

Исследование влияния минеральных добавок на свойства самоуплотняющегося мелкозернистого бетона

Т.А. Иванова, И.В. Казаков, А.А. Кочева, С.А. Хорьков

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Исследованы составы самоуплотняющегося мелкозернистого бетона с использованием минеральных добавок, таких как микрокремнезём, известняковая мука и трепел, а также поликарбоксилатного суперпластификатора. Основное внимание уделено влиянию состава смеси на прочность при сжатии и изгибе, плотность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона. Результаты испытаний показали, что образцы с микрокремнезёмом демонстрируют повышенную прочность, в то время как введение трепела и известняковой муки снижает этот показатель. Наибольшая плотность и морозостойкость (F600) были достигнуты в составах с микрокремнезёмом, без дополнительных добавок. Работа подчеркивает важность оптимизации зернового состава заполнителей и выбора пластификаторов для улучшения характеристик бетона.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, мелкозернистый бетон, микрокремнезём, поликарбоксилатный суперпластификатор, известняковая мука, трепел, прочность, плотность, морозостойкость, водонепроницаемость.

Введение

В условиях бетонирования густоармированных конструкций рационально использовать мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси [1, 2], для которых важную роль играет не только размер зерен заполнителей, но и их форма. Для обеспечения высокой текучести бетонной смеси целесообразно применение заполнителей округлой сферической формы и наличие химических добавок модификаторов, которые обеспечивают связность и нерасслаиваемость структурированной системы [3].

В данном исследовании были подобраны составы самоуплотняющегося мелкозернистого бетона с введением минеральных добавок и поликарбоксилатного суперпластификатора. В качестве основной минеральной добавки был использован микрокремнезём (рис.1), представляющий собой ультрадисперсный материал, состоящий из частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки технологических электродуговых печей при производстве кремния и ферросилиция. Основным

компонентом материала является диоксид кремния аморфной модификации. По ГОСТ Р 56196-2014 относится к техногенным минеральным добавкам [4,5]. Требования к микрокремнезему приведены в ГОСТ Р 56178-2014.

В работе [4] проведён анализ зернового состава природных песков и выявлено, что замена 30 % природного песка крупными фракциями отсева увеличивает долю и прочных зерен в структуре мелкозернистого бетона и повышает его прочность при сжатии на 15 %, а прочность на растяжение при изгибе — в два раза.

При проведении исследования была подобрана высокоподвижная самоуплотняющаяся бетонная смесь класса SF1. Для высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с эффективными модификаторами поиск оптимального зернового состава заполнителей необходимо выполнять опытным путем по минимальной межзерновой пустотности с учетом технологических особенностей формования [6-8].

Добавки суперпластификаторы на основе поликарбоксилата, благодаря уникальной структуре полимеров позволяют направленно регулировать реологические свойства бетонных смесей и имеют водоредуцирующий эффект [9,10].

Материалы и методы

В данном исследовании использовались следующие материалы:

- Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (производитель – ЦемРос)
- Песок кварцевый фр. 0 - 2,5 мм (производитель – РЕАЛ)
- Вода водопроводная
- Поликарбоксилатный суперпластификатор (производитель – СПБ «АЛИКОНМИКС»)
- Микрокремнезём МКУ – 85 (1), истинная плотность, 2,17 г/см³ (производитель - Кузнецкие Ферросплавы)

- Микрокремнезём МКУ – 85 (2), истинная плотность, 2 г/см^3
(производитель - Казахстан)
- Трепел хотынецкий (производитель – Витафлор)
- Мука известняковая (производитель – ОАО «Буйский химический завод»)

Расчетные экспериментальные составы бетонных смесей, показаны в таблице 1.

Таблица № 1

Расчетные экспериментальные составы бетонных смесей

Наименование материала	1 состав Расход на м^3 , кг	2 состав Расход на м^3 , кг	3 состав Расход на м^3 , кг	4 состав Расход на м^3 , кг
Цемент	450	495	445	445
Вода	270	270	270	270
Песок	1000	1000	1100	1100
Поликарбоксилатный суперпластификатор	7,4	7,4	7,4	7,4
МКУ (1)	67,1	-	-	-
МКУ (2)	-	91,4	91,4	91,4
Известняковая мука	-	-	50	-
Трепел (Хотынецкий)	-	-	-	50



Рис. 1. – Внешний вид микрокремнезема МКУ-85 (1) и (2) разных производителей (авторское изображение)

После выбора материалов и определения их расхода с помощью смесителя принудительного действия были приготовлены бетонные смеси четырёх составов (рис. 2).



Рис. 2. – Внешний вид бетонной смеси (авторское изображение)

Подвижность смесей измерялась при помощи усечённого конуса Абрамса, по методике ГОСТ Р 58002-2017/EN 12350-8:2010, и составляет для первого, второго и третьего состава от 55 до 65 мм, что соответствует классу подвижности для самоуплотняющейся смеси SF 1. При введении трепела подвижность состава бетонной смеси снизилась.

Для всех четырех составов были заформованы образцы-призмы размерами 4x4x16 см в количестве 9 штук для каждого состава, образцы-кубы размерами 10x10x10 см в количестве 4 штуки для каждого состава, образцы-цилиндры диаметром 15 см.

Образцы помещались в камеру нормального твердения. После достижения образцами возраста 28 суток проводились испытания на гидравлическом прессе E160N “CYBER-PLUS EVOLUTION”. Испытания проводили на сжатие и изгиб образцов-балочек и на сжатие образцов-кубов. Средние значения по результатам испытаний представлены в таблице 2 и на

гистограмме – рис. 3. Характер разрушения образцов показан на рис.4.

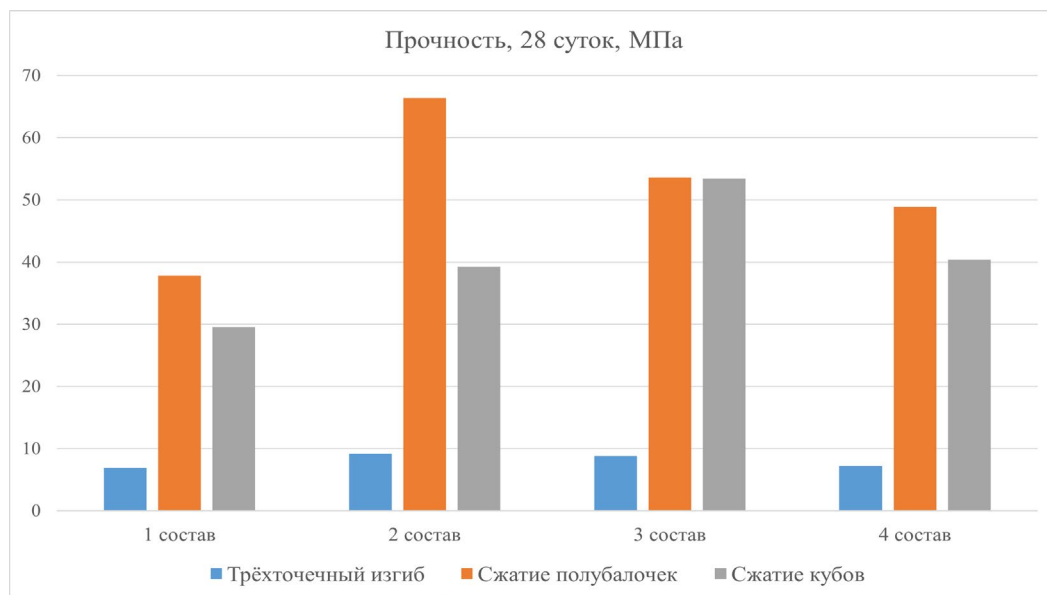


Рис. 3. – Гистограмма распределения результатов прочности

Таблица № 2

Результаты испытаний образцов

Параметры	1 состав	2 состав	3 состав	4 состав
Прочность при изгибе, МПа	6,90	9,18	8,81	7,24
Прочность при сжатии половинок балочек, МПа	37,82	66,37	53,58	48,92
Прочность при сжатии кубов, МПа	29,56	39,27	53,40	40,40

Исходя из результатов гистограммы можно сделать вывод о том, что прочность образцов при изгибе меньше прочности образцов при сжатии; при сжатии у образцов-призм прочность выше, чем у образцов-кубов.



Рис. 4. – Характер разрушения образцов (авторское изображение)

Следует отметить, что часть вышеописанных образцов испытывалась в возрасте 28 суток, часть – в возрасте 56 суток. У образцов возрастом 56 суток прирост прочности не наблюдался.

Также в 1 и 2 составах использовался микрокремнезём (с разных производств). Показатель прочности при одинаковых расходах материалов во 2 составе на 33 % выше при испытании на изгиб (по сравнению с 1 составом), на сжатие образцов (половинок балочек) выше на 75 %, а образцов кубов на 32 %.

В 3 и 4 составах кроме микрокремнезёма вводилась добавка известняковой муки и трепела соответственно. При испытании наблюдалось снижение прочности на 4 и 21 % при изгибе, на 19 и 26 % при сжатии.

Плотность полученного бетонного камня колеблется в границах от 2100 до 2169 кг/м³ (рис. 5). Самая высокая плотность у состава № 1. При повышенном водоцементном соотношении 0,61 наблюдается значительное снижение плотности за счёт испарения не связанной воды. Также вследствие повышенного водоцементного соотношения у 3 и 4 составов в сравнении со 2 составом, показатели прочности понизились.



Рис. 5. Распределение плотности

Водонепроницаемость образцов определялась экспресс-методом, основанном на наличии экспериментальной зависимости между воздухопроницаемостью и водопроницаемостью, определённой по мокрому пятну.

Морозостойкость определялась ускоренным методом, образцы помещались в закрытых ёмкостях, наполненных 5-ти % водным раствором NaCl в морозильную камеру. Температура в камере понижалась до -50°C на 2,5 часа, затем выдерживалась 1,5 часа при температуре -10°C , затем образцы оттаивали в 5-ти процентном водном растворе NaCl 2,5 часа. Марка по морозостойкости принималась с учётом числа циклов, при котором уменьшение массы образцов составляло не более 2 % и отсутствовали трещины и сколы.

Результаты испытаний образцов на морозостойкость и водонепроницаемость, а также плотности образцов бетона приведены в таблице 3.

Таблица № 3

Результаты испытаний образцов на морозостойкость и водонепроницаемость,
плотности образцов

Параметры	1 состав	2 состав	3 состав	4 состав
Марка по морозостойкости	F600	F600	F300	F300
Марка по водонепроницаемости	W20	W20	W10	W14
Плотность, кг/м ³	2169	2140	2121	2100

Заключение

Результаты испытаний на морозостойкость говорят о том, что введение в состав добавок трепела и известковой муки понижают способность бетона выдерживать попеременные циклы замораживания и оттаивания без потери прочностных характеристик: марка по морозостойкости для 3 и 4 составов – F300, для 1 и 2 составов – F600.

Результаты испытаний на водонепроницаемость отражают тот факт, что введение в состав добавок трепела и известковой муки понижают устойчивость бетона к пропусканию влаги под воздействием напора воды (марка по водонепроницаемости для 1 и 2 составов – W20, для 3 и 4 составов – W10 и W14 соответственно).

Литература

1. Касторных Л. И., Тароян А. Г., Усепян Л. М. Влияние отсева камнедробления и минерального наполнителя на характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов // Инженерный вестник Дона, 2017, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340/.

2. Усепян Л. М., Тароян А. Г., Касторных Л. И. Особенности производства железобетонных изделий из высокоподвижных смесей с

отсевами камнедробления // Молодой исследователь Дона, 2017, № 4, С. 90–94.

3. Рауткин А. В., Касторных Л. И. Выбор химических модификаторов для обеспечения растекаемости самоуплотняющихся бетонных смесей // Молодой исследователь Дона, 2017, № 4, С. 118–126.

4. Касторных Л. И., Черепанов В. Д., Березовой В. Э. Оптимизация зернового состава заполнителя для мелкозернистого самоуплотняющегося бетона // Молодой исследователь Дона. 2020. №5 (26) с.40-48.

5. Хежев Т. А., Кажаров А. Р., Журтов А. В., Семенов Р. Н., Желоков Т. Х., Карданов А. А., Ногеров М. Б. Самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны с применением отходов камнедробления // Инженерный вестник Дона. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4018.

6. Харченко И.Я., Баженов Д.А. Эффективный самоуплотняющийся мелкозернистый бетон с компенсированной усадкой // Строительные материалы. 2018. № 5. С. 48–52.

7. Jetpisbayeva A.Zh., Akhmetov D.A., Pukharenko Y.V., Vatin N.I., Akhazhanov S.B., Akhmetov A.R., Uteпов Y.B. The Effect of Low-Modulus Plastic Fiber on the Physical and Technical Characteristics of Modified Heavy Concretes Based on Polycarboxylates and Microsilica. Materials 2022, №15 (2648), 16 p.

8. Akmalaiuly K., Akhmetov D., Jetpisbayeva A., Kim Kwang-Don Effect of fine fillers from industrial waste on the quality of self-compacting concrete. QazBSQA Хабаршысы 2023, №1 (87) p.140-153.

9. Баженов Ю. М., Воронин В. В., Алимов Л. А., Бахрах А. М., Ларсен О. А., Соловьев В. Н., Нгуен Дык В. К. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. №12 с.1385-1391.

10. Касторных Л. И., Хартанович В. В., Шершень Д. Р. Влияние суперпластифицирующей добавки MasterPolyHeed на Основные свойства тяжелого и мелкозернистого бетона // Молодой исследователь Дона. 2020. №4 (25). С.46-55.

References

1. Kastornyh L. I., Tarojan A. G., Usepjan L. M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340/.
2. Usepjan L. M., Tarojan A. G., Kastornyh L. I. Molodoj issledovatel' Dona, 2017, № 4. pp. 90–94.
3. Rautkin A. V., Kastornyh L. I. Molodoj issledovatel' Dona, 2017, № 4. pp. 118–126.
4. Kastornyh L. I., Cherepanov V. D., Berezovoj V. Je. Molodoj issledovatel' Dona. 2020. №5. pp.40-48.
5. Hezhev T. A., Kazharov A. R., Zhurtov A. V., Semenov R. N., Zhelokov T. H., Kardanov A. A., Nogerov M. B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4018
6. Harchenko I. Ja., Bazhenov D. A. Construction materials. 2018. №5. pp. 48–52.
7. Jetpisbayeva A.Zh., Akhmetov D.A., Pukharenko Y.V., Vatin N.I., Akhazhanov S.B., Akhmetov A.R., Utepov Y.B. Materials 2022, №15 (2648), 16 p.
8. Akmalaiuly K., Akhmetov D., Jetpisbayeva A., Kim Kwang-Don QazBSQA Habarshysy 2023, №1. pp.140-153.
9. Bazhenov Yu. M., Voronin V. V., Alimov L. A., Bahrah A. M., Larsen O. A., Solov'ev V. N., Nguen Dyk V. K. Vestnik MGSU. 2017. №12. pp.1385-1391.



10. Kastornyh L. I., Hartanovich V. V., Shershen' D. R. Molodoj issledovatel' Dona. 2020. №4 (25). p.46-55.

Дата поступления: 7.08.2025

Дата публикации: 25.09.25