

Для цитирования: Королев, Е.В. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов [Текст] / Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.И. Альбакасов, А.С. Иноземцев // «Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал». – Москва: ООО «ЦНТ «НаноСтроительство». 2011. №6. С. 32-43.

**Иноземцев А.С., инженер-испытатель НОЦ «Нанотехнологии»,
аспирант ФГБОУ ВПО МГСУ
Королев Е.В., профессор, доктор технических наук, директор НОЦ
«Нанотехнологии»**

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на разработку наномодифицированных высокопрочных легких бетонов конструкционного назначения. Показана возможность создания составов легкого бетона с высокими физико-механическими характеристиками. Получены составы высокопрочных легких бетонов с применением наноразмерных модификаторов, обладающих показателями удельной прочности до 50,0 МПа.

Бетон на цементном вяжущем является одним из распространенных строительных материалов различного назначения, применяемых в промышленном и гражданском строительстве. При этом к бетону предъявляются различные требования по физико-механическим характеристикам. Однако наиболее привлекательным из них является сочетание низкой средней плотности и высокой прочности элементов конструкции.

Существует множество различных строительных материалов с малой средней плотностью, называемые легкими бетонами (пено- и газобетоны, керамзитобетоны, перлитобетоны, полистиролбетоны и т.д.), которые получают за счет обширного воздухововлечения или использования легкого пористого заполнителя.

По существующей классификации [1] легкие бетоны подразделяются на теплоизоляционные, теплоизоляционно-конструкционные и конструкционные (табл. 1). Легкие конструкционные бетоны обладают несомненными положительными качествами – это высокая несущая

* Печатается при поддержке гранта Президента МД-6090.2012.8

способность, удовлетворяющая требования для малоэтажного строительства, и низкая плотность (1100–2000 кг/м³), обеспечивающие небольшой вес строительной конструкции и дополнительную теплоизоляцию. Отметим, что в соответствии с классификацией отношение предела прочности при сжатии к относительной плотности, называемое удельной прочностью, для конструкционных легких бетонов лежит в диапазоне от 8,8 до 29,4 МПа.

Таблица 1

Классификация легких бетонов конструкционного назначения

Назначение бетона	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа		Удельная прочность, МПа*	
		min	max	min	max
Конструкционный	1100	15	–	13,6	–
	1200	15	20	12,5	16,7
	1300	15	30	11,5	23,1
	1400	15	35	10,7	25,0
	1500	15	40	10,0	26,7
	1600	15	45	9,40	28,1
	1700	15	50	8,80	29,4
	1800	20	50	11,1	27,8
	1900	25	50	13,2	26,3
	2000	25	50	12,5	25,0

Примечание: удельная прочность используется для оценки технической эффективности строительных материалов, рассчитывается по формуле: $R_{уд} = R_{сж} / \rho_{отн}$, где $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа, $\rho_{отн}$ – относительная плотность.

Как правило, из такого бетона производится блочная продукция различная по типоразмерам. При этом конструкции из бетона с большой открытой пористостью требуют дополнительной внешней отделки вследствие низкой морозостойкости.

Очевидно, что для расширения области применения легких бетонов в промышленном и гражданском строительстве необходима разработка новых составов бетонов, обеспечивающих высокий показатель удельной прочности. При строительстве высотных зданий, большепролетных сооружений или иных ответственных объектов применяются высокопрочные и особовысокопрочные бетоны. В соответствии с [2] высокопрочные бетоны характеризуются классом по прочности при сжатии не ниже В45 (или М600), а особовысокопрочные – не ниже М1000. При этом удельная прочность таких бетонов будет 25,0-40,0 МПа и более

45,0 МПа соответственно. Поэтому проектирование составов легких бетонов должно ориентироваться на сопоставимые с вышеуказанными показателями технической эффективности. Добиться таких результатов возможно с помощью применения нанотехнологии.

Анализ литературных данных [3...5] и патентный поиск [6...9] показали, что для получения бетонов с низкой плотностью целесообразно использовать стеклянные или керамические микросферы. Применение таких наполнителей позволяет получить составы с плотностью до 800 кг/м³, а прочностные характеристики сильно варьируются в зависимости от степени наполнения и достигают показателей 40-45 МПа. Однако составов, сочетающих низкую среднюю плотность и высокую прочность не описано. Так, по [3, 8] максимальные показатели удельной прочности составляют 26,0-34,0 МПа, что позволило реализовать составы таких легких бетонов при строительстве мостов через реку Волга и Вятка.

На основании вышеизложенного была поставлена цель по разработке составов и технологии изготовления высокопрочных легких бетонов на основе минеральных вяжущих веществ, для достижения которой сформулированы следующие задачи:

- разработка составов высокопрочных бетонов;
- разработка составов легких бетонов на основе полых микросфер;
- выбор наноразмерного модификатора полых микросфер для наполнения легких высокопрочных бетонов;

По результатам проделанной работы были сформулированы некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов [10] и получен состав высокопрочных бетонов с показателем предела прочности при сжатии до 130 МПа ($R_{yd} = 57,2$), который послужил основой для проектирования легких бетонов с применением полых микросфер.

Для расчета количества наполнителя (полых микросфер), введение которых обеспечивает получение бетона заданной средней плотности предложена зависимость:

$$\rho_o = \frac{\rho_b}{k + 1},$$

где ρ_b – базовая плотность бетонной смеси, кг/м³; ρ_o – плотность облегченной бетонной смеси, кг/м³; k – коэффициент изменения плотности бетонной смеси.

Очевидно, что для получения бетонной смеси с меньшей плотностью необходимо заменить в базовом составе более плотные компоненты на микросферы. Исходя из этого, количество наполнителя (кг) на 1 м³ смеси будет равно:

$$M_H = \frac{\rho_0 - \rho_o}{\rho_3 - \rho_H} \cdot \rho_H,$$

где ρ_3 – плотность компонента, кг/м³; ρ_H – плотность наполнителя, кг/м³.

Отметим, что в многокомпонентных системах объемной степени наполнения одного из компонентов, который требуется заменить, может быть не достаточно для достижения новой плотности, поэтому при расчете ρ_3 необходимо учитывать вклад всех компонентов

$$\rho_3 = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i,$$

где i – количество компонентов в бетонной смеси, ρ_i – плотность i -го компонента, кг/м³, v_i – объемная доля наполнения i -го компонента.

Тогда доля, на которую необходимо уменьшить содержание каждого из заменяемых компонентов, составила:

$$\Delta v_i = \frac{v_i \cdot v_H}{v_i + v_H},$$

где v_i – объемная доля наполнения i -го компонента, $v_H = M_H / \rho_H$ – объемная доля наполнения полых микросфер.

Отсюда объемное содержание всех компонентов легкого бетона можно рассчитать по следующим формулам:

$$v_i^H = v_i^B - \Delta v_i \quad \text{– содержание заменяемого компонента;}$$

$$v_H = \frac{M_H}{\rho_H} \quad \text{– содержание микросфер.}$$

При этом содержание вяжущего вещества, очевидно, должно оставаться неизменным, а расход воды будет зависеть от смачиваемости поверхности нового компонента.

На основе разработанного алгоритма рассчитан состав легкого бетона со средней плотностью 1400 кг/м³ и получен базовый показатель прочности при сжатии с использованием стеклянных полых микросфер, который составил 54,0-58,0 МПа, что соответствует удельной прочности **38,5-41,4 МПа**.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения полых стеклянных микросфер для получения высокопрочных легких бетонов. Кроме того, высокий показатель удельной прочности позволяет сформулировать гипотезу о возможности повышения физико-механических характеристик по средствам модифицирования компонентов разработанных составов бетона или введения дисперсно-армирующей добавок. При этом прослеживается перспектива получения составов особовысокопрочных легких бетонов с показателем технической эффективности более 50 МПа!

Таблица 2

Удельная прочность наномодифицированных легких бетонов

№ п/п	Наименование модификатора	$R_{уд}$, МПа
1.	Углеродные нанотрубки	50,1
2.	Астралены	40,8
3.	Золь гидроксида железа	45,4
4.	Комбинированный модификатор на основе золь гидроксида железа и золь кремниевой кислоты	48,9

Предварительные исследования по выбору модификатора для высокопрочных легких бетонов, в качестве которых рассматривались углеродные нанотрубки, астралены, золь гидроксида железа и комбинированный модификатор на основе золь гидроксида железа и золь кремниевой кислоты, показали, что модифицирование микросфер наноразмерными добавками позволяет увеличить удельную прочность легких бетонов на 15 – 85% в зависимости от расчетной плотности бетона.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что из рассмотренных модификаторов, наилучшими показателями удельной прочности обладают составы с применением углеродных нанотрубок и комбинированный модификатор на основе золь гидроксида железа и золь кремниевой кислоты. Однако для окончательного выбора наномодификатора необходимо провести исследования, направленные на установление закономерностей влияния рецептурных и технологических факторов на свойства бетона, а также их оптимизацию и оценку экономической эффективности.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. В качестве наполнителя для высокопрочных легких бетонов можно использовать полые микросферы. При этом минимально достижимая средняя плотность легких бетонов будет ограничиваться истиной плотностью самого наполнителя.
2. Стекланные полые микросферы способны обеспечивают высокую прочность и низкую среднюю плотность высокопрочных легких бетонов.
3. Для увеличения прочностных характеристик легких бетонов на основе полых микросфер могут быть использованы как углеродные наноразмерные модификаторы, так модификаторы на основе коллоидных растворов. Эффективность таких модификаторов зависит от индивидуальных параметров добавки, способа нанесения и концентрации.
4. Применение наноразмерных модификаторов позволяет получить легкие бетоны на полых стекланных микросферах с удельной

прочностью более 50,0 МПа, что позволяет классифицировать их как особовысокопрочные легкие бетоны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 25820-2000 «Бетоны легкие. Технические условия».
2. «Рекомендации по технологии изготовления и конструкций из высокопрочных бетонов», Москва, 1987 г.
3. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал, №6, 2009, с. 25–33.
4. Кишиневская Е.В., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Перспективы применения нанобетона в монолитных большепролетных ребрестых перекрытиях с постнапряжением // Инженерно-строительный журнал, №2, 2009, с. 54–58.
5. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы. 1. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и армирующей фибры // Строительные материалы, №6, 2007.
6. Пат. 2154619 РФ, МПК С04 В 38/08. Легкий бетон / Котляров В.Д., Шуйский А.И. и др. – Оpubл. 20.08.2000.
7. Пат. 2419647 РФ, МПК С09 К 8/473. Облегчающая добавка для цементных смесей и способы ее получения / Ермаков А.А., Цыпкин Е.Б. и др. – Оpubл. 27.05.2011.
8. Пат. 2355656 РФ, МПК С04 В 28/02. Бетонная смесь / Пономарев А.Н., Юдович М.Е. и др. – Оpubл. 20.05.2009.
9. Пат. 2448999 РФ, МПК С09 К 8/467. Облегченный изоляционный тампонажный материал / Кохан К.В., Чугуева О.А. и др. – Оpubл. 27.04.2012.
10. Королев Е.В., Смирнов В.А., Альбакасов А.И., Иноземцев А.С. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов // Интернет-журнал Нанотехнологии в строительстве, №6, 2011, с. 32-44.