

УДК: 691.53

DOI: 10.20535/iwccmm2026357509

ТЕМПЕРАТУРОСТІЙКІ РОЗЧИНИ ДЛЯ АНКЕРУВАННЯ

Ковальчук А.В.

*Асистент, Київський національний університет будівництва і архітектури,
м. Київ, Україна*

e-mail: nutrogenium@gmail.com

Анотація. Запропоновано отримання розчинів для анкерування при використанні цементних систем на основі портландцементу шляхом максимальної заміни частини клінкеру добавкою гранульованого доменного шлаку при лужній активації рідинним склом. Визначені підходи щодо регулювання міцності і власних деформацій розчинів. Розроблені розчини для анкерування характеризуються високою ранньою міцністю на стиск ≥ 10 МПа через 6 годин тверднення і ≥ 20 МПа через 1 добу, розширення 2,35 мм/м, міцністю на виривання ≥ 100 МПа і підвищеною стійкістю до високотемпературного навантаження.

Ключові слова: анкерні розчини, лужні активовані цементы, рідинне скло, гранульований доменний шлак, розширення.

В умовах воєнного часу критично важливо підвищити стійкість фортифікаційних споруд до екстремальних термосилових навантажень від вибухів та пожеж [1]. Ефективним матеріалом для їх підсилення є анкерні розчини на основі лужно-активованих шлакопортландцементів [2]. Завдяки активації силікатами натрію такі системи формують гідратні новоутворення, здатні до перекристалізації без руйнування структури при температурах понад 800 °С, що забезпечує їм високу термостійкість [3]. Проте суттєвим недоліком лужно-активованих цементів є підвищена усадка [4], тоді як для надійної фіксації анкера розчин повинен розширюватися. Оскільки традиційні засоби регулювання деформацій тут малоефективні, актуальним завданням є пошук нових рішень, таких як направлений синтез високообводнених фаз [5], підвищення ступеню закристалізованості продуктів гідратації, утримання води в структурі матеріалу та газове розширення [6].

Отримання лужно-активованих портландцементів з властивостями, затребуваними в розчинах для анкерування, які використовуються для підвищення стійкості конструкцій до високотемпературного навантаження.

Дослідження проведено на лужно-активованому шлакопортландцементі СЕМ III/A (далі, ЛШПЦ) (50 мас. % гранульований доменний шлак). Для отримання СЕМ III/A використано портландцемент СЕМ I 42,5 R та гранульований доменний шлак ($M_0 = 1,11$; вміст склофазы — 84 %; питома поверхня — 400 м²/кг).

Лужним активатором слугував водний розчин силікату натрію ($\rho = 1280 \dots 1400$ кг/м³, $M_s = 1,0 \dots 3,0$). Корегування силікатного модуля здійснювали розчином NaOH ($\rho = 1400$ кг/м³) згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-304:2015. Для регулювання строків тужавлення до силікату натрію додавали: тринатрійфосфат ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) — 4 % від маси розчину силікату; гліцерин — 10 % від рідкої складової.

Строки тужавлення і міцність. При $M_s = 3,0$ вміст тринатрійфосфату становив 8 %, при $M_s = 1,0 \dots 1,5$ не застосовували через його нерозчинність. Зменшення густини розчину від 1400 до 1280 кг/м³ та M_s від 3,0 до 1,0 пришвидшує тужавлення ЛШПЦ: початок — із 30 до 10 хв, кінець — із 40 до 20 хв. Максимальна міцність на стиск досягається при $\rho = 1400$ кг/м³ і $M_s = 3,0$, становлячи 20,9; 37,2; 62,9 та 108,2 МПа через 3 год, 1, 3 і 28 діб відповідно.

Власні деформації. На прикладі високоактивного цементу ($\rho = 1400$ кг/м³, $M_s = 3,0$) доведено можливість регулювання деформацій шляхом поєднання газового розширення, водоутримання та направленого синтезу новоутворень. Використання комплексної добавки (гіпс напівводний 2,0 %, глиноземистий цемент 2,0 %, зола-винесення 4 %, суперадсорбент 0,4

%, алюмінієва пудра 0,08 %) узгоджує в часі процеси газовиділення з кристалізацією високообводнених AFt- і AFm-фаз. Це створює компенсуюче напруження структури без втрат міцності. Як наслідок, отримані безусадочні (+0,35 мм/м) та розширні (+2,00 мм/м) ЛШПЦ.

Високі фізико-механічні характеристики ЛШПЦ зумовлені формуванням надзвичайно щільної та монолітної мікроструктури, базовим механізмом якої є синтез низькоосновних гідросилікатів кальцію CSH(I) у поєднанні зі специфічними сферолітними целітоподібними новоутвореннями.

На відміну від традиційних цементних систем, де розширення часто супроводжується деструкцією, запропонований механізм компенсації усадки базується на синергії просторового газовиділення та швидкої кристалізації високообводнених AFt- і AFm-фаз, що створює контрольоване внутрішнє напруження без втрати міцності.

Анкерні розчини є надзвичайно затребуваними в умовах бойових дій при будівництві конструкцій, які експлуатуються при ударному навантаженні від вибухів і послідувочої дії вогню, - громадські, фортифікаційні і інженерні конструкції та інші об'єкти критичної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

На основі ЛШПЦ використовуючи комплекс підходів до управління строками тужавлення, міцністю і власними деформаціями було розроблено анкерні суміші для підсилення термонавантажених конструкцій. Їхні фізико-механічні показники через 6 годин, 1 добу та 28 діб відповідно становлять: міцність на згин — 2,3, 2,8 та 8,6 МПа; міцність на стиск — $\geq 15,2$, $\geq 23,5$ та $\geq 45,7$ МПа; розширення дорівнює +2,35 мм/м. За нормальних умов (28 діб) міцність на виривання розробленого розчину та комерційного аналога на основі глиноземистого цементу та гіпсу становить ≥ 100 МПа, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Проте після імітації пожежі ($t = 600$ °С протягом 4 год) доведено значно вищу термостійкість розробленого складу: його міцність на виривання знижується лише в 1,3 раза, тоді як міцність аналога падає у 8 разів.

Подяка. Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту з реєстраційним № 0126U000965, який виконується за рахунок бюджетного фінансування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kryvenko, P. V., Valerga-Puerta, A. P., Rivera-Armenta, J. L., & Vinci, A. (Eds.). (2025). Ballistic protection. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/b-6G91y5>
2. Kryvenko, P., Rudenko, I., Sikora, P., Sanytsky, M., Konstantynovskyi, O., & Kropyvnytska, T. (2024). Alkali-activated cements as sustainable materials for repairing building construction: A review. *Journal of Building Engineering*, 90, Article 109399. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109399>
3. Кривенко, П. В., & Пушкарьова, К. К. (1993). Довговічність шлаколужного бетону. Будівельник.
4. Zhang, B., Zhu, H., Cheng, Y., Huseien, G. F., & Shah, K. W. (2022). Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review. *Construction and Building Materials*, 318, Article 125993. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125993>
5. Krivenko, P., Gots, V., Petropavlovskyi, O., Rudenko, I., Konstantynovskyi, O., & Kovalchuk, A. (2019). Development of solutions concerning regulation of proper deformations in alkali-activated cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6[101]), 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181150>
6. Aydın, S. (2013). A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars. *Construction and Building Materials*, 43, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.005>