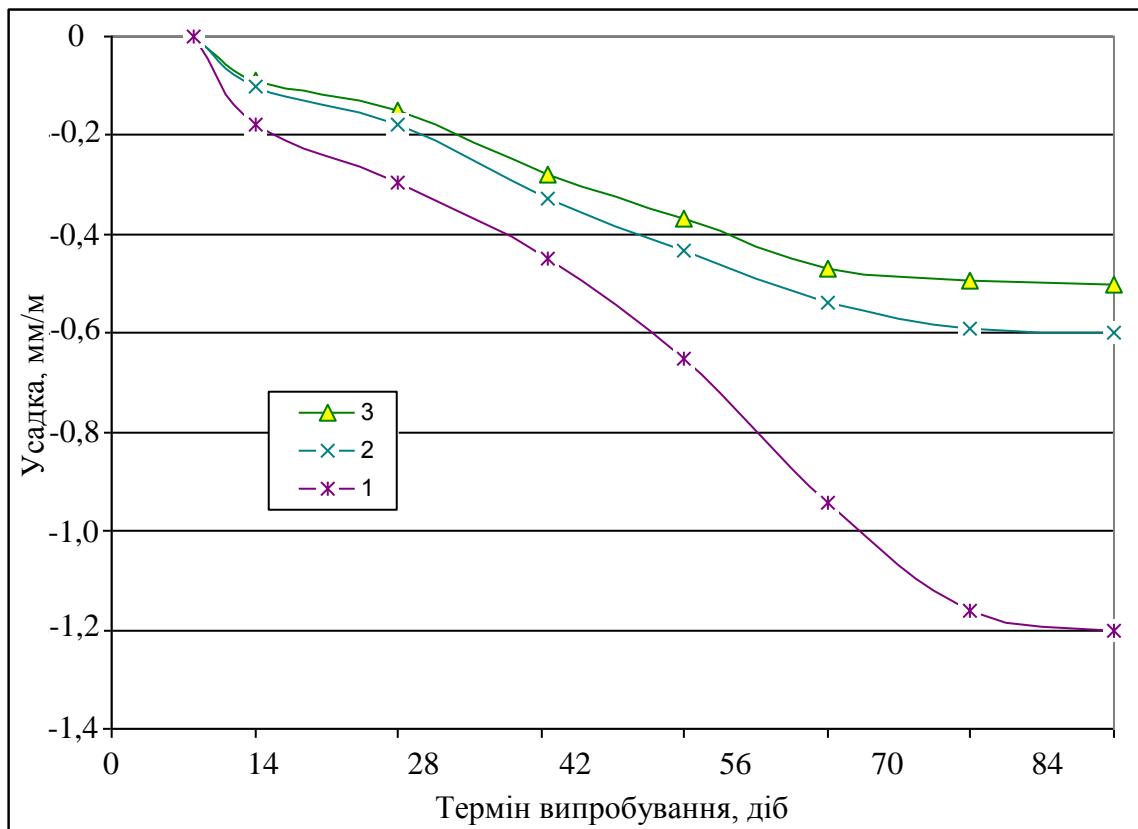


Рис. 5. Власні деформації усадки дрібнозернистих бетонів на лужно-активованих цементах: 1 – шлак; 2 – шлак + гліцерин (2,0%); 3 – шлак + гліцерин (2,0%) + ПЦ (1,5%);  
Замішувач – розчинне скло,  $M_c = 2,6$ ,  $\rho = 1,4$  г/мл, вміст добавки ТНФ у розчинному склі 10% від маси скла. Склади композицій – у табл. 3

*Визначення фізико-механічних характеристик шлаколуужних цементів, активованих високомодульним розчинним склом.* Не дивлячись на отримані достатньо високі фізико-механічні характеристики у стандартні строки твердіння – міцність на стиск через 28 дб 82,1...98,8 МПа (табл. 2, склади 1...5), недоліком використання метасилікату натрію є те, що він нездатний забезпечувати високу ранню міцність шлаколуужних композицій через декілька годин. Тому подальші дослідження по визначенню основних технологічних і фізико-механічних характеристик шлаколуужних цементів виконувалися з використанням високомодульного розчинного натрієвого скла. Результати представлені у табл. 3.

Як видно з табл. 3, у присутності добавки ТНФ у розчинному склі строки початку тужавлення складають 17 хв., а міцність через 3 години – 23,1 МПа.

Введення 2% добавки гліцерину дозволило розтягнути строки тужавлення до 32 хв., але знизило початкову міцність через 3 години – до 16,7 МПа.

Введення наряду з 2% гліцерину 1,5% портландцементу дозволяє компенсувати втрату міцності підвищивши її до 21,4 МПа при строках початку тужавлення 28 хв.

Таблиця 3 – Фізико-механічні та технологічні властивості цементно-піщаних розчинів

№ з/п	Цементна композиція, % мас.			Властивості				Міцність на стиск/згин, МПа					Коеф. водостійкості
				цементного тіста		цементно-піщаних розчинів							
	шлак	ПЦ	гліцерин	ТНФ, %	початок тужав. хв.	Р/Ц	розплив конуса мм	3 години	1 доба	3 доби	7 діб	28 діб	
1	100	–	–	28	17	0,39	115	<u>23,1</u> 3,8	<u>36,5</u> 5,2	<u>57,0</u> 6,9	<u>71,0</u> 8,9	<u>86,2</u> 9,5	0,89
2	100	–	2,0	27,5	32	0,38	116	<u>16,7</u> 4,0	<u>34,1</u> 5,5	<u>51,0</u> 7,1	<u>80,3</u> 9,2	<u>114,0</u> 13,8	0,92
3	97,5	1,5	2,0	28	28	0,4	118	<u>21,4</u> 3,9	<u>38,2</u> 6,9	<u>58,6</u> 7,3	<u>82,2</u> 9,8	<u>117,1</u> 13,9	0,95

Примітки:

1. Шлак №1 –  $M_o = 1,18$ .
2. Склад цементно-піщаних розчинів 1:3 з використанням стандартного піску.
3. Замішувач – розчинне скло,  $M_c = 2,6$ ,  $p=1,4$  г/мл, вміст добавки ТНФ у розчинному склі 10% від маси скла. ПЦ – портландцемент ПЦ І-500. Гліцерин дозувався понад 100%.

Коефіцієнт водостійкості усіх композицій дорівнював 0,89...0,95. Тобто вони водостійкі.

Таким чином, використання високомодульного скла дозволяє отримувати надшвидкотверднучі композиції з міцністю на стиск через 3 години 16,7...23,1 МПа, через 1 добу – 34,1...38,2 МПа, через 3 доби – 51,0...58,6 МПа, а через 28 діб – 86,2...117,1 МПа (табл. 3, склади 1...3) при прийнятних строках початку тужавлення.

### Висновки:

1. Досліджено процеси структуроутворення шлаколуужних цементів, активованих силікатами натрію, та визначено шляхи керування їх інтенсивністю за рахунок використання комплексної добавки "ТНФ + гліцерин" при різних співвідношеннях інгредієнтів.

2. Показано, що використання комплексної добавки "ТНФ + гліцерин" дозволяє розширити початок тужавлення до стандартних значень і отримати цемент з міцністю на стиск через 3 години 16,7...23,1 МПа, через 1 добу 34,1...38,2 МПа, через 28 діб 86,2...117,1 МПа.

3. Встановлено позитивний синергетичний ефект від використання гліцерину в складі комплексної добавки на формування структури і властивостей цементного каменю, який має прояв у пластифікуючому ефекті дії (зменшення Р/Ц на 4...21 %) та підвищенні міцності на стиск штучного каменю до 24,5 %, зменшенні в 2...2,4 рази власних деформацій.

4. Показано, що присутність гліцерину в складі комплексної добавки сприяє підвищенню об'єму структуроутворюючих гідратних фаз у вигляді субмікросталічних сполук сферолітної форми, які об'єднуються у блок-агрегати.

**Подяка.** Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проектів (реєстраційний № 0123U101832 та № 0123U101831), які виконуються за рахунок бюджетного фінансування у 2023...2025 рр.

## Література

1. Wang S.-D., Scrivener K.L. Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement and Concrete Research*. 1995. 25 (3). P. 561-571. doi: 10.1016/0008-8846(95)00045-E.
2. 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"*. 2009. 18. P. 64-71.
3. Krivenko P. Alkali-Activated Materials – 55 Years of Experience. *Proc. of the International Conference on Alkali-Activated Cement and Concretes*. 2014. P. 1-5.
4. Shi C., Krivenko P. V., Della Roy Alkaline activated cements and concretes (in Chinese, Authorized translation from English) : Monograph. Taylor & Francis. 2012. 326 p.
5. Fernández-Jiménez A., Garcia-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*. 2019. 102(1). P. 427-436.
6. Krivenko P., Petropavlovsky O., Kovalchuk O., Pasko A., Lapovska S. Design of the composition of alkali activated Portland cement using mineral additives of technogenic origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 4/6 (94). P. 6-15.
7. Krivenko P. V., Petropavlovsky O. N., Gots V. I., Rostovskaya G. S. Alkali activation of Composite Cement. *Ibausil. Internationale Baustofftagung*. 2009. 1. P. 445-456.
8. Айлер Р. Химия кремнезема. Часть 1. М. : Мир, 1982. С. 184-186.
9. Blazhis A.R., Rostovskaya G.S. Super quick hardening high strength alkaline clinker and clinker-free cements. *Alkaline cements and concretes. First Int. Conf.* Kiev. 1994. vol.I. P. 193-302.
10. 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)*. 2010. Jinan, Shandong, China. P. 79-86.
11. Shi C., Day R.L. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*. 1995. 25 (6). P. 1333-1346. doi: 10.1016/0008-8846(95)00126-W.
12. Krivenko P., Petropavlovsky O., Gelevera A., Vozniuk G., Lakusta S. The influence of organic-mineral modifiers on structure formation and properties of high strength alkali-activated slag cements with soluble silicates. *Building materials and products*. 2016. No.4. P. 38-43.
13. Чехов А.П., Сергеев А.М., Дибров Г.Д. Справочник по бетонам и растворам. Киев : Будівельник, 1983. 216 с.
14. Chang J.J. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. P. 1005-1011. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01096-7.
15. Pacheco-Torgal F., Barroso de Aguirre J., Ding Y., Tahri W., 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.
16. 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. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.44.
17. 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 Ibausil Internationale Baustofftagung*. Weimar, Tagungsbericht. 2012. Band 2. P. 1-1178-1-1185.
18. Pavel V. Krivenko, Oleh Petropavlovskiy, Igor Rudenko, Sergei Lakusta Control of early age cracking 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 (EAC2)*. At: Brussels, Belgium. 2017. Volume: 2. URL: <https://www.researchgate.net/publication/320306250> .
19. Kudina E.F., Pechersky G.G., Ermolovich O.A. Study on the process of gel formation in the “water glass-acrylamide” systems. *J. Plasticheskie massy (Plastic Masses)*. 2012. v.1. P. 27-29.
20. Usherov-Marshak A. Calorimetry of cement and concrete. Kharkiv: Fakt, 2002. 183 p.



21. Usharov-Marshak A., Kabus A. Calorimetric monitoring of early hardening of cement in the presence of admixtures. *Inorganic Materials*. 2013. Vol. 49 (4), P. 449-452. doi: 10.1134/S0020168513040183.
22. Fernandez-Jimenez A., Puertas F. Alkali-activated slag cements: Kinetic studies. *Cement and Concrete Research*. 1997. 27 (3), P. 359-368. doi: 10.1016/S0008-8846(97)00040-9.
23. Fernandez-Jimenez A., Puertas F., Arteaga A. Determination of kinetic equations of alkaline activation of blast furnace slag by means of calorimetric data. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1998. 52 (3), P. 945-955. doi: 10.1023/A:1010172204297.
24. Caijun Shi, Robert L. Day Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*. 1996. 26 (3), P. 439-447. doi: 10.1016/S0008-8846(96)85031-9.
25. Christophe Eychenne, F. Puertas, Marta Palacios, Pascal Boustingorry, Imad El Khadiri, Bruno Pellerin, Celia Varga. Alkali-Activation of Slag Cements: Activation Process, Microstructure and Mechanical Properties. *Conference: 13th International Congress on the Chemistry of Cement*. 2011.
26. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. Москва : Высшая школа, 1973. С. 460-462.
27. Darko Krizan, Branislav Zivanovic Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*. 2002. 32 (8), P. 1181-1188. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00717-7.

### References

- [1] S.-D. Wang, and K.L. Scrivener, "Hydration products of alkali activated slag cement", *Cement and Concrete Research*, 25 (3), pp. 561-571, 1995. doi: 10.1016/0008-8846(95)00045-E.
- [2] P.V. Krivenko, O.N. Petropavlovsky, A.G. Gelevera, G.V. Vozniuk and V.I. Pushkar "Commercially-produced alkaline cements and their efficiency", *Scientific-Technical Collection*, *Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Structures*, no. 18, pp. 64-71, 2009.
- [3] P. Krivenko, "Alkali-Activated Materials – 55 Years of Experience", *Proc. of the International Conference on Alkali-Activated Cement and Concretes*, pp. 1-5, 2014.
- [4] C. Shi, P.V. Krivenko, and Della Roy, *Alkaline activated cements and concretes* (in Chinese, Authorized translation from English) : monograph. Taylor & Francis, 2012.
- [5] A. Fernández-Jiménez, I. García-Lodeiro, O. Maltseva and A. Palomo, "Hydration mechanisms of hybrid cements as a function of the way of addition of chemicals", *Journal of the American Ceramic Society*, 102(1), pp. 427-436, 2019.
- [6] P. Krivenko, O. Petropavlovsky, O. Kovalchuk, A. Pasko, and S. Lapovska, "Design of the composition of alkali activated Portland cement using mineral additives of technogenic origin", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/6 (94), pp. 6-15, 2018.
- [7] P.V. Krivenko, O.N. Petropavlovsky, V.I. Gots, and G.S. Rostovskaya, "Alkali activation of Composite Cement", *Ibausil. Internationale Baustofftagung*, 1, pp. 445-456, 2009.
- [8] R. Ajler, *Himija kremnezema*. Chast' 1. M.: Mir, 1982, pp.184-186.
- [9] A.R. Blazhis, and G.S. Rostovskaya, "Super quick hardening high strength alkaline clinker and clinker-free cements", *Alkaline cements and concretes. First Int. Conf.* vol. I, pp. 193-302, 1994.
- [10] P.V. Krivenko, O.N. Petropavlovsky, and A.R. Blazhis, "Super quick hardening alkali-activated cements", *First Int. Conf. on Advances of Chemically-activated Materials (CAM' 2010 – China)*, pp.79-86, 2010.
- [11] C. Shi, and R.L. Day, "A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements" *Cement and Concrete Research*, 25 (6), pp. 1333-1346, 1995. doi: 10.1016/0008-8846(95)00126-W.

- [12] P. Krivenko, O. Petropavlovsky, A. Gelevera, G. Vozniuk, and S. Lakusta, "The influence of organic-mineral modifiers on structure formation and properties of high strength alkali-activated slag cements with soluble silicates", *Building materials and products*, no.4, pp. 38-43, 2016.
- [13] A.P. Chehov, A.M. Sergeev, G.D. Dibrov, *Spravochnik po betonam i rastvoram*. Kiev: Budivel'nik, 1983.
- [14] J.J. Chang, "A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1005-1011, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01096-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01096-7).
- [15] F. Pacheco-Torgal, Barroso de Aguirre J., Y. Ding, W. Tahri, and S. Baklouti, *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.
- [16] P. Krivenko, O. Petropavlovsky, V. Petranek, V. Pushkar, and G. Vozniuk, "High strength alkali activated slag cements with controlled setting times and early strength gain", *Advanced Materials Research*, vol. 1100, pp. 44-49, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.44> .
- [17] P. Krivenko, O. Petropavlovskii, and V. Pushkar, "Methods of regulation of the properties of alkali slag cements and concretes based on the liquid-glass", *Proceedings of 18th Ibausil Internationale Baustofftagung*, Weimar, Tagungsbericht. Band 2, pp. 1-1178-1-1185, 2012.
- [18] Pavel Krivenko, Oleh Petropavlovskiy, Igor Rudenko, and Sergei Lakusta, "Control of early age cracking 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, volume: 2, 2017. <https://www.researchgate.net/publication/320306250> .
- [19] E.F. Kudina, G.G. Pechersky, and O.A. Ermolovich, "Study on the process of gel formation in the "water glass-acrylamide" systems", *J. Plasticheskie massy* (Plastic Masses), v.1, pp. 27-29, 2012.
- [20] A. Usherov-Marshak, *Calorimetry of cement and concrete*. Kharkiv: Fakt; 2002.
- [21] A. Usherov-Marshak, and A. Kabus, "Calorimetric monitoring of early hardening of cement in the presence of admixtures", *Inorganic Materials*, vol. 49 (4), pp. 449-452, 2013. doi: 10.1134/S0020168513040183.
- [22] A. Fernandez-Jimenez, and F. Puertas, "Alkali-activated slag cements: Kinetic studies", *Cement and Concrete Research*, 27 (3), pp. 359-368, 1997. doi: 10.1016/S0008-8846(97)00040-9.
- [23] A. Fernandez-Jimenez, F. Puertas, and A. Arteaga, "Determination of kinetic equations of alkaline activation of blast furnace slag by means of calorimetric data", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 52 (3), pp. 945-955, 1998. doi: 10.1023/A:1010172204297.
- [24] Shi Caijun, and L. Robert, "Day Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements", *Cement and Concrete Research*, 26 (3), pp. 439-447, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85031-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85031-9).
- [25] Christophe Eychenne, F. Puertas, Marta Palacios, Pascal Boustingorry, Imad El Khadiri, Bruno Pellerin, and Celia Varga, "Alkali-Activation of Slag Cements: Activation Process, Microstructure and Mechanical Properties", *Conference: 13th International Congress on the Chemistry of Cement*, 2011.
- [26] Ju.M. Butt, V.V. Timashev, *Praktikum po himicheskoy tehnologii vjazzhushhih sistem*. Moskva: Vysshaja shkola, 1973.
- [27] Darko Krizan, Branislav Zivanovic, "Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements", *Cement and Concrete Research*, 32 (8), pp. 1181-1188, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00717-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00717-7).

**CONTROL OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES OF SLAG-ALKALI CEMENTS  
ACTIVATED WITH SODIUM SILICATES**

<sup>1</sup>**Kryvenko P.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
pavlo.kryvenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7697-2437

<sup>1</sup>**Gelevera O.G.**, Ph.D., Associate Professor,  
a-gelevera@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6285-9780

<sup>1</sup>**Rudenko I.I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
igor.i.rudenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5716-8259

<sup>1</sup>**Konstantinovsky O.P.**, Ph.D., Associate Professor,  
alexandrkp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7936-5699

<sup>1</sup>*Kyiv National University of Construction and Architecture*  
31 Povitroflotsky Ave., Kiev, 03037, Ukraine

**Abstract.** The article discusses approaches to the formation of the composition of slag-alkali cements when using high-modulus solution glass as an alkaline component, represented by a commercial product in the form of a liquid. The aim of this work was to study the effect of modifying additives, the silicate module of sodium hydrosilicates and technology modes on the processes of structure formation of artificial cement stone for effective control of setting time, intrinsic shrinkage deformations and achievement of high compressive strength ( $\geq 80$  MPa at a standard age of 28 days and  $\geq 20$  MPa after 3 hours curing under normal conditions). As a result of the studies performed, a positive effect on the use of glycerin additives as part of a complex additive on the formation of the structure and properties of artificial stone was established. It is noted that the use of the studied modifying additives contributes to an increase in the degree of slag hydration, the formation, along with hydrosilicate compounds, of xerogel structures and celite-like compounds, which are deposited on the hydrosilicate-based matrix in the form of blocks-aggregates and increase the total volume of structure-forming compounds. A positive synergistic effect of using glycerin as an additional modifying component of the "trisodium phosphate + glycerin" complex additive for controlling the setting time in slag-alkali cements based on high-modulus solution glasses has been established. This made it possible to extend the time for the start of setting of slag-alkali cements when using solution high-modulus glasses from 3...5 min. up to values 26...83 min. Received cements with compressive strength after 3 hours 16.7...23.1 MPa, after 1 day 34.1...38.2 MPa, after 28 days 86.2...117.1 MPa with acceptable terms start of grasping. The heat release of such cements after 72 hours, despite their high activity, is only 150...180 J/h, which is 1.7...2 times less than that of fast-hardening Portland cement grade 600 and 2...2.4 alumina cement. Intrinsic shrinkage strains of compositions with modifying additives at the moment of stabilization were equal to 0.5...0.6 mm/m.

**Key words:** Structure formation, setting time, alkaline activation, water-soluble high-modulus glass, intrinsic shrinkage deformations.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2023