

Для цитирования: Иноземцев, А.С. Экономические предпосылки внедрения высокопрочных легких бетонов [Текст] / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Журнал «Научно-технический вестник Поволжья» – Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья». 2012. №5. С. 198-205.

Иноземцев А.С., аспирант кафедры ТВВиБ

Научный руководитель –

Королев Е.В., доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ*

Развитие промышленности, информационных технологий и стремление к повышению комфорта заставляет людей во всем мире мигрировать в города, покидая сельские территории. Так, по данным Росстата [1] с 1959 года по 2010 год численность сельского населения в России сократилось с 48 до 26%, т.е. за 50 лет более 100 млн. человек стали проживать в городах. Безусловно, в ситуации, когда около $\frac{3}{4}$ населения являются городскими жителями, возникает вопрос рационального использования территорий, возрастает необходимость строительства многоэтажных и высотных зданий, сети дорожных развязок, мостов. Потребность увеличения высоты зданий, ширины пролетов и т.д. приводит к повышению требований к строительным материалам по прочности, плотности, долговечности, а также к сохранению размеров сечений конструкций и сокращению сроков набора эксплуатационных свойств. Для решения этой проблемы во всем мире используются особовысококачественные бетоны – бетоны, обладающие высокой прочностью, а бетонные смеси высокой подвижностью.

Определение высокопрочного бетона дано в [2], в котором указано, что под высокопрочными следует понимать бетоны марки по прочности при сжатии более М600 (В45). Но универсальной общемировой формулировки не существует и определение высокопрочного бетона меняется по географическому и временному признаку. Например, в США [3] в 1960-х годах высокопрочным считался бетон с прочностью свыше 52 МПа, с 1970 года – более 62 МПа, а в тех регионах, где бетон класса В45 производится в промышленных масштабах, высокопрочными бетонами называют материалы с прочностью от 83 до 103 МПа. В Японии различные регламентирующая документация [4] называют высокопрочными бетоны с прочностью более 36 МПа, более 50 МПа или – в пределах от 60 до 100 МПа.

Наиболее известным опытом применения высокопрочных бетонов в России является строительство Московского международного делового центра «Москва-Сити» [2, 3], где использовался бетон с классом по прочности В80...В100 и подвижностью П4...П5. Высокопрочный бетон марки М800 применялся при строительстве вантового моста во Владивостоке, соединяющий полуостров Назимова с мысом Новосильского на острове Русский (рис. 1). Применение такого бетона позволило создать конструкцию

* Печатается при поддержке гранта Президента РФ МД-6090.2012.8.

крупнейшего вантового моста, где длина центрального пролета составляет 1104 м, а высота каждого из двух пилонов – 320 м.

Зарубежный опыт применения высокопрочного бетона известен еще в середине XX века [4]. Например, в Чикаго бетон прочностью выше 50 МПа применяли уже в 1965 году при строительстве Lake Point Tower. С 1988 по 1995 по проекту французского инженера Мишеля Вирложа при строительстве вантового моста Нормандии во Франции понадобилось 35 000 м³ высокопрочного бетона прочностью 60 МПа, который использовался для возведения двух 215-метровых пилонов, основание одного из которых устроено в русле реки Сены, и консольных балок [5]. Бетон прочностью до 80 МПа использовался при строительстве двух башен Петронас в Куала-Лумпур Малайзия для локального бетонирования участков в центральном ядре, периметра колонн и несущего кольца в основании (рис. 2).



Рис. 1. Применение высокопрочного бетона при строительстве пилон вантового моста на остров Русский



Рис. 2. Строительство башен Петронас в Куала-Лумпур из высокопрочного бетона

Отметим, что вышеперечисленные строительные объекты, где применялись высокопрочные бетоны с прочностью более 60 МПа, являются тяжелыми бетонами и обладают средней плотностью 2100-2500 кг/м³. Очевидно, что для достижения требуемых архитектурных и конструктивных свойств зданий и сооружений требуется обеспечить высокую несущую способность оснований и фундаментов или сократить вес конструктивных элементов, сохранив прочностные показатели.

Снижение веса здания можно достичь заменой тяжелых строительных материалов на менее плотные. Для этого в качестве ограждающих конструкций могут использоваться легкие бетоны, которые бы обеспечили хорошую тепло- и звукоизоляцию, существенно уменьшив нагрузку на несущие элементы.

Легкими бетонами в соответствии с [9] принято называть бетоны со средней плотностью менее 2000 кг/м³. Преимуществом изделий из таких бетонов является не большой вес и низкая теплопроводность. Как правило, применение легких бетонов из-за невысокой прочности ограничивается строительством слабонесущих и ограждающих конструкций. Однако, сочетание низкой плотности, характерной для легких бетонов, и высокой прочности, присущей высокопрочным бетонам, позволяет значительно расширить область применения легких бетонов. Применение такого материала обеспечивает здания и сооружения с одной стороны требуемыми прочностными свойствами, а с другой стороны позволяет существенно экономить на общем весе.

Для оценки технической эффективности применения строительных материалов зачастую используется показатель удельной прочности, характеризующий величину предела прочности при сжатии на единицу относительной плотности. Для высокопрочных бетонов удельная прочность $R_{уд} \geq 25$ МПа. Таким образом, решение

выше обозначенной проблемы достигается применением легких бетонов, обладающих удельной прочностью более 25 МПа.

Отечественные и зарубежные разработки, направленные на увеличение физико-механических характеристик легких бетонов, уже реализованы в строительстве.

В 2007 году в работе [10] описаны составы высокопрочного легкого бетона на керамзитовом наполнителе с маркой по плотности D1800, а показатель технической эффективности варьируется от 25,5 до 47,2 МПа. Пономаревым А.Н. разработаны составы нанобетона [11, 12], которые успешно апробированы при реконструкции моста через р. Волга в г. Кимры. Использование в составе базальтового микроволокна (длина 500 мкм, диаметр 10 мкм), модифицированного полиэдральными многослойными углеродными наноструктурами фуллероидного, типа позволило получить составы бетона, наполненные полыми алюмосиликатными микросферами, со средней плотностью 1630...1680 кг/м³ и пределом прочности при сжатии 42,7...46,9 МПа. При этом удельная прочность таких бетонов составляет 25,4...28,7 МПа. Бразильские ученые [13] в 2003 году предложили составы более высокопрочного легкого бетона на местных заполнителях. При расходе цемента от 440 до 710 кг/м³ через 28 дней естественного твердения прочность при сжатии бетона варьировалась от 39,5 до 53,6 МПа, а плотность от 1460 до 1605 кг/м³, соответственно, т.е. $R_{уд}$ составила 24,6...30,7 МПа. В Японии [14] в связи с ростом автомобильного трафика реконструировали мост с целью снижения нагрузки на металлические конструкции, используя дорожные плиты с удельной прочностью 27,1...30,3 МПа (средняя плотность 1810-1850 кг/м³).

Как видно, опыт ученых из разных стран свидетельствует о том, что высокие значения удельной прочности достижимы в верхних границах плотностей легких бетонов при $\rho_{ср} \geq 1800$ кг/м³. При дальнейшем снижении плотности показатель технической эффективности не превышает 30 МПа.

Исходя из этого разработка составов высокопрочных легких бетонов с удельной прочностью более 30 МПа является актуальной задачей для современного строительного производства.

В лабораториях НОЦ «Нанотехнологии» МГСУ разработаны составы энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных легких бетонов. Состав предлагаемого бетона включает вяжущее, минеральную часть, наномодифицированный наполнитель, пластифицирующую добавку и воду. В качестве вяжущего вещества используется портландцемент марки ПЦ500 Д0, соответствующий ГОСТ 30118-2003. Минеральная часть состоит из кремнеземистых заполнителей, отличающихся по дисперсному составу, обеспечивающих образование плотного каркаса за счет заполнения пустот между наполнителем. В минеральную часть входит: фракционированный кварцевый песок фр. 0,16-0,63 мм, каменная мука (продукт измельчения кварцевого песка или другой горной породы, содержащей кремнезем) с площадью удельной поверхности 700-800 м²/кг и микрокремнезем, имеющий средний размер частиц 0,01-1 мкм. Наполнителем, определяющим плотность бетонной смеси, являются полые стеклянные или алюмосиликатные микросферы, поверхность которых модифицирована добавкой, содержащей наноразмерный комплекс. Модификатор получается по трехэтапной золь-гель технологии, включающей перевод истинного раствора в коллоидный с последующей стабилизацией. Вид наполнителя, его дисперсный состав и свойства будут оказывать влияние на его процентное содержание в составе бетона. Для снижения водопотребности и увеличения подвижности смеси состав включает пластифицирующую добавку на поликарбоксилатной основе. Соотношение составных частей бетона определяется требуемыми физико-механическими показателями изделия и проектируется для каждой марки по плотности индивидуально.

Оптимизированные составы энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных легких бетонов позволяют получать состав любой марки по плотности, получая как облегченный бетон, так и легкий бетон со средней плотностью менее 2000 кг/м³.

Очевидно, что определяющим фактором для физико-механических свойств бетона является наполнитель (полые микросферы). Их содержание позволяет регулировать плотность бетона, а также его прочность посредством регулирования плотности упаковки каркаса частиц. Прочность бетона будет зависеть от прочности оболочки микросфер и прочности цементно-минеральной матрицы, обволакивающей частицы наполнителя. Для увеличения прочности оболочки полых микросфер предлагается использовать комплексный наноразмерный модификатор. Образуя кремний-кислородный каркас, выступающий стабилизатором наночастиц гидроксида переходного элемента, на поверхности микросфер, модификатор создает вторичную оболочку, схожую по составу с материалом носителя.

Получены составы высокопрочных легких бетонов со средней плотностью 1300...1400 кг/м³ и определены базовые показатели прочности при сжатии с использованием стеклянных и алюмосиликатных полых микросфер, которые составили значения в диапазоне 40,0...65,0 МПа. Удельная прочность таких составов варьируется от 30,0 до 45,0 МПа.

Применение разработанного наномодификатора для поверхностной обработки полых стеклянных или алюмосиликатных микросфер в составах высокопрочных легких бетонов приводит к увеличению прочности не менее 25%, что позволяет увеличить удельную прочность композита до 35,0...55,0 МПа.

Таблица

Некоторые параметры энергоэффективного наномодифицированного высокопрочного легкого бетона

| Наименование показатель | Значение |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Средняя плотность, кг/м ³ | 1300...1400 |
| Предел прочности при сжатии, МПа | 40,0...65,0 |
| Удельная прочность, МПа | 35,0...55,0 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К | менее 0,60 |
| Коэффициент температуропроводности, ·10 ⁻⁷ м ² /с | менее 5,00 |
| Удельная теплоемкость (при T=25°C), кДж/кг·К | 0,80...1,15 |

Таким образом, получены составы энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных легких бетонов с высоким показателем технической эффективности $R_{уд} \geq 30$ МПа, что позволяет существенно расширить область применения легких бетонов. Такие бетоны позволяют более чем на 40% уменьшить нагрузку на конструкционные элементы здания, сохранить несущие характеристики и улучшить теплофизические свойства (таблица).

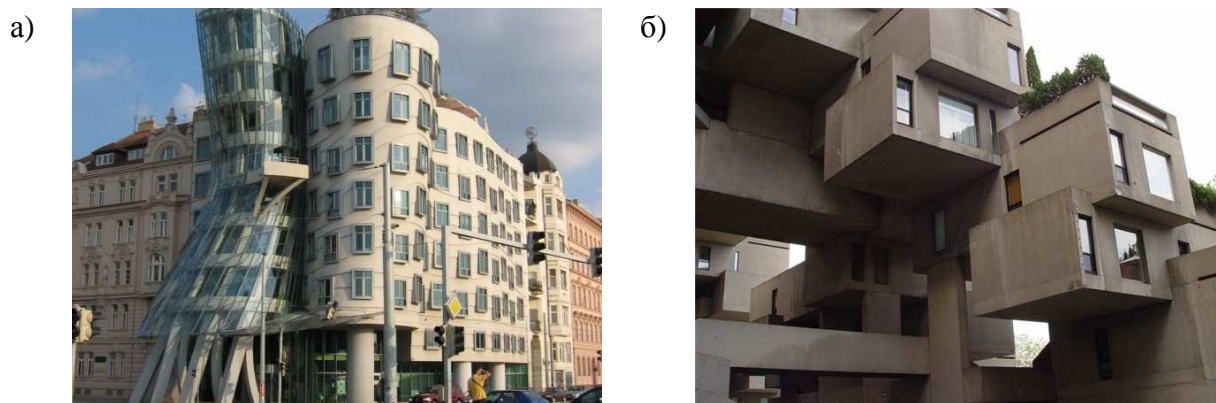


Рис. 3. Фотографии зданий со сложной архитектурой:
 а – «Танцующий дом» (Прага, Чехия), б – Жилой комплекс Хабитат (г. Монреаль, Канада)

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о перспективности разработки составов высокопрочных легких бетонов с высоким показателем удельной прочности, которые найдут применение при изготовлении изделий в гражданском и промышленном строительстве, монолитном строительстве, при возведении сооружений специального назначения. Использование предлагаемых бетонов как материала конструкционного назначения с высоким показателем физико-механических и теплофизических свойств обеспечивает эффективность применения такого бетона не менее 30%. При этом в процессе эксплуатации здания энергопотребление сокращается более чем на 45%.

Снижение веса конструктивных элементов зданий позволит решать сложные архитектурные задачи (рис. 3) и расширит область применения легких бетонов при строительстве многоэтажных и высотных зданий, возведении большепролетных сооружений, устройстве сложных строительных объектов, где применение высокоплотных материалов не возможно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Россия в цифрах – 2012 г. // Федеральная служба государственной статистики, URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b11_11/IssWWW.exe/Stg/d1/05-01.htm (дата обращения: 21.08.2012)
2. «Рекомендации по технологии изготовления конструкций из высокопрочных бетонов, разработанными НИИЖБ и НИИСК», Москва, 1987, с. 53.
3. American Concrete Institute, «State-of-the-Art Report on High Strength Concrete», ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1997.
4. Kawai T. State of the art report on high-strength concrete in Japan. Recent developments and applications, 2007, С. 87-107.
5. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Ромкин Д.С. и др. Результаты исследования физико-механических и реологических характеристик высокопрочного бетона // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт, №1-21, 2009, С. 28-37.
6. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И. и др. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружения ММДЦ «Москва-Сити» // Строительные материалы, №10, 2006, С. 13-18.
7. Benedict T. Laogan, S. Elnashai. Structural performance and economics of tall high strength RC building in seismic regions the structural design of tall building // Struct. Design Tall Build, №8, 1999, P. 171–204.

8. Bimson D. T. O. A critical analysis of the pont de Normandie cable-stayed bridge, Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007.
9. ГОСТ 25820-2000 «Бетоны легкие. Технические условия».
10. Андрианов А.А. Состав, ползучесть высокопрочного легкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе / Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. – 15 с.
11. Пат. 2355656 С2 РФ, МПК С04В28/02. Бетонная смесь / Пономарев А.Н., Юдович М.И. - Оpubл. 20.05.2009. – 3 с.
12. Фиговский О.Л., Бейлин Д. А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительстве // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2012. № 3. С. 6–22.
13. Rossignolo JA, Agnesini MVC, Morais JA. Properties of highperformance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. Cem. Con. Compo., 25. 2003. P. 77-82.
14. Technical Report Ishikawajimaharima // Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength, Vol.44, №.2, 2004-3. P. 83-90.