

УДК 691.3

**ВИСОКОМІЦНІ ШЛАКОЛУЖНІ ЦЕМЕНТИ ДЛЯ ШВИДКОГО  
РЕМОНТУ ТА ЗВЕДЕННЯ БЕТОННИХ СПОРУД**

**ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫЕ ЦЕМЕНТЫ ДЛЯ  
БЫСТРОГО РЕМОНТА И ВОЗВЕДЕНИЯ БЕТОННЫХ  
СООРУЖЕНИЙ**

**HIGH STRENGTH ALKALI ACTIVATED SLAG CEMENTS FOR FAST  
REPAIR AND ERECTION OF CONCRETE STRUCTURES**

**Кривенко П.В., д.т.н., проф., Петропавловський О.М., к.т.н., с.н.с.,  
Вознюк Г.В., к.т.н., с.н.с., Лакуста С.О., аспірант, м.н.с. (НДІВМ КНУБА,  
м. Київ)**

**Кривенко П.В., д.т.н., проф., Петропавловский О.Н., к.т.н., с.н.с.,  
Вознюк Г.В., к.т.н., с.н.с., Лакуста С.О., аспирант, м.н.с. (НИИВМ КНУСА,  
г. Киев)**

**Kryvenko P. V., DSc, Professor, Petropavlovskii O. N., PhD.,Senior Scientist,  
Vozniuk G.,PhD., Senior Scientist, Lakusta S., PhD student, Researcher  
(Scientific Research Institute for Binders and Materials of Kyiv National  
University of Construction and Architecture (SRIBM), Kyiv)**

У статті описано дослідження з направленої модифікації високоміцних шлаколуужних цементів для використання у розчинах і бетонах при швидкому ремонті пошкоджених та зведенні нових бетонних споруд та представлено отримані результати.

В статье приведены и анализируются результаты исследований по направленной модификации высокопрочных шлакощелочных цементов для их использования при быстрых ремонтах поврежденных и возведении новых бетонных сооружений.

The paper covers the results of studies on directed modification of high strength alkali activated slag cements for their use in fast repair of the damaged and erection of new concrete structures.

**Ключові слова:**

Шлаколуужні цементи, бетони, рідке скло, модифікатори, міцність, мікроструктура бетону, напруження, прогин.

Шлакощелочные цементы, бетоны, жидкое стекло, модификаторы, прочность, микроструктура бетона, напряжение, прогиб.

Alkali activated slag cements, concretes, concrete microstructure, deflection, modifiers, soluble silicate, strength, stress.

**Вступ:** Шлаколувні цементы [1] або відомі за кордоном як лужноактивовані цементы [2-4], на відміну від традиційних цементних систем, характеризуються складною і унікальною мікроструктурою [5], а саме відсутністю високоосновних гідратних фаз, жорсткого каркаса із портландита і алюмініатів кальцію, наявністю високодисперсної структури з розвиненою питомою поверхнею, формуванням переважно низькоосновних гідросилікатів, лужних и лужно-лужноземельних гидроалюмосилікатів. Ці особливості забезпечують високі показники швидкості набору ранніх міцностей цементів і абсолютні їх значення при досягненні проектного віку, підвищений ізоморфізм міцностних властивостей при стискаючих і згинаючих навантаженнях, високі адгезійні характеристики до різних матеріалів, зносостійкість і підвищену деформативність [5-6].

Особлива увага, як показано в оглядовій інформації [7], лужноактивованим цементам приділяється при використанні в якості перспективних матеріалів для прискореної реабілітації пошкоджених бетонів на портландцементі, що обумовлено не тільки їх високими фізико-технічними характеристиками, але і значним економічним ефектом їх використання у порівнянні з відомими матеріалами на традиційних цементях.

Одним з негативних факторів лужноактивованих цементів і бетонів на їх основі, у т. ч. і шлаколувних [5, 7-9], є підвищена усадка і знижені показники абсолютної міцності на розтяг при згині, яка по відношенню до міцності при стиску у проектному віці характеризується значеннями 0,09-0,105, що знижує їх тріщиностійкість. Ці обставини зумовлюють пошук ефективних рішень для їх усунення.

**Мета досліджень:** розробка ефективних методів модифікації швидкотверднучих високоміцних шлаколувних цементів, що забезпечують підвищення їх тріщиностійкості при деформуванні за рахунок додаткового формування в тверднучій системі маложорстких структурних елементів, що забезпечить підвищення ефективності таких матеріалів при проведенні швидкого ремонту пошкоджених і зведенні нових бетонних споруд.

#### **Матеріали та методи досліджень**

В якості кальцієвої складової цементів і бетонів в роботі використовували мелений гранульований домений шлак з модулем основності ( $M_o = CaO + MgO / SiO_2 + Al_2O_3$ ), який дорівнює 1,1.

Склад і характеристики шлаку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад шлаку за основними оксидами				Модуль основності	Склофаза, мас. %
Оксидаи, мас. %					
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO		
37,90	6,85	44,60	5,21	1,1	84,0

Питома поверхню шлаку становила 4420 см<sup>2</sup>/г за Блейном.

Згідно з роботами [8-9] для забезпечення високої швидкості набору ранньої міцності шлаколужного цементу в якості лужного компоненту використовували натрієве рідке скло з силікатним модулем  $M_c = 2,9$  і густиною розчину  $1400 \text{ кг/м}^3$ , а в якості добавки уповільнювача тужавлення використовували сіль  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (далі ТНФ), як найбільш ефективну добавку. Вміст останньої в складі цементу підбирали експериментально для зазначеного вище шлаку і забезпечення строків початку тужавлення цементу 15-20 хв., характерного для особливошвидкотверднучих систем на клінкерних цементах [10]. При цьому ТНФ попередньо розчиняли в розчині скла з подальшим доведенням, приготованого однорідного розчину, до результуючої густини  $\rho = 1380-1400 \text{ кг/м}^3$ .

В якості додаткових модифікаторів використовували трьохатомний спирт і поліакріламід (торгова марка Agocel S 2000), які відносяться згідно [11] до так званих зшиваючих добавок. Останні за даними [11-13] характеризуються здатністю зв'язувати поверхневі групи кремнекисневих олігомерів при затвердінні рідких стекел за допомогою водневих зв'язків, надаючи їм підвищену міцність, водостійкість, еластичність.

Приготування цементно-піщаних розчинів здійснювали в стандартному змішувачі типу Hobart. Приготування бетонів, на крупному заповнювачі, здійснювали в змішувачі примусового дії об'ємом 30 л.

В якості дрібного заповнювача при виготовленні цементно-піщаних розчинів використовували монофракційний пісок для стандартних випробувань цементу. В якості дрібного заповнювача при виготовленні бетонів використовувався річковий пісок (р. Дніпро) з модулем крупності  $M_k=1,2$ , а в якості крупного заповнювача – гранітний щебінь фр. 5-20 мм.

При виготовленні цементно-піщаних розчинів, відношення об'єму розчину рідкого скла до маси меленого шлаку (далі розчино-шлакове відношення - Р/Ш), підбирали експериментально до досягнення розпливу розчину на стандартному струшуючому столику  $\geq 115$  мм. При приготуванні бетонів (Р/Ш) встановлювали для досягнення осідання стандартного конуса бетонної суміші 5-8 см.

Умови твердіння для всіх зразків із цементно-піщаних розчинів включали: природне зберігання у формах після виготовлення і до 3-х годин, після 3-х годин зразки розкривали і встановлювали в нормальні температурно-вологісні умови ( $W = 95 \dots 100\%$ ,  $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Бетонні зразки після виготовлення протягом 3-х годин зберігали у формах з накритою поверхнею, а потім виймали з форм та встановлювали у воду.

Вивчення деформованості цементів при навантаженні, проводили на зразках  $4 \times 4 \times 16$  см з цементно-піщаних розчинів методом їх випробування на розтяг при згині (рис. 1). Даний метод, згідно [14], дозволяє в умовах порівняльних випробувань потенційно встановити вплив композиційного складу та структурних особливостей різних цементів на характеристики процесів їх деформування і руйнування.

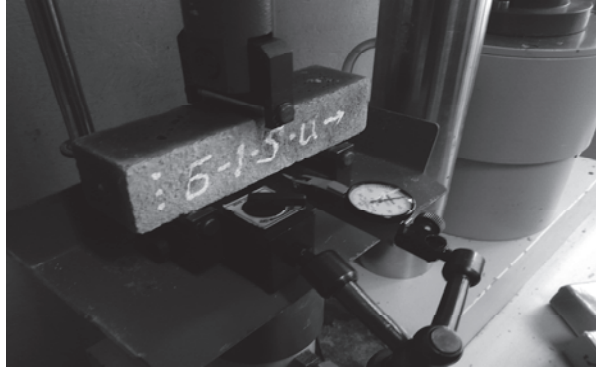


Рис.1. Визначення деформацій прогину при навантаженні

Вивчення мікроструктури бетонів після випробувань на міцнісні характеристики проводили за допомогою цифрового мікроскопа Dino-life Pro при збільшенні у 500 разів.

**Результати досліджень:** При попередній підготовці до роботи було проведено підбір кількості добавки ТНФ у складі шлаколужного цементу.

Визначено, що для прийнятих в роботі шлаку і силікатного модуля рідкого скла вміст ТНФ має становити 10 мас. % від обсягу скла. Це дозволяє отримувати цемент з початком тужавлення 19 хв.

Введення гліцерину в цемент в якості модифікатора в кількості 1,25-3,75 мас.% дозволило подовжити початок тужавлення до 27-60 хв.

Визначено, що використання в якості модифікуючої добавки поліакриламід у кількості 0,03 мас.% і 0,015 мас.% від шлаку навпаки дещо скорочує початок тужавлення, який змінюється в межах 15-18 хв. відповідно.

Спільне використання модифікаторів гліцерину і поліакриламід у кількості 3,75 мас.% і 0,015 мас.% відповідно, від шлаку, дозволило отримати цемент з початком тужавлення 58 хв.

Для дослідження впливу модифікуючих складових на основні фізико-механічні характеристики цементів обрані три композиції, що включають базовий уповільнювач тужавлення і додатково модифікатори, а також базовий склад, що включає тільки уповільнювач тужавлення (ТНФ).

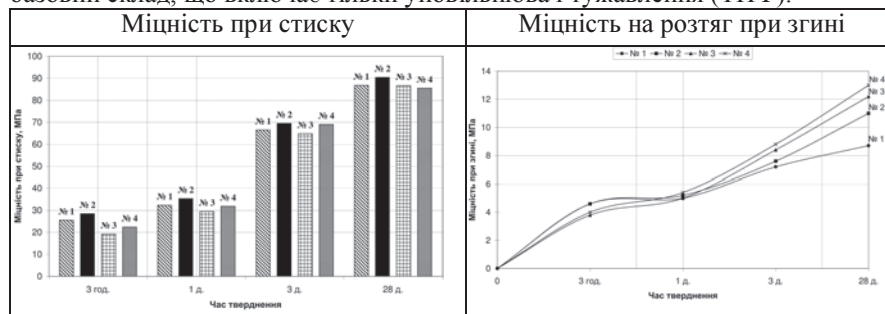


Рис.2. Зміна міцності цементів у часі.

Результати дослідження зміни міцності таких цементів представлені на рис.2, а їх склад і характеристика зміни в процесі твердіння відношення міцності на розтяг при вигині до міцності при стиску показані в табл. 2.

Таблиця 2

Склади і властивості цементно-піщаних розчинів

№ п/п	Модифік., мас % від шлаку		Р/Ш*	Р.К., мм	Зміна відношення $R_{zg}/R_{ст.}$ у часі при випробуванні зразків розміром 4x4x16 см через			
	Гліц	Акрил-амід			3 год.	1 д.	7 д.	28 д.
1	-	-	0,40	126	0,18	0,155	0,108	0,102
2	1,25	-	0,39	132	0,16	0,147	0,119	0,121
3	3,75	-	0,37	142	0,198	0,169	0,129	0,140
4	3,75	0,015	0,38	140	0,188	0,170	0,138	0,152

\*-відношення об'єму розчину рідкого скла з ТНФ до маси шлаку.

Результати, наведені на рис.2 і в табл. 2, свідчать про ефективність роботи добавок гліцерину і поліакриламід у складі цементу і показують, що при практично однакових показниках міцності при стиску у віці 28 діб, додаткове введення зазначених добавок сприяє підвищенню міцності на розтяг при згині. При цьому, максимальним значенням відношення  $R_{zg}/R_{ст.} = 0,152$ , характеризується цементна композиція з використанням комплексного модифікатора, що відповідає підвищенню цього показника на 49 %.

Проведено вивчення деформацій зразків, складів №№ 1,3 та 4 (табл.2) при випробуваннях на розтяг при згині і побудовані криві в системі координат «відносне напруження ( $\sigma/R_{zg}$ ) - деформації прогину» (рис.3).

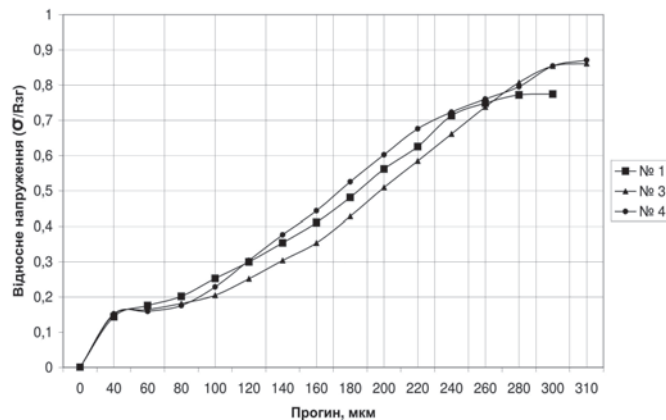


Рис.3. Діаграма деформації цементів

Аналіз рисунка показує, що при практично однаковій жорсткості зразків на початковій стадії навантаження (характерна пряма пружного деформування) зразки цементно-піщаного розчину з використанням цементів, модифікованих гліцерином (склад №3) і спільним використанням гліцерину і акриламідю (склад №4) характеризуються підвищеними значеннями пластичних деформацій в області відносних напружень  $\sigma/R_{изг} = 0,17-0,2$ . Подальше навантаження зразків свідчить про те, що наявність у складі цементів модифікаторів дозволяє перерозподіляти пластичні і пружні деформації в напрямку підвищення загального напруження перед початком руйнування зразків до значень  $\sigma/R_{изг} = 0,86-0,87$  і підвищення прогину до  $f = 310$  мкм в порівнянні з цементом без модифікаторів. Це, відповідно до [14], характеризує підвищення тріщиностійкості матеріалів, в'язкості їх руйнування та деформованості.

Зазначені особливості напружено-деформованого стану розглянутих систем, по відношенню один до одного, можна пояснити змінами в їх мікроструктурах, за рахунок формування структурних елементів підвищеної еластичності у додатково модифікованих цементах.

Дане пояснення підтверджується характеристикою мікроструктури бетону (табл.3) на цементі № 4 по табл.2, де чітко спостерігається наявність склоподібних ниткоподібних формувань (див. рис4.).

Таблиця 3

Склади і властивості бетону

Композиційний склад бетону, кг/м <sup>3</sup>			Р/Ш	О.К., см	$\gamma_b$ , кг/м <sup>3</sup>	Міцність, МПа, через проміжок часу			
Ц	П	Щ				3 год.	1 доба	7 діб	28 діб
450	650	1150	0,42	6,0	2427	20	34	57	82

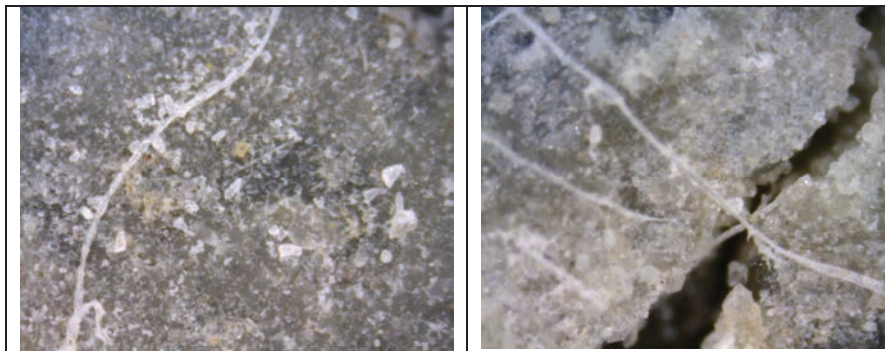


Рис.4. Мікроструктура бетону після випробувань

#### Висновки

За результатами досліджень визначена ефективність використання в якості модифікуючих добавок гліцерину та сумісного введення гліцерину і

поліакриламід до шлаколузних цементів на рідких стеклах. Показано, що такі модифікуючі добавки сприяють підвищенню міцностних показників цементів на розтяг при згині та показників відношення розтягу при згині до міцності при стиску на 18,3-49 %, збільшенню еластичності цементів за показниками підвищення прогину при навантаженні на 6,8-6,9 %.

Визначено, що цьому сприяє формування у мікроструктурі цементуючого матеріалу бетону еластичних ниткоподібних сполук. Це дозволяє прогнозувати ефективність використання модифікованих шлаколузних цементів у матеріалах для відновлення пошкоджених та зведення нових бетонних споруд.

1. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях: Монография /Под ред. Проф. В.Д. Гдуховского. – Киев: Вища школа, 1981. – 224 с. 2. С., Shi, P., Krivenko, D., Roy, Alkali activated cements and concretes, Taylor&Francis, Abingdon, 2006. 388 p. 3. Alkali activated cements and concretes С. Shi, P.V. Krivenko, Della Roy (in Chinese) 2012. 326 p. 4. John L. Provis, Janne S.J., van Deventer Editors. Alkali activated materials. State-of-the-Art Report, Rilem TC 224-AAM, 2014. 388 p. 5. П.В. Кривенко. Синтез синтез вяжущих с заданными свойствами в системе  $Me_2O-MeO-Me_2O_3-SiO_2-H_2O$ : Автореф. дис... д-ра техн. наук. – Киев, 1986. – 40с. 6. Солодкий С.И. Шлакощелочной бетон для строительства жестких дорожных покрытий. Дис. на соиск.уч. степени канд. техн. наук.- Киев, 1991. – 181 с. 7. F. Pacheco-Torgal, J. Barroso de Aguirre, Y. Ding, W. Tahri, 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, pp. 627- 642. 8. High strength alkali activated slag cements with controlled setting times and early strength gain. Krivenko P., Petropavlovsky O., Petranek V., Pushkar V., Vozniuk G. Advanced Materials Research, Vol. 1100, pp. 44-49, Apr. 2015 <http://www.scientific.net/AMR.1100.44/>. 9. Methods of regulation the properties of alkali slag cements and concretes on based on the liquid-glass Krivenko P.V., Petropavlovskii O.N., Pushkar V.I. 18. Ibausil/ Internationale Baustofftagung. – Weimer, September 12-15, 2012. – Tagungsbericht – Band 2. – P. 1-1178-1-1185. 10. Стаття «Цементи из специальных клинкеров»: <http://эволют.рф/pages/view/56>, 12.08.2012г. 11. Корнеев, В.И. Растворимое и жидкое стекло / В.И. Корнеев, В.В. Данилов. – СПб: Стройиздат, 1996. – 216 с.. 12. Кудина, Е.Ф. Исследование процесса гелеобразования в системах жидкое стекло – акриламид / Е.Ф. Кудина, Г.Г. Печерский, О.А. Ермолович // Пластические массы. – 2012. – № 1. – С. 27-29. 13. Тихомирова, И.Н. Влияние силикатного модуля жидкого стекла на свойства вяжущих материалов / И.Н. Тихомирова, Т.В. Скорина// Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 72-74. 14. Коротких Д.М. Повышение прочности и трещиностойкости современных цементных бетонов: проблемы матерааловедения и технологии. Дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. Воронеж, 2014. – 354 с.