

УДК. 691

***СВОЙСТВА БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО
БЕСЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО***

Романенко И.И.,

к. т.н., доцент

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, г. Пенза*

Петровнина И.Н.,

к. т.н., доцент

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, г. Пенза*

Фатоев А.,

студент

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, г. Пенза*

Аннотация

Бесцементные гидравлические вяжущие относятся к геополимерам, для которых характерны: высокая прочность, водостойкость, химическая стойкость и минимальные выбросы в атмосферу углекислого газа, что делает их конкурентоспособными на рынке вяжущих материалов. В исследованиях использовали доменные молотые шлаки ПО «Северсталь» и молотые щебни из карбонатных и гранитных пород с прочностью по дробимости М 450 и М 800. Каменная мука из горных пород вводилась в вяжущее в количестве 10-40% от общей массы геополимера. В качестве активатора твердения применяли натриевое жидкое стекло и гидроксид натрия (NaOH). Твердение бетонов проходило в камере нормального твердения. Полученные результаты позволяют эффективно применять разработанные высокопрочные бетоны для заводского производства железобетонных изделий.

Ключевые слова: вяжущее, геополимер, экологичность, активатор твердения, доменные шлаки, каменная мука, бетоны, прочность.

***PROPERTIES OF CONCRETE BASED ON COMPOSITE CEMENT-FREE
BINDING AGENT***

Romanenko I.I.,

Ph.D., Associate Professor

Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Russia, Penza

Petrovnina I.N.,

Ph.D., Associate Professor

Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Russia, Penza

Fatoyev A.,

Student

Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Russia, Penza

Abstract

Cement-free hydraulic binders are geopolymers characterized by: high strength, water resistance, chemical resistance and minimal emissions of carbon dioxide into the atmosphere, which makes them competitive in the binders market. The studies used blast-furnace ground slags from PO Severstal and ground crushed rock from carbonate and granite rocks with crushing strength of M 450 and M 800. Rock flour from rocks was introduced into the binder in the amount of 10-40% of the total mass of the geopolymer. Sodium liquid glass and sodium hydroxide (NaOH) were used as a hardening activator. Concrete hardening took place in a normal hardening chamber. The obtained results allow the effective use of the developed high-strength concrete for factory production of reinforced concrete products.

Keywords: binder, geopolymer, environmental friendliness, hardening activator, blast-furnace slags, rock flour, concrete, strength.

Альтернативой портландцементу на данный нет для производства бетонных и железобетонных изделий, но разрабатываются другие виды вяжущего, которые могут эффективно применяться для изделий, испытывающих воздействия химических веществ, морской воды, попеременное замораживание и оттаивание. Это позволит снизить производства портландцемента и одновременно выбросы в атмосферу углекислого газа. В то же время, расширить применение побочных продуктов химической, горнодобывающей, энергетической и металлургической промышленности. Таким образом, использование альтернативного материала является естественным шагом к решению задач экологического характера, экономического, а также по сохранению природных богатств регионов за счет снижения добычи материалов для производства портландцемента [4, 5, 8].

Основная цель повторного использования вторичных материалов – минимизация негативного воздействия человечества на окружающую среду. Использование неорганических промышленных побочных продуктов в производстве бетона способствуют улучшению свойств бетона и снижению себестоимости его производства [1, 2, 6].

Расширенный спрос на бетоны способствует росту использования природных сырьевых компонентов для выпуска портландцемента, а оно является энергозатратным. Выпуск портландцемента характеризуется ростом ежегодных объемов производства на 6-8% и в то же время ростом выбросов в атмосферу углекислого газа, что составляет около 1,5 млрд тонн в год [3].

Поэтому ученые разрабатывают альтернативное вяжущее портландцементу на основе вторичных ресурсов различных отраслей промышленности. Такими побочными продуктами, могут быть: летучая зола ТЭЦ, металлургические шлаки, отсев и пыль от дробления каменных Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

материалов, содосульфатные плавы и щелочные стоки от травления изложниц. Еще одна альтернативная традиционным бетонам – это геополимерный бетон (ГПБ) [4, 6].

Геополимерная технология может быть подходящей для применения на обычных предприятиях строительной индустрии по выпуску бетонов. В настоящем исследовании рассматривается использование каменной муки в производстве геополимерного бетона, поскольку он может использовать отходы каменного дробления как доломитовых, так и гранитных пород [3, 10].

Геополимерные бетоны представляют собой неорганический полимерный композит, как дополнение к традиционным бетонам на основе портландцемента. Термин «геополимер» был применен исследователем Давидовицем в 1970-х годах для обозначения вяжущего, полученного в результате реакции исходного тонко молотого сырья, содержащего кремний и алюминий с концентрированным щелочным раствором [2, 7]. Исходными материалами выступают промышленные отходы, такие как зола уноса, шлаки различных производств, и кремнеземная пыль. Щелочные жидкости представляют собой концентрированный водный щелочной гидроксид или силикатный раствор с растворимыми щелочными металлами, обычно на основе натрия или калия.

В исследованиях использовались гранулированный доменный шлак ПО «Северсталь», измельченный в струйной мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 2780 \text{ см}^2/\text{г}$, и каменная мука из доломитового и гранитного отсева. Каменную муку получали измельчением отходов дробления каменных материалов в шаровой мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 2600\text{-}2900 \text{ см}^2/\text{г}$. Вяжущее готовили смешением молотого шлака с каменной мукой до однородного состава в шаровой мельнице. Время смешения 2 мин. Каменная мука в вяжущем составляла 10%, 20%, 40%.

В качестве мелкого заполнителя бетонной смеси использовали Сурский песок (речной) с модулем крупности $M_{кр} = 1,5-1,8$. Модуль крупности песка получен по методике ГОСТ на основе ситового анализа.

Крупный заполнитель получен дроблением гранитного щебня фракции 20-40 мм в щековой дробилке до фракции 5-8 мм.

Активатором твердения геополимерной композиции выбраны раствор жидкого стекла (ЖС) плотностью $2,5 \text{ г/см}^3$ и водный раствор гидроксида натрия. Суммарный расход активаторов твердения варьировался в пределах 5-8% в пересчете на сухие вещества от массы тонкомолотого вяжущего. Жидкое стекло и щёлочь смешивались в определенных пропорциях перед испытаниями и выдерживались в закрытой емкости не менее суток, а при введении в бетонную смесь разбавлялись питьевой водой до нужного значения. Проектная марка бетона в возрасте 28 суток М400. Составы, используемые в исследованиях представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Составы геополимерных бетонов

| Индекс состава | Расход материалов на 1 м^3 , кг | | | | | | | | P/B | Осадка конуса, мм |
|----------------|---|-----|-----|------|-----|-----|------|------------------|------|-------------------|
| | Ш | КМД | КМГ | МЗ | КЗ | ЖС | NaOH | H ₂ O | | |
| 0 | 439 | - | - | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 90 |
| 1 | 395 | 44 | - | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 96 |
| 2 | 351 | 88 | - | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 98 |
| 3 | 263 | 176 | - | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 100 |
| 11 | 439 | - | 44 | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 95 |
| 12 | 395 | - | 88 | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 102 |
| 13 | 351 | - | 176 | 1300 | 600 | 103 | 41 | 6,4 | 0,32 | 110 |

Испытания на прочность кубиков размером $100 \times 100 \times 100$ мм после твердения в камере нормального твердения (влажность $90 \pm 5 \%$, температура воздуха $+20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) проводились в возрасте 7, 14 и 28 суток. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

В опытах сравнивалось влияние способа отверждения геополимеров: твердение на воздухе в камере нормального твердения и влияние температурно-влажностного воздействия в камере пропаривания. Для этого образцы после

формовки помещались в камеру для пропаривания и процесс соответствовал режиму: 3 часа выдержка при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; подъем температуры до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 часов; выдержка при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 6 часов и снижение температуры до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 часов, а в дальнейшем образцы твердели в камере нормального твердения.

Таблица 2 – Предел прочности при сжатии образцов в возрасте 7, 14 и 28 суток при твердении в камере нормального твердения.

| Индекс состава | Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте | | | | | |
|----------------|---|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| | 7 суток | | 14 суток | | 28 суток | |
| | $R_{сж}$ | Прирост прочности, % | $R_{сж}$ | Прирост прочности, % | $R_{сж}$ | Прирост прочности, % |
| 0 | 34,7 | 100,00 | 41,0 | 100,00 | 56,5 | 100,00 |
| 1 | 12,3 | 35,45 | 24,4 | 59,5 | 43,0 | 76,1 |
| 2 | 20,8 | 59,94 | 31,1 | 75,85 | 57,8 | 102,3 |
| 3 | 17,5 | 50,43 | 27,9 | 68,05 | 48,2 | 85,3 |
| 11 | 32,2 | 92,8 | 39,8 | 97,07 | 49,5 | 87,6 |
| 12 | 33,6 | 96,83 | 42,4 | 103,4 | 58,8 | 104,1 |
| 13 | 37,8 | 108,93 | 48,9 | 119,27 | 60,3 | 110,7 |

Результаты испытания на прочность представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Предел прочности при сжатии образцов в возрасте 7, 14 и 28 суток при твердении в камере нормального твердения образцов подвергшихся термовлажностной обработке

| Индекс состава | Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте | | | |
|----------------|---|----------------------|----------|----------------------|
| | 14 суток | | 28 суток | |
| | $R_{сж}$ | Прирост прочности, % | $R_{сж}$ | Прирост прочности, % |
| 0 | 36,8 | 100,00 | 54,1 | 100,00 |
| 1 | 27,64 | 75,1 | 42,14 | 77,9 |
| 2 | 29,00 | 78,8 | 54,15 | 100,1 |
| 3 | 25,50 | 69,3 | 48,47 | 89,6 |
| 11 | 36,43 | 99,0 | 48,20 | 89,1 |
| 12 | 41,44 | 112,6 | 62,43 | 115,4 |
| 13 | 46,15 | 125,4 | 68,60 | 126,8 |

Кубики были испытаны на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 дней на гидравлическом прессе. Из анализа результатов исследований (табл. 2) следует,

что геополимерные бетоны при твердении в камере нормального твердения на каменной муке из гранита достигли проектного значения по марке М400, а бетоны с каменной мукой доломитовых пород имеют прочность от контрольного состав 59-78 % в возрасте 14 суток.

В возрасте 28 суток все составы превысили проектную марку и самыми экономичными по расходу доменного шлака оказались составы № 2, 3, 12, 13. Разработанная технология получения геополимерных бетонов обеспечивает утилизацию промышленных отходов и получение продукции с прибавочной стоимостью, причем качество бетонов на основе геополимерного вяжущего не уступает свойствам бетонов на портландцементе.

Образцы бетонов, которые подвергались тепловлажностной обработке, отпускное значение набрали к 14 суткам, а в возрасте 28 суток у всех образцов показатели прочности на сжатие оказались меньше, чем у образцов твердевших весь период в камере нормального твердения. Из интерпретации приведенных выше результатов следует, что прочность геополимерного бетона увеличивается с увеличением процентного содержания каменной муки.

Таким образом, можно сделать выводы:

- получение геополимерного вяжущего с каменной мукой на основе молотых доменных шлаков позволяет получить бетоны с мелкопористой структурой;
- геополимерные бетоны, с различной дозировкой каменной муки в вяжущем и при различных способах отверждения в возрасте 28 суток твердения имели прочность больше проектного значения (40,0 МПа); объясняется это получением оптимальной микроструктуры цементной матрицы;
- геополимерные бетоны на вяжущем с каменной мукой из гранитного отсева являются оптимальными как по темпам набора прочности, так и по пределу прочности на сжатие; оптимальный расход каменной муки в вяжущем составляет 20-40%;

- геополимерный тип вяжущего является более экономичным по сравнению с портландцементом как с точки зрения энергетической, так и с экологической.

Библиографический список:

1. Atis C.D., Ozcan F., Kilic A., Karahan O., Bilim C., Severcan M.H. Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete // Building and Environment, vol. 40, pp. 1678 – 1683, 2005.
2. Jian-Tong Ding and Zongjin Li. Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete //ACI materials journals, vol. 99, pp. 393 – 398, 2002.
3. McCaffrey R. Climate Change and the Cement Industry, Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue), 2002, pp. 15-19.
4. Prokopski G., Langier B. Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes // Cement and Concrete Research, vol. 30 pp.1427 – 1433, 2000.
5. Романенко И.И., Фадин А.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 1 (54). С. 85 - 92.
6. Романенко И.И., Петровнина И.Н. Кинетика набора прочности бетонов на композиционном вяжущем, наполненном молотым доменным граншлаком. Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 598 - 606.
7. Thanongsak N., Watcharapong W., Arnon C. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete, Fuel, vol. 89, 2010, pp. 768–774.
8. Thomas M.D.A., Shehata M.H., Shashiprakash S.G., Hopkins D.S., Cail K. Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete // Cement and Concrete Research, vol. 29, pp. 1207 – 1214, 1999.

9. Фадин А.И., Романенко И.И. Научно-технологические и организационно-технические аспекты производства строительных материалов на основе сталеплавильных шлаков // Бетон и железобетон. 2024. № 2 (621). С. 33-41.
10. Wong H.S., Razak H. Abdul. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance // Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 696– 702, 2005.

Оригинальность 82%