

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ НА СВОЙСТВА  
БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ЗОЛОЩЕЛОЧНЫХ ЦЕМЕНТОВ**

**Кривенко П.В., д.т.н., проф., Ковальчук О.Ю., к.т.н., с.н.с.,**

**Грабовчак В.В., к.т.н..**

*Научно-исследовательский институт вяжущих материалов Киевского  
национального университета строительства и архитектуры, Киев*

**Состояние вопроса и задачи исследований.** Современное строительство требует применения новых эффективных материалов, среди которых главное место занимает высококачественный бетон и изделия на его основе. Однако не менее важной проблемой человечества является загрязнение окружающей среды, особенно выделение техногенного углекислого газа и аэрозолей, и связанное с этим явление «парникового эффекта». Следует отметить, что цементная промышленность остается одной из крупнейших загрязнителей атмосферы. Поэтому с целью сохранения окружающей среды большое внимание уделяют разработке цемента, в которых порландцементный клинкер заменяется другими, более дешевыми материалами.

Также актуальным вопросом сегодня является утилизация отходов теплоэнергетики. Ведь с каждым годом количество отходов ТЭС увеличивается, что приводит к накоплению их в золоотвалах и занимании больших площадей. Так, только в Украине накапливается около 192 т золы в год [1], а используется лишь около 0,2 % [2]. Поэтому наиболее рациональным направлением утилизации техногенных отходов является использование их в качестве сырья в производстве строительных материалов. Эффективными для создания строительных материалов на основе техногенного сырья следует считать разработанные научной школой Научно-исследовательского института вяжущих материалов КНУСА – золощелочные вяжущие [3-5], позволяющие использовать значительное количество топливных зол (до 80%) без существенного ухудшения прочностных характеристик материала. Кроме того, использование золощелочных цемента в составе бетона позволяет улучшить такие характеристики искусственного камня, как коррозионная стойкость, атмосферостойкость и т.д. Однако в отличие от доменных гранулированных шлаков, топливные золы характеризуются меньшей активностью. Поэтому золощелочные цементы отличаются

замедленным набором прочности в ранние сроки твердения, что требует создания соответствующих условий твердения, исключающие процесс выщелачивания щелочных металлов на поверхность бетона до связывания их в нерастворимые фазы. Это ограничивает использование бетонов на основе золощелочных цементов в монолитном строительстве [10, 11].

**Целью работы** было исследование направленного формирования структуры и свойств бетона в нестандартных температурных условиях, за счет управления процессами массопереноса щелочных ионов, путем введения добавок пленкообразующего действия.

**Сырьевые материалы.** В качестве основного компонента для приготовления золощелочного цемента использовали золу Ладижинской ТЭС с удельной поверхностью  $8000\text{см}^2/\text{г}$ . Как щелочной компонент использовали карбонат натрия технической. В качестве кальцийсодержащих компонентов использовали портландцемент типа I М500 производства ОАО «Волыньцемент» (город Здолбунов) с удельной поверхностью  $3800\text{ см}^2/\text{г}$  и молотый доменный гранулированный шлак Мариупольского металлургического комбината им. Ильича с удельной поверхностью  $4500\text{ см}^2/\text{г}$ . Для улучшения технологических характеристик использовали пластифицирующую добавку.

Для всех компонентов были определены химический состав (табл. 1), а также особенности минералогического состава методом рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 1).

*Таблица 1. Химический состав исходных компонентов*

Компонент ы	Химический состав, %				
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	в.п.п.
Зола	50,94	24,56	13,25	2,86	1,36
Шлак	40,0	5,91	0,32	46,98	–
ПЦ I-500	23,4	5,17	4,12	64,13	0,20

В данных исследованиях были рассмотрены тяжелые бетоны на основе золощелочных цементах классифицированы по [8] как щелочной пуццолановый цемент ЛЦЕМ III-3, щелочной композиционный цемент ЛЦЕМ V. Щелочные цементы готовили отдельным помолотом золы, шлака и смешиванием всех компонентов с добавлением щелочного компонента и пластифицирующей добавки в шаровой мельнице.

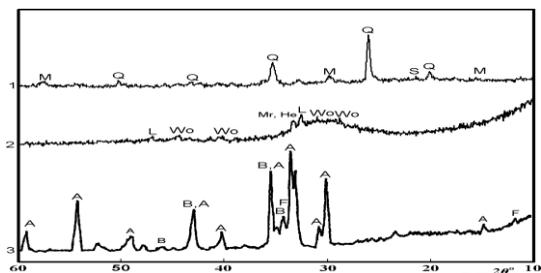


Рисунок 1. Рентгенограммы исходных компонентов, 1 – зола-унос Ладыжинской ТЭС, 2 – шлак Мариупольского комбината, 3 – портландцемент ПЦ-500. Обозначения: Q – β-кварц, M – муллит, Wo – волластонит, Mr – мервинит, He – геленитом, A – алит, B – белит, F – четырехкальциевый алюмоферрит

**Результаты исследований.** Физико-механические характеристики щелочного композиционного и щелочного пуццоланового цемента приведены на рис. 2. Как видно из приведенных результатов, зололужни цементы не уступают традиционным аналогам по прочностным показателям, чрезвычайно важно, что такие результаты достигаются при содержании золы в составе цемента 70 %, что исключено при применении традиционных систем. Итак, исследуемые системы являются более ресурсоэффективны и дешевыми. Кроме того, для предложенных систем нет характерного для золопортландцементов "провала" в прочности на ранних сроках твердения: так, в возрасте 3 суток прочность достигает 18 МПа, 7 суток - 23 МПа.

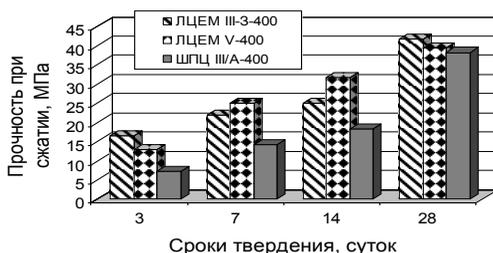


Рисунок 2. Прочностные характеристики цементов

С целью изучения фазового состава продуктов гидратации и дегидратации золощелочных цементов проведено физико-химические исследования изучаемых систем. Согласно данным РФА (рис. 3), искусственный камень на основе золощелочного цемента характеризуется в основном аформизованую структурой, продукты гидратации данных цементов представлены в основном низкоосновными гидросиликатами кальция тапа CSH (B) ( $d = 0,304, 0,299, 0,281, 0,203, 0,18\text{нм}$ ), жисмондином ( $d = 0,188, 0,273, 0,274, 0,418\text{нм}$ ) и незначительными включениями кварца ( $d = 0,424, 0,334, 0,245, 0,212\text{нм}$ ).

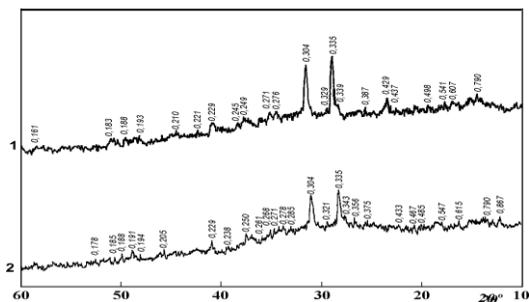


Рисунок 3. Рентгенограммы золосодержащих цементов:  
1 – ЛЦЕМ III-3-400, 2 – ЛЦЕМ V-400

Технология монолитных бетонных конструкций требует необходимости обеспечения скорости роста прочности бетона во времени. Однако параметры окружающей среды, прежде всего температура, в значительной мере влияет на кинетику изменения прочности бетона во времени. Поэтому было исследовано изменение во времени прочности при сжатии бетонов на основе цементов: щелочного пуццоланового (ЛЦЕМ III-3-400), щелочного композиционного (ЛЦЕМ V-400) с использованием добавки стеарата кальция. Как состав сравнения были взяты шлакопортландцемент ШПЦ Ш/А-400, поскольку известно, что именно шлакопортландцементы являются наиболее устойчивыми среди традиционных цементов в нестандартных условий твердения. Бетоны с использованием золощелочных цементов и традиционного цемента производили в одинаковых условиях и на одинаковом оборудовании (гравитационный бетоносмеситель объемом  $0,025 \text{ м}^3$ ).

Изготовленные бетоны характеризовались подвижной консистенцией за ДСТУ Б.В.2.7-96-2000 отвечали маркам удобоукладываемости бетонной смеси – ПЗ (ОК= 10-15 см).

В ходе исследований бетоны, моделируя распространены ситуации в технологии бетонирования строительных конструкций, выдерживали в таких режимах:

- 1 – нормальные условия ( $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 100 \%$ );
- 2 – воздушно-сухая среда ( $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 45 - 60 \%$ );
- 3 – повышенная температура ( $t = +30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 20 \%$ );
- 4 – переменная дневная температура:  $t = + 5 \text{ }^\circ\text{C}$  ночью и  $t = + 20 \text{ }^\circ\text{C}$  днем  $W = 45 - 60 \%$ ;
- 5 – переменная месячная температура:  $t = + 5 \text{ }^\circ\text{C}$  на протяжении первых 7 дней, в дальнейшем – в воздушно-сухих условиях ( $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 45 - 60 \%$ );
- 6 – постоянно низкая температура ( $t = +5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 90 \%$ ).

Анализируя результаты исследований отмечено, что шлакопортландцемент (рис. 4, в) показывает лучшую прочность в проектном возрасте именно в нормальных условиях твердения. Повышенная температура способствует улучшению прочности на ранних сроках твердения, но несколько снижает прочность в возрасте 28 суток. Сухие условия и переменная температура обуславливают ухудшение прочности на всех сроках твердения, а худшие характеристики показывает бетон, твердеющий в условиях низких температур: прочность в проектном возрасте на 34% ниже, чем при твердении в нормальных условиях.

В то же время, для бетонов на золощелочных цементах условия твердения являются не столь критическими. Так, при использовании щелочного пуццоланового цемента ЛЦЕМ III-3 (рис.4, а) прочность бетона достигает высоких показателей (29,8...33,4 МПа) как в нормальных условиях, так и при изменении температур в течение месяца. Иными словами, твердение бетона при низкой температуре (+5 °C) в течение первых семи суток не ухудшает прочностные характеристики бетона в проектном возрасте: бетон "наверстывает" отставание после того, как температура среды повышается. В дальнейшем, в возрасте 90 суток, прочность бетона независимо от условий твердения продолжает расти.

Бетон на щелочном композиционном цементе ЛЦЕМ V (рис. 4, б), показывает несколько худшие показатели прочности по сравнению с бетоном на цементе ЛЦЕМ III-3. Однако разница прочности в зависимости от условий твердения незначительна. В возрасте же 90 суток прочность бетона продолжает пропорционально расти, за одним

исключением: бетон, что твердел при температуре +30 °С демонстрирует резкий рост прочности от 21,6 МПа до 31,8 МПа.

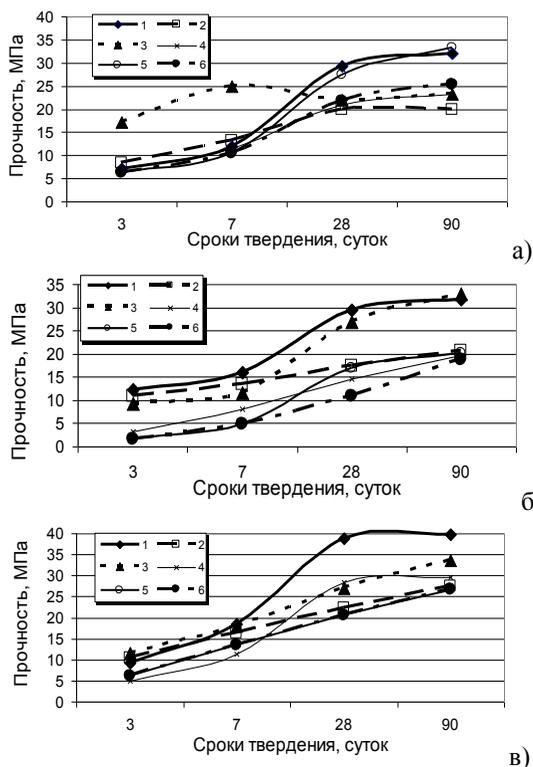


Рисунок 4. Прочность бетонов на основе цементов: а – ЛЦЕМ III-3-400, б – ЛЦЕМ V-400, в – ШПЦ Ш/A-400, в зависимости от режимов твердения: 1; 2; 3; 4; 5; 6.

Таким образом, бетоны на основе золощелочных цементов демонстрируют меньшую чувствительность к неблагоприятным условиям твердения по сравнению с бетонами на шлакопортландцементе, что делает их перспективной системой для использования в монолитном строительстве. Щелочной пуццолановый цемент ЛЦЕМ III-3 является оптимальным при бетонировании в условиях переменной температуры в течение месяца, а щелочной композиционный ЛЦЕМ V - для бетонирования при повышенных температурах.

## SUMMARY

Influence of negative hardening conditions of fly ash alkali-activated pozzolanic and composite cement on compressive strength of concretes on their basis was determined. It was set that alkali-activated pozzolanic cement is optimal choice under varies temperature during the month, and alkali-activated composite cement is the best for providing works in high temperature conditions.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ufpk.com.ua/files/p3/analiz.html>
2. Гарковенко В. Исрользование отходов тепловых электростанций / В. Гарковенко // Строительные материалы и изделия. – 2001. - №3. – С11-12.
3. Кривенко П.В. Рябова А. Г. Золощелочные вяжущие // Цемент. – 1990.- № 11. – С. 14-16.
4. Ефективні шляхи використання паливних зол у промисловості будівельних матеріалів / П.В. Кривенко, К.К. Пушкарьова, Г.Ю. Ковальчук, О.Ю. Ковальчук // Науково-виробничий журнал Будівництво. Наука. Проекти. Економіка. – Київ, 2013. – В. 1(13). – С. 18-25
5. Krivenko P.V. Fly ash – alkali cements and concretes // Proc. Fourth CANMET-ACI Intern. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. – Istanbul (Turkey). – 1992. – P. 721-734.
6. Fly Ash Based Alkaline Cements application: Proceeding of 2007 - Intern. Conf. [“Alkali Activated Materials – Research, Production and Utilization”], (Praga, 2007) / P.V. Krivenko, G.Yu. Kovalchuk. – Praga, 2007. – P. 313-332.
7. Alkaline Fly-Ash Cements and concretes: influence of care on early stage of hardening // Non-Traditional Cement & Concrete IV / Krivenko P.V., Kovalchuk G.Y., Kovalchuk O.Y., Grabovchak V.V. – Brno, 2011. – P 286-291.
8. ДСТУ Б.В. 2.7-181:2009 «Будівельні матеріали. Цементи лужні. Технічні умови». Київ 2009.
9. ДСТУ Б.В. 2.7-96-2000 «Суміші бетонні. Технічні умови». Київ 2000.
10. Krivenko P.V. – Fly Ash Based Zeolite Cements / P.V. Krivenko, G.Yu. Kovalchuk // Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction: Proc. Intern. Conf. “Challenges of Concrete Construction”, Dundee, 2002) – P. 123-132.
11. Palomo A. Alkaline Activation of Fly Ash: NMR Study of the Reaction Products / A. Palomo, A. Alonso, A. Fernandes-Jimenez // In: Journal of the American Ceramic Society. – 87 (6). – (2004).– P. 1141-1145.