

**ВПЛИВ АГРЕГАТНОГО СТАНУ ЛУЖНОГО КОМПОНЕНТУ НА
ВЛАСТИВОСТІ ЛУЖНО-АКТИВОВАНИХ ЦЕМЕНТІВ**

**INFLUENCE OF THE STATE OF AGGREGATION OF THE ALKALINE
COMPONENT ON THE PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED
CEMENTS**

Кривенко П. В., д.т.н., проф., <http://orcid.org/0000-0001-7697-2437>,
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>, **Разсамакін
А. В., аспірант,** <http://orcid.org/0000-0001-5130-6059>, (Київський національний
університет будівництва і архітектури)

Krivenko P.V., Ph.D., Prof., <http://orcid.org/0000-0001-7697-2437>, **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>, (Kyiv National
University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine)

Встановлено вплив агрегатного стану лужного компонента (порошок, розчин) та модифікуючих добавок на технологічні та фізико-механічні характеристики лужно-активованих шлаковміщуючих цементів з вмістом в них клінкеру від 5 до 95%. У результаті отримано технологічно прийнятні строки початку тужавлення у межах 0–38...2–24 год–хв при використанні добавки ЛСТМ у кількості 2...4% та міцність 54...115 МПа.

The problem with the effective use of promising alkali-activated cement compositions is the short setting time. The purpose of this work was to study the influence of the aggregative state (powder, solution) of low-modulus sodium silicate, the composition of the compositions and the modifying additive on the technological and physical-mechanical properties of slag-containing alkali-activated cements. As a result of the work performed, a mechanism was developed to control the setting time in the "slag + clinker + sodium metasilicate" binder system. The dependence of the setting time and physical and mechanical characteristics of cements on the method of introducing sodium metasilicate into the "slag + clinker" system, on the composition of the cement, and on the type and amount of modifier additive. It has been shown that the introduction of sodium metasilicate into cement in the form of an aqueous

solution leads to a much greater intensification of structure-forming processes compared to the option of using metasilicate in the form of a powder with mixing with water. It has been established that an increase in the clinker content in the slag-clinker mixture leads to a significant reduction in setting time. A study of the influence of the LSTM additive showed the possibility of effectively controlling the setting time with an increased amount of use of this additive, namely up to 4%. As a result, technologically acceptable times for the onset of setting in the range of 0-38...2-24 h-min were obtained when using the LSTM additive in an amount of 2...4% and compressive strength 54...115 MPa. The results of the study of the structure formation of alkali-activated slag-containing cements confirmed the above conclusions and correspond well with the obtained technological and physical-mechanical results.

Ключові слова. Лужно-активовані шлаковміщуючі цементи, строки тужавлення, структуротворення, агрегатний стан лужного компоненту. Alkali-activated slag-containing cements, setting times, structure formation, aggregative state of the alkaline component.

Вступ. Сучасна будівельна індустрія потребує збільшення доли високоміцних і швидкотверднучих цементів у їх загальній кількості і, бажано, з хорошою екологічністю та економічністю. Це обумовлено постійним підвищенням вимог до фізико-механічних та експлуатаційних характеристик бетонів та прагненням до скорочення термінів й вартості будівництва.

Згідно з класифікацією [1], до високоміцних відносяться бетони з міцністю на стиск 50...100 МПа, надвисокоміцних – понад 100 МПа. Крім високої міцності, для будівництва необхідно щоб бетон характеризувався й іншими високими показниками, які визначають його технологічність та довговічність.

До відомих цементів, які здатні в якійсь мірі забезпечити такі вимоги, відносяться алюмінатні, сульфоалюмінатні, безгіпсові, ВНВ та інші, які характеризуються міцністю ≥ 60 МПа [2]. До їх недоліків можна віднести достатньо високу ціну і те що алюмінатний (глиноземистий) цемент не виробляється в Україні та характеризується наявністю спадів міцності, особливо при температурах вище 25°C.

Високоєфективний бетон (НРС – High Performance Concrete) відноситься до бетонів із водоцементним відношенням не вище 0,3...0,4, що забезпечує отримання міцність при стиску до 70...100 МПа через 28 діб і 5...55 МПа на першу добу твердіння [3-6]. Однак вони потребують використання дорогих добавок і модифікаторів, а також високої культури технологічного процесу з виготовлення та догляду за бетонами до початку експлуатації.

Ультрависокоміцний або недефективний бетон (UHSC або УНРС) є відносно новими матеріалами з міцністю на стиск понад 150 МПа, який також

має й інші покращені властивості [7]. До UHSC відносять бетон без макродефектів (MDF). MDF включає суміш цементу і водорозчинного полімеру, інтенсивне змішування яких викликає механо-хімічну реакцію, яка забезпечує надвисоку міцність при розтягу [8, 9], особливо при використанні глиноземистих цементів. Основним недоліком цього бетону є те, що його механічні властивості погіршуються після контакту з водою [10].

Високоперспективними з цього напрямку, як показано багатьма роботами, є лужні цементы і бетони [11, 12], що обумовлено комплексом їх спеціальних властивостей, однак потенційні властивості яких ще до кінця не визначені. З 27 цементів, перерахованих у європейському стандарті EN 197-1:2000, сім містять шлак у пропорціях від 6 до 95%. Це вже загальносвітова тенденція. До переваг шлаковмісних цементів відносяться не тільки економія енергії та менше забруднення навколишнього середовища при їх виробництві, але і їх висока механічна міцність з часом та довговічність завдяки дрібнопористій структурі. А невисока швидкість набору міцності у ранні терміни твердіння композицій з високим вмістом шлаку може компенсуватися за допомогою лужної активації [13, 14].

Цементи, 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 швидкий набір міцності і високу стандартну кінцеву міцність при збереженні високих експлуатаційних властивостей [15, 16], що обумовлено модифікуючою дією аморфного високоактивного кремнезему, присутнього у розчинному склі.

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

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Відомі спроби регулювання строків тужавлення лужно-активованих цементів використанням добавки KF [17, 18]. Але вона малоефективна при використанні розчинного скла з $M_c = 1$, дорога і токсична.

Використання добавки $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ як регулятора строків тужавлення ефективно тільки при $M_c \geq 2$ [19].

Використання інших традиційних добавок-уповільнювачів тужавлення – етилсиліконату натрію, ЛСТ, УПБ, ГКЖ, бурі, кератину, етилгідридсеквіоксану та ін. [20] у рекомендованій і регламентованій нормативними документами кількості малоефективне або зовсім неефективне через високу лужність середовища лужно-активованих цементів. Збільшення силкатного модуля скла викликає збільшення концентрації груп SiO_3^{2-} у

розчині, що визначає збільшення концентрації протонів H^+ [21], а це веде до значної зміни структури добавок і унеможливує утворення захисних адсорбційних плівок та оболонок на поверхні частинок цементу.

Таким чином, варіант використання розчинних силікатів натрію як лужного компонента, не дивлячись на високі потенційні можливості, є найбільш проблематичним з точки зору термінів тужавлення. Тому розробка ефективних методів регулювання термінів тужавлення лужно-активованих цементів на основі розчинних силікатів натрію залишається задачею актуальною.

Метою даної роботи було вирішення важливої задачі – усунення проблеми коротких строків тужавлення у системі "шлак + клінкер + метасилікат натрію" за рахунок використання традиційних добавок-уповільнювачів, але за рамками загальноприйнятого і рекомендованого їх дозування, а також встановлення впливу складу шлаковмішуючого цементу та способу введення до нього метасилікату натрію на технологічні та фізико-механічні характеристики.

Сировинні матеріали та методи досліджень. В якості алюмосилікатних компонентів лужно-активованих шлакопортландцементів використовувався портландцементний клінкер і доменний гранульований шлак. Характеристика шлаку представлена у Табл. 1. Мінералогічний склад клінкеру: C_3S – 62%, β - C_2S – 15,5%, C_3A – 7,5, C_4AF – 12%. Питома поверхня шлаку становила 4000 cm^2/g , портландцементного клінкеру – 3900 cm^2/g за Блейном.

Таблиця 1

Характеристика шлаку

Вміст оксидів, % мас.							в.п.п.	Mo
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

Основність алюмосилікатної складової в'язучої системи "шлак + клінкер" корегувалась введенням до неї портландцементного клінкеру у кількості 5, 50 і 95%.

Як лужний компонент був використаний метасилікат натрію пентагідрат ($Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$) у вигляді негігроскопічного порошку у кількості 12% і у вигляді водного розчину з $p = 1,24$ г/мл. Кількість безводної солі, яка вводилась до в'язучої композиції, у обох варіантах забезпечувалась приблизно в однаковій кількості.

В якості регулятора строків тужавлення і структуроутворення використовувалась добавка ЛСТМ (лігносульфонат технічний модифікований натрієвий – $C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$) у вигляді концентрованого розчину з $p = 1,25$ і $K = 45\%$. Кількість добавки складала 2% і 4% у перерахунку на суху речовину по відношенню до цементу.

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

Для виготовлення зразків-балочок 4×4×16 см складу 1:3 із суміші нормальної консистенції використовувався стандартний пісок Гусарівського родовища Харківської області.

Технологічні та фізико-механічні властивості шлаколужного цементу визначалися відповідно до чинних в Україні державних стандартів.

Калориметрія гідратації цементу дозволяє достатньою мірою охарактеризувати початкові процеси структуроутворення [22, 23], тому ця методика була використана у даних дослідженнях. Тепловиділення гідратованих цементних композицій визначалося напівдіабатичним (термосним) методом відповідно до ДСТУ Б В.2.7-289:2011 (EN 196-9:2010, MOD).

Контракція (як аналог аутогенної усадки) визначалась за методикою [23]. Схема установки для визначення контракції представлена на Рис. 1.

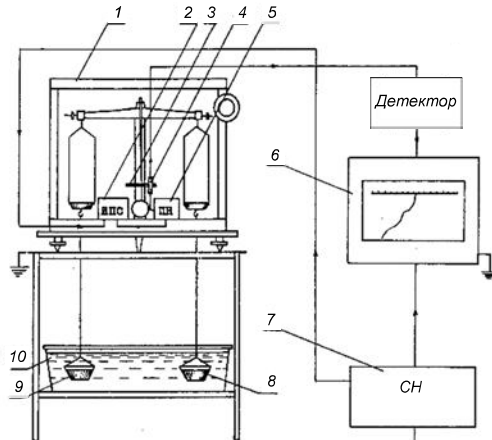


Рис.1. Блок-схема установки для дослідження контракції в'язучих речовин:

1 – аналітичні ваги; 2 – джерело постійного струму стабілізоване 5 в; 3 – феромагнітний стрижневий сердечник; 4 – котушка індуктивності на магнітопроводі з кільцевого фериту 2000НН; 5 – перетворювач постійного струму на перемінний 20 МГц; 6 – самопишучий потенціометр КСП-4; 7 – стабілізатор напруги ~ 220 в; 8 – цементне тісто; 9 – еталон; 10 – смінь з керосином

Результати досліджень. Були використані склади шлако-клинкерного цементу із вмістом в них клинкеру 5, 50 і 95%. Лужний компонент (матасилікат натрію) вводився у вигляді негігроскопічного порошку матасилікату натрію пентагідрату ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) у кількості 12% і у вигляді розчину з $\rho = 1,24 \text{ г/см}^3$.

У випадку використання метасилікату у вигляді порошку суміш "шлак + клінкер + порошок" замішувалася водою. У випадку використання розчину – шлако-клінкерна суміш замішувалася водним розчином метасилікату натрію.

Результати досліджень представлені у Табл. 2 і на Рис.2.

Таблиця 2

Вплив на строки тужавлення складу цементу і способу введення лужного компоненту

№ з/п	Склад, %		Спосіб введення лужного компоненту $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		В/Ц Р/Ц	Строки тужавлення, год.-хв.	
	шлак	клінкер	порошок	розчин		початок	кінець
1	95	5	порошок	–	0,270	1–40	2–10
2	95	5	–	розчин	0,260	0–08	0–12
3	50	50	порошок	–	0,275	0–19	0–25
4	50	50	–	розчин	0,265	0–04	0–06
5	5	95	порошок	–	0,280	0–08	0–11
6	5	95	–	розчин	0,270	0–01	–

Примітка. В/Ц – водо-цементне відношення, Р/Ц – розчино-цементне відношення.

Як видно з Табл. 2 і Рис. 2, із збільшенням вмісту клінкеру у цементі строки тужавлення скорочуються при обох варіантах введення лужного компоненту.

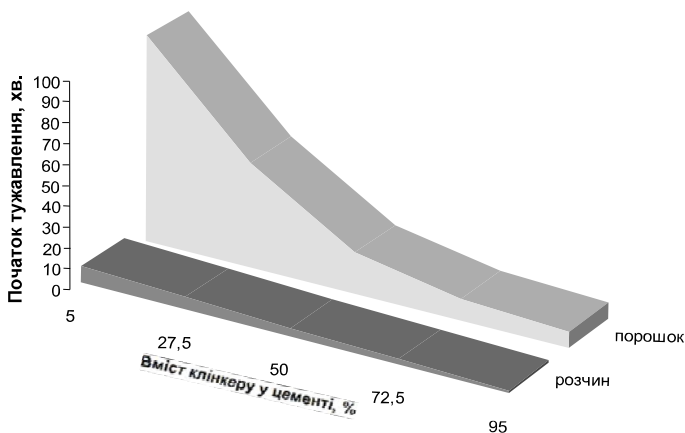


Рис.2. Вплив складу цементу і способу введення лужного компоненту (порошок, розчин) на строки тужавлення

При введенні метасилікату у вигляді порошку (Табл. 2, склади 1, 3, 5) були отримані строки початку тужавлення 100, 19 і 8 хв. при вмісті клінкеру 5, 50 і 95 % відповідно. Використання метасилікату у вигляді водного розчину скоротило ці строки до 8, 4 і 1 хв. відповідно. Таке суттєве скорочення може

бути пояснене необхідністю деякого часу для більш повного розчинення порошку метасилікату, у той час, як у вигляді розчину він вступає у реакцію увесь і одночасно й тому більш активно.

Такі короткі, у більшості випадків, строки тужавлення викликали необхідність пошуку способу їх подовження. Була використана добавка ЛСТМ, але не у рекомендованій (0,1...0,3%) кількості, а підвищеній – 2...4%. І якщо для традиційних цементів підвищення дозування навіть до 0,5...0,7% викликає різке і навіть неприйнятне зниження кінетики структуроутворення і набору міцності, то для високоактивних лужних систем це не настільки критично.

Результати комплексної дії складу цементу, способу введення лужного компоненту та кількості добавки ЛСТМ на строки тужавлення і міцність представлені у Табл. 3, на Рис. 3 і Рис. 4.

Таблиця 3

Вплив на строки тужавлення складу цементу, способу введення лужного компоненту і кількості добавки ЛСТМ

№ з/п	Склад, %		Спосіб введення лужного компоненту $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		ЛСТМ, %	В/Ц Р/Ц	Строки тужавлення, год.-хв.	
	шлак	клинкер					початок	кінець
			порошок	розчин				
1	95	5	порошок	–	0	0,270	1–40	2–08
2				–	2	0,260	1–58	2–27
3				–	4	0,250	2–24	3–00
4	95	5	розчин	–	0	0,260	0–08	0–12
5				–	2	0,250	0–17	0–22
6				–	4	0,240	1–00	1–16
7	50	50	порошок	–	0	0,275	0–19	0–25
8				–	2	0,265	0–39	0–45
9				–	4	0,250	1–12	1–28
10	50	50	розчин	–	0	0,265	0–04	0–06
11				–	2	0,255	0–10	0–13
12				–	4	0,240	0–38	0–45
13	5	95	порошок	–	0	0,280	0–08	0–11
14				–	2	0,270	0–45	0–55
15				–	4	0,250	1–44	2–03
16	5	95	розчин	–	0	0,270	0–01	–
17				–	2	0,260	0–05* (0–26)*	0–31*
18				–	4	0,250	0–50	1–04

Примітка. * – спостерігалось хибне тужавлення, яке після продовження перемішування усунулося і початок тужавлення фіксувався через 26 хвилин.

Як видно з Табл. 3 і Рис. 3, введення підвищеної кількості добавки ЛСТМ дає позитивний ефект з точки зору подовження строків тужавлення. Особливо це помітно при введенні 4% добавки. Якщо при 2% добавки ЛСТМ у випадку введення лужного компоненту у вигляді розчину при вмісті клінкеру у цементі 95% спостерігалось хибне тужавлення (Табл.3, поз.17), то при введенні 4% це явище усувається.

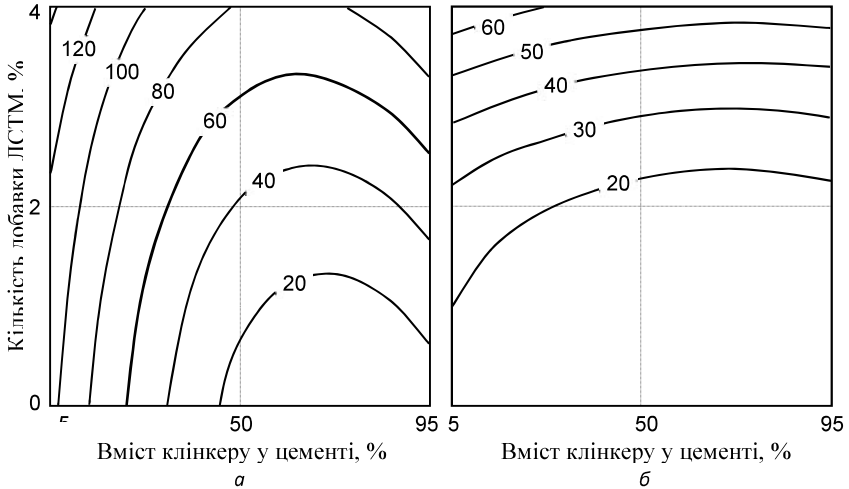


Рис. 3 Вплив способу введення лужного компоненту, складу цементу і кількості добавки ЛСТМ на строки тужавлення лужно-активованих цементів:

Найбільш проблематично короткі строки тужавлення спостерігалися у цементах з високим (50...95%) вмістом клінкеру, які склали 8...19 хв. при порошковому способі введення лужного компоненту і 1...4 хв. при введенні лужного компоненту у вигляді розчину. Введення 2% добавки ЛСТМ дозволило подовжити їх до 39...45 хв. при порошковому способі і до 10...26 хв. при замішуванні розчином. Підвищення кількості добавки ЛСТМ до 4% дозволило отримати технологічно прийнятні строки тужавлення – 72...104 хв. при використанні порошкового метасилікату і 38...50 хв. при використанні розчину та повністю усунути явище хибного тужавлення.

Як видно з Рис. 4, спостерігається деяке зниження міцності при стиску через 28 діб по мірі збільшення вмісту клінкеру у цементі і кількості добавки ЛСТМ. Так, при використанні порошкового способу введення метасилікату натрію при відсутності добавки ЛСТМ збільшення вмісту клінкеру з 5% до 95% призводить до зниження міцності з 65 МПа до 60 МПа. Введення добавки ЛСТМ до 4% додатково знижує міцність з 58 МПа до 54 МПа. При

використанні метасилікату натрію у вигляді розчину – 115...109 МПа і 110...102 МПа відповідно.

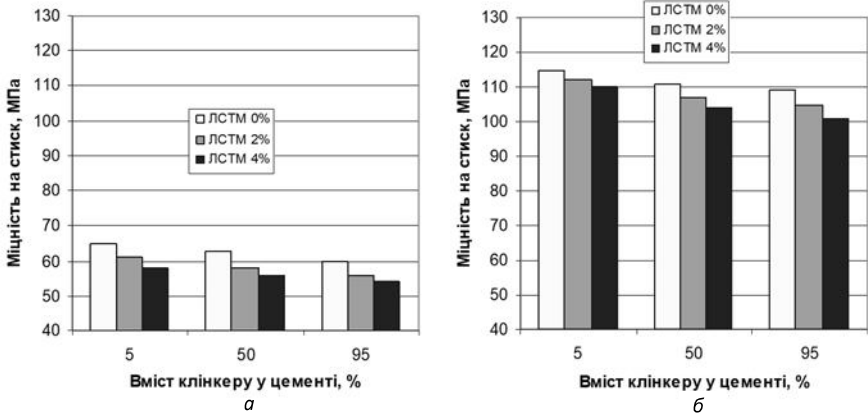


Рис.4 Вплив способу введення лужного компонента на міцність лужно-активованих цементів при стиску через 28 діб:
a – у вигляді порошку; *б* – у вигляді розчину

Але у ранні строки (3...7 діб) збільшення клінкеру у цементі сприяє прискореному набору міцності (Рис. 4).

У зв'язку з високою інформативністю [22, 23] метод калориметрії був використаний для дослідження процесів гідратації та структуроутворення лужно-активованих цементів. Результати досліджень представлені на Рис.5.

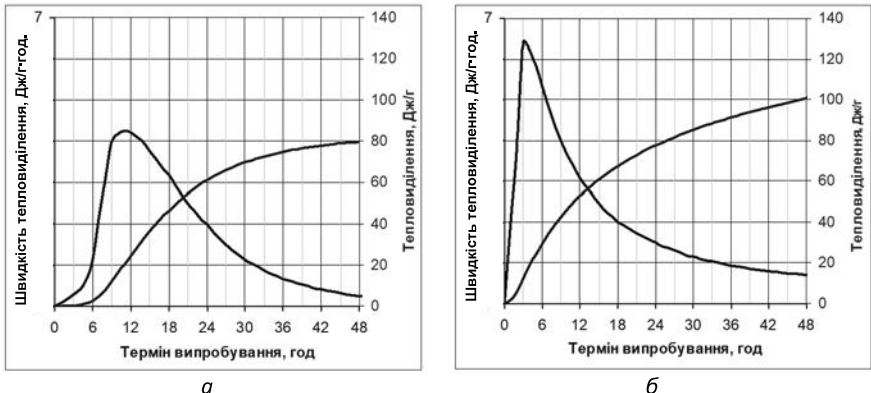


Рис. 5. Вплив на тепловиділення способу введення у цемент метасилікату натрію:
a – у вигляді порошку; *б* – у вигляді розчину; співвідношення у цементі "клінкер : шлак" – 5 : 95

Крива тепловиділення при використанні порошкового методу введення метасилікату (Рис.5, а) має на початкових етапах ознаки індукційного періоду, який повністю відсутній у випадку використання метасилікату у вигляді розчину (Рис.5, б). Це, очевидно, пов'язано з тим, що у випадку використання метасилікату у вигляді порошку потрібен деякий час для розчинення метасилікату у воді замішування і залучення його до процесів структуроутворення. При використанні лужного компоненту у вигляді розчину вищеназвані процеси починаються відразу і більш інтенсивно.

На прискорення формування коагуляційно-кристалізаційної структури при введенні метасилікату у вигляді розчину у порівнянні з порошковим варіантом вказує також характер кривих зміни контракції цементних паст (Рис.6).

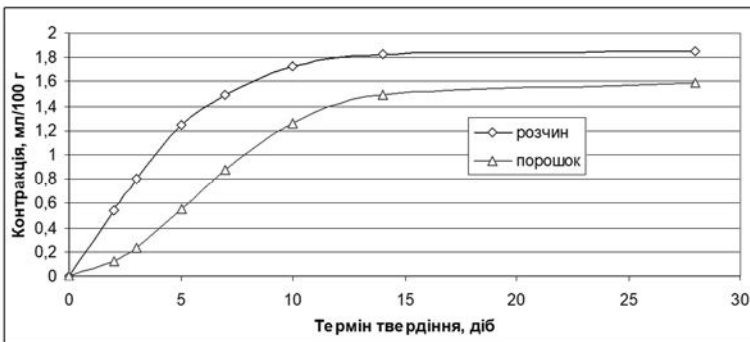


Рис. 6. Контракція лужно-активованих цементів залежно від агрегатного стану лужного компоненту: співвідношення у цементі "клінкер : шлак" – 5 : 95

Отримані результати контракції (Рис. 6) добре кореспондуються з даними тепловиділення (Рис. 5) і підтверджують їх.

Висновки. Розроблено механізм управління строками тужавлення у в'язучій системі "шлак + клінкер + метасилікат натрію".

Встановлена залежність термінів тужавлення від способу введення в систему "шлак + клінкер" метасилікату натрію, від складу цементу і від типу та кількості добавки-модифікатора.

Показано, що введення метасилікату натрію до цементу у вигляді водного розчину призводить до набагато більшої інтенсифікації структуроутворюючих процесів у порівнянні з варіантом використання метасилікату у вигляді порошку із замішуванням водою.

Встановлено, що зростання вмісту клінкеру у шлако-клінкерній суміші веде до суттєвого скорочення строків тужавлення.

Дослідження впливу добавки ЛСТМ показало можливість ефективного

управління строками тужавлення за умови підвищеної кількості використання цієї добавки, а саме – до 4%. У результаті отримано технологічно прийнятні строки початку тужавлення у межах 0–38...2–24 год-хв при використанні добавки ЛСТМ у кількості 2...4%.

Залежно від агрегатного стану лужного компоненту отримано лужно-активовані цементні з активністю через 28 діб 54...65 МПа при порошковому введенні метасилікату натрію і 102...115 МПа при введенні метасилікату натрію у вигляді розчину.

Результати дослідження структуроутворення лужно-активованих шлако-клінкерних цементних композицій підтвердили вищенаведені висновки і знаходились у хорошій кореляції з отриманими технологічними і фізико-механічними характеристиками.

1. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі / Л. Й. Дворкін та ін. Рівне : НУВГП, 2020. 305 с.

2. Chemtech Bayern Ukraine. Special'ni materialy. Osoblyvosti shvydkotverdnuchyh i vysokomicnyh cementiv, p.16. Available online: <https://chemtech-bayern.com.ua/> (accessed on: June, 29, 2023).

3. Innovative Concretes (SCC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering / M. Collepari et al. *ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology Proceedings* : Proceedings of the Sixth CANMET, 23 November 2003.

4. ACI PRC-363.2-11 Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete. ACI Committee 363, 2011, 19 p., ISBN: 9780870317033.

5. ACI PRC-363-10 Report on High-Strength Concrete. ACI Committee 363, 2010, 65 p. ISBN: 9780870314612.

6. ITG-4.2R-06 Materials and Quality Considerations for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications. ACI Committee 93/ACI Committee 93, 2006, 26 p, ISBN: 9780870312250.

7. Ma J.X., Schneider H. Properties of Ultra-High-Performance Concret, LACER, Vol. 7, 2002. P. 25–32.

8. Cyr M. F., Shah S. P. Advances in concrete technology, Advances in Building Technology, Vol. 1, 2002. P. 17–27.

9. Young J. F. Macro-Defect-Free Cement: A Review, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 179, 1991. P. 101–121.

10. Cwirzen A., Penttala V., Vornanen, C. Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC, Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008. P. 1217–1226.

11. 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.

12. 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>.

13. [Pascal Boustingorry](#), [F. Puertas](#), [Marta Palacios](#), [Bruno Pellerin](#), [Christophe Eychenne](#), [Celia Varga](#) Alkali-Activation of Slag Cements: Activation Process, Microstructure and Mechanical Properties. Conference: *13th International Congress on the Chemistry of Cement*, July 2011. <https://www.researchgate.net/publication/235707703>.
14. Pushkar'ova K.K., Gonchar O.A., Bondarenko O.P. Osoblyvosti reguljuvannja vlastyvojestj luzhnyh shlakoportlandcementiv Zbirnyk "Suchasne promyslove ta cyvil'ne budivnytctvo", tom.3, №2, 2007. P. 95-102. (in Ukrainian)
15. 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>
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Кривенко П.В., Рунова Р.Ф., Саницкий М.А., Руденко И.И. Щелочные цементы : монография. Киев: ООО "Основа", 2015. 448 с.
20. Чехов А. П., Сергеев А. М., Дибров Г. Д. Справочник по бетонам и растворам : Довідник. 3-тє вид. Київ : Будівельник, 1983. 214 с.
21. J.J. Chang A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol.33. 2003. P. 1005-1011. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01096-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01096-7).
22. Shi C., Day R.L. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*. 25 (6). 1995. P. 1333-1346. doi: 10.1016/0008-8846(95)00126-W.
23. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973. 504 с.