

Для цитирования: Иноземцев А.С., Королев Е.В. Динамика развития высокопрочных лёгких бетонов. Анализ мировых достижений // Международный научно-исследовательский журнал = Research journal of international studies, 2013. – №12-1 (19). – С. 87-94.

Иноземцев А.С.¹, Королев Е.В.²

¹инженер-испытатель; ²доктор технических наук, профессор, директор
НОЦ «Нанотехнологии», ФГБОУ ВПО «Московский государственный
строительный университет»

**ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЁГКИХ
БЕТОНОВ. АНАЛИЗ МИРОВЫХ ДОСТИЖЕНИЙ**

Аннотация

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, полые микросферы, нанотехнологии, энергоэффективный бетон, эффективное строительство.

Inozemtcev A.S.¹, Korolev E.V.²

¹engineer; ²doctor of engineering, professor, director of the research and
educational center «Nanotechnology», National Research University Moscow
State University of Civil Engineering

highstrength lightweight concrete. analysis of world achievements

Abstract

Keywords: high-strength lightweight concrete, hollow microspheres, nanotechnology, energy efficient concrete, efficient construction.

Развитие промышленности, информационных технологий и стремление к повышению комфорта заставляет людей во всем мире мигрировать в города, покидая сельские территории. Так в России, по данным Росстата [1], с 1959 года по 2010 год численность сельского населения 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.

Строительная отрасль, как фондообразующая неотъемлемая часть промышленного комплекса России, является одним из инструментов для решения поставленных задач и должна ориентироваться на развитие новых инновационных и энергоэффективных технологий. Использование современных конструкторских решений и новейших строительных материалов с применением разработок в области нанотехнологии должны обеспечивать интенсивный переход к высокотехнологичному строительному производству.

Одним из самых распространенных строительных материалов является бетон, который получил широкое распространение благодаря своим эксплуатационным свойствам, универсальностью доступной сырьевой базой и экологичностью. Сфера применения бетона определяется его архитектурно-строительными свойствами, технологическими особенностями производства, наличием местного сырья и требуемыми эксплуатационными характеристиками. В современном строительстве бетон применяется почти на всех этапах возведения здания: устройство фундаментов, несущих монолитных или сборных ограждающих конструкций, плит покрытия и систем коммуникаций.

В настоящее время в строительстве существует множество видов бетонов, которые классифицируются по плотности, виду вяжущего и области

применения, но наиболее распространенным (более 60% всего производства [3]) является конструкционный тяжелый бетон на портландцементе. Тяжелый бетон характеризуется высокой плотностью 2100...2500 кг/м³, что обеспечивает высокую несущую способность и позволяет использовать в условиях больших эксплуатационных нагрузок.

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 регламентирующая документация [4] называют высокопрочными бетоны с прочностью более 36 МПа, более 50 МПа или – в пределах от 60 до 100 МПа.

Со второй половины XIX века, когда бетон получил массовое распространение в связи с развитием производства портландцемента, современные бетоны претерпели значительные изменения, как в технологии приготовления, так и в показателях эксплуатационных свойств. Многокомпонентность бетонных смесей стала основой высокого качества и надежности композита. Растущие архитектурные и строительные требования к зданиям потребовали создания бетонов, способных обеспечивать особые свойства: высокая прочность для обеспечения несущих характеристик многоэтажных зданий, низкая плотность для снижения массы строительных конструкций, стойкость к действию эксплуатационных факторов (агрессивные среды, циклические воздействия температур и нагрузок различной интенсивности и т.д.) для повышения долговечности. Одним из

таких бетонов, получившим в настоящее время широкое распространение является высокопрочный бетон.

Наиболее наглядными примерами использования высокопрочных бетонов в строительной практике можно назвать высотные объекты в США (рисунок 1) [5].

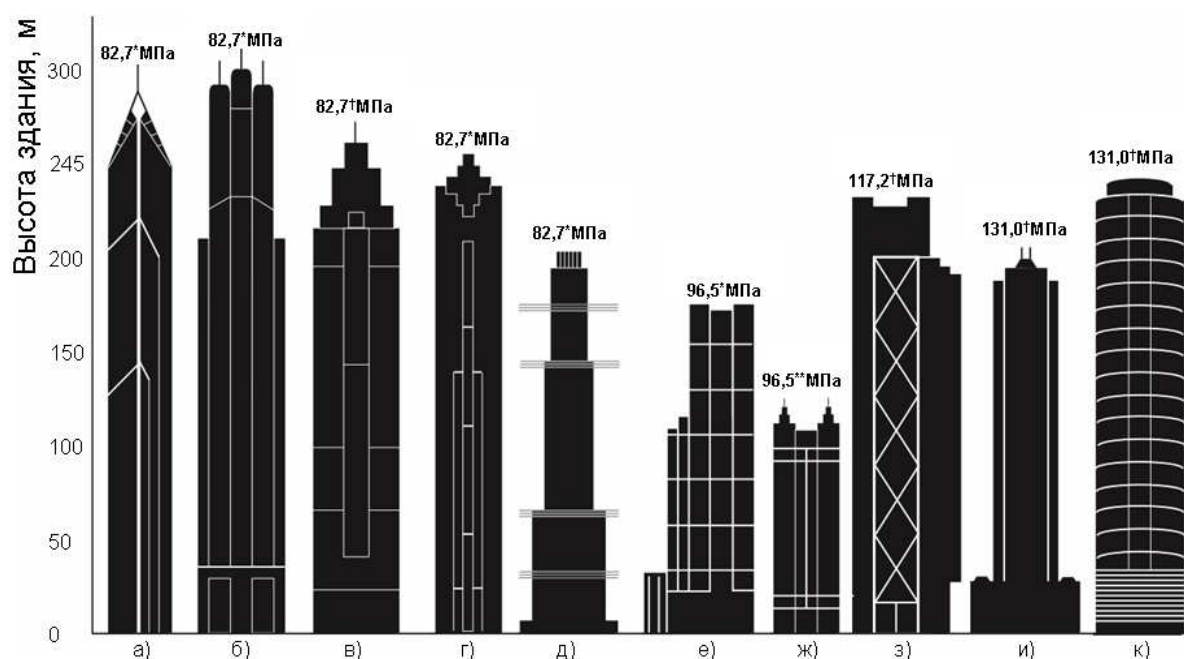


Рисунок 1 – Опыт применение высокопрочных бетонов в строительстве высотных зданий в США в 1989...1991-х годах:

а – «Two Prudential Plaza», Чикаго; б – «311 South Wacker Drive», Чикаго; в – «Society center», Клеверленд; г – «One Peachtree Center», Атланта; д – «Trump Palace», Нью-Йорк; е – «Drain Bosworth Tower», Миннеаполис; ж – «225 West Wacker Drive», Чикаго; з – «Gateway Tower», Сиэтл; и – «Pacific First Center», Сиэтл; к – «Two Union Square», Сиэтл.

Примечания: * – с применением железобетонного каркаса; † – с применением композитного бетона и металлического каркаса; ** – с применением экспериментальной колонны прочностью 117,2 МПа

Как видно из рисунка 1, опыт применение высокопрочных бетонов в строительстве высотных зданий в США имелся уже в конце 80-х годов XX века. Причем строительство зданий осуществлялось с использованием бетона прочностью более 80 МПа, что позволило возводить объекты высотой до 300 м. Применение высокопрочных бетонов позволяет добиться уменьшения

поперечного сечения изделий (колонн, ригелей, балок и других несущих элементов конструкций); увеличения несущей способности, позволяющей увеличивать длину пролетов конструкций; сокращения расхода бетона и арматуры, экономии на транспортных расходах; уменьшения сроков производства работ при ускорении процессов твердения; повышения эксплуатационных свойств при высокой плотности. Востребованность многоэтажных зданий обуславливалась растущей плотностью населения и необходимостью рационального использования городских территорий, что привело к развитию производства и применения высокопрочного бетона. Однако существенным недостатком таких объектов является чрезмерные нагрузки на фундаменты и грунты, что требовало больших затрат на подготовительных работах, устройство нулевого цикла объектов и высокой металлоёмкости строительства, несмотря на наличие прочных скальных грунтов.

Наиболее известным опытом применения высокопрочных бетонов в России является строительство Московского международного делового центра «Москва-Сити» [2, 7], 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 (рисунок 2). Применение такого бетона позволило создать конструкцию крупнейшего вантового моста, где длина центрального пролёта составляет 1104 м, а высота каждого из двух пилонов – 320 м.

Европейский опыт применения высокопрочного бетона известен ещё в середине XX века [8]. 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 Вирложе при строительстве вантового моста Нормадии 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 [9]. 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 (рисунок 3).



Рисунок 2 – Применение высокопрочного бетона при строительстве пилон вантавого моста на остров Русский



Рисунок 3 – 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.

Большая несущая способность и общедоступность высокопрочного бетона, несомненно, позволяют широко применять его при строительстве зданий и сооружений различной сложности. Но увеличение высотности зданий, пролетов несущих конструкций требуют особого подхода к основаниям, прочность которых должна быть достаточно для возведения спроектированного объекта. При строительстве небоскребов по мере

увеличения этажности растет нагрузка на более низкие этажи, поэтому прочность и вес конструкций должен снижаться. В связи с этим целесообразно использовать высокопрочные бетоны в ответственных несущих конструкциях, а ограждающие элементы здания выполнять из более лёгких материалов.

Снижение веса здания можно достичь заменой тяжелых строительных материалов на менее плотные. Для этого в качестве ограждающих конструкций могут использоваться лёгкие бетоны, которые бы обеспечили хорошую тепло- и звукоизоляцию, существенно уменьшив нагрузку на несущие элементы. Применение лёгкого бетона снижает трудозатраты при строительстве, уменьшает расходы на транспортные, погрузочно-разгрузочные и другие сопутствующие работы, а также снижает требования к теплоизоляционным работам для ограждающих конструкций. Эффективность применения лёгких бетонов составляет не менее 40%.

Кроме того, существующие недостатки лёгких бетонов осложняют их промышленное применение. Во-первых, высокая вариативность плотности и прочности пористого заполнителя затрудняет обеспечение стабильности технологического процесса. Во-вторых, пористый заполнитель поглощает воду из бетонной смеси вследствие формирования капиллярно-плотной оболочки вокруг ядра, что приводит к недостатку воды и требует увеличения водоцементного отношения. В-третьих, увеличение содержания воды в бетонной смеси приводит к ее расслоению, связанной с всплытием пористого заполнителя на поверхности в низковязких системах.

Развитие технологии лёгких бетонов обеспечивает разработку составов, обладающих высокой прочностью и низкой средней плотностью. Такой эффект достигается за счёт использования пористого наполнителя и/или применения наноразмерных модификаторов. Зарубежный и отечественный опыт по разработке высокопрочных лёгких бетонов показывает, что наилучшие результаты в этом направлении получены при использовании

новых наполнителей – полых микросфер [10]. В настоящее время применение микросфер ориентировано в основном для улучшения или модификации свойств материалов на основе различных полимеров [11...15]. В последнее время микросферы все больше используются в нефтегазодобывающей и строительной отрасли при производстве цементосодержащих строительных материалов: тампонажных растворов, наливных полов, кладочных растворах и так далее. Использование полых микросфер в строительных материалах позволяет обеспечивать требуемые параметры физико-механических свойств за счёт высокой прочности материала стенки, близкой к идеальной сфере формой частиц, не большим и однородным фракционным составом и низкой плотности.

Лёгкими бетонами в соответствии с [16] 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 лёгких бетонов из-за невысокой прочности ограничивается строительством слабонесущих и ограждающих конструкций. Однако, сочетание низкой плотности, характерной для лёгких бетонов, и высокой прочности, присущей высокопрочным бетонам, позволяет значительно расширить область применения лёгких 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.

$$R_{уд} = \frac{R_{сж}}{\rho_{отн}}, \quad (1.2)$$

где $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа, $\rho_{отн}$ – относительная плотность.

Для высокопрочных тяжелых бетонов удельная прочность $R_{уд} \geq 25$ МПа. Таким образом, решение выше обозначенной проблемы достигается применением лёгких бетонов, обладающих удельной прочностью более 25 МПа.

Исследователи во всем мире стремятся создать такой универсальный материал как высокопрочный лёгкий бетон (ВПЛБ). Мировой опыт показывает, что добиться высокой удельной прочности лёгких бетонов можно за счёт использования особопрочных заполнителей, оптимизации и подбора компонентов каркасообразующей составляющей и/или за счёт применения наномодификаторов. Отечественные и зарубежные разработки, направленные на увеличение физико-механических характеристик лёгких бетонов, уже реализованы в строительстве.

Так, в 2007 году в работе [17] описаны составы высокопрочного лёгкого бетона на керамзитовом наполнителе с маркой по плотности D1800 и удельной прочностью от 25,5 до 47,2 МПа. Пономаревым А.Н. разработаны составы нанобетона [18, 19], 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 [20] в 2003 году предложили составы более высокопрочного лёгкого 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, $R_{уд}$ составила 24,6...30,7 МПа. В Японии [21] 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).

Анализ научной литературы [22...26] показывает, что создание высокопрочных лёгких бетонов возможно с использованием полых микросфер. Керамические или стеклянные полные микросферы имеют плотность от 300 кг/м³, что позволяет регулировать плотность лёгкого бетона в широком диапазоне, изменяя их процентное содержание. Кроме того, имея сферическую форму и прочную оболочку, микросферы образуют в бетоне плотноупакованную структуру, формирующую прочный каркас. Для увеличения адгезии цементного камня к поверхности микросфер применяются различные кремнезёмсодержащие модификаторы, например микрокремнезём или силан-адгезивы, препятствующие образованию трещин на границе раздела фаз.



Рисунок 4 – Мост «Stolma bridge» в Норвегии, построенный из высокопрочного лёгкого бетона

В 1999 году на юге Норвегии был построен самый большой мост «Stolma bridge» свободной консольной конструкции с длиной основного пролета 301 м (рисунок 4) [25].

Особенностью конструкции моста «Stolma bridge» является применение лёгкого бетона плотностью 1931 кг/м^3 и прочностью 70 МПа при бетонировании 182 метров центральной части моста. Снижение веса центрального элемента конструкции позволило распределить нагрузки на колонны, несущая способность которых воспринимает лишь 90% массы надводной части. В состав используемого при строительстве бетона использовался высокомарочный цемент (420 кг/м^3), микрокремнезём (35 кг/м^3), песок (700 кг/м^3), лёгкий наполнитель Леса-800 (600 кг/м^3) и вода в количестве 208 л/м^3 . За счёт применения пористого наполнителя В/Ц отношение составило 0,495, что позволило получить бетон марки LC60 с удельной прочностью 36,5 МПа.

Другие результаты исследований по разработке облегченных и лёгких бетонов с повышенной прочностью представлены в таблице 1 и рисунок 5 [26]. При этом для реализации представленных проектов использовались традиционные пористые заполнители керамзит, пемза, керамзитовый песок и т.д.

Таблица 1 – Мировой опыт разработки лёгких бетонов с повышенной прочностью.

Год	Страна	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м^3	Удельная прочность, МПа	Источник
1997	Кувейт	45,0...50,0	1800...1850	25,0...27,0	[29]
1999	Норвегия	65,0...70,0	1900...1930	34,2...36,2	[25]
1999	Кувейт	20,0...22,0	1500...1520	13,3...14,4	[28]
2002	Германия	14,0...25,0	1800...1850	7,5...15,0	[22]
2003	Бразилия	40,0...50,0	1450...1600	24,5...30,5	[20]

2003	Турция	30,0...40,0	1800...1860	16,1...22,2	[27]
2004	Япония	47,0...54,0	1800...1850	27,5...30,0	[21]
2007	Россия	46,0...61,0	1800...1850	25,5...33,8	[17]
2007	Россия	42,0...48,0	1600...1650	25,4...28,7	[18]
2010	Малайзия	43,0...48,0	1870...1990	22,9...24,1	[30]
2011	Турция	42,0...60,0	1840...1960	22,8...30,6	[31]
2011	Португалия	40,0...80,0	1500...2000	26,6...40,0	[32]
2012	НОЦ НТ	40,0...70,0	1300...1500	30,0...50,0	—

Анализ данных из таблицы 1 и зависимости предела прочности при сжатии от средней плотности бетона (рисунка 5) показывает, что применение керамзитовых заполнителей позволят достигнуть высоких показателей удельной прочности до 30 МПа. Но развитие производств новых эффективных заполнителей позволит существенно расширить возможности создания лёгких бетонов с высокой прочностью. Как видно, опыт ученых из разных стран свидетельствует о том, что высокие значения удельной прочности достижимы в верхних границах плотностей лёгких бетонов при $\rho_{\text{ср}} \geq 1800 \text{ кг/м}^3$ ($R_{\text{уд}} \geq 55 \text{ МПа}$, а в перспективе $R_{\text{уд}} \geq 62 \text{ МПа}$ при $\rho_{\text{ср}} \geq 1600 \text{ кг/м}^3$). При дальнейшем снижении плотности показатель технической эффективности не превышает 35 МПа. На рисунке 5 видно, что текущие результаты с учетом мирового опыта и наработок не позволяет существенно снизить среднюю плотность и сохранить прочность бетона, но появление новых заполнителей с высокой прочностью и модификаторов для повышения адгезии цементного камня обеспечит качественный рост комплекса показателей средняя плотность и прочность.

Кроме того, в настоящее время большое количество трудов профессора Орешкина [33...35], посвящено созданию строительных материалов на полых микросферах, которые показали свою эффективность.

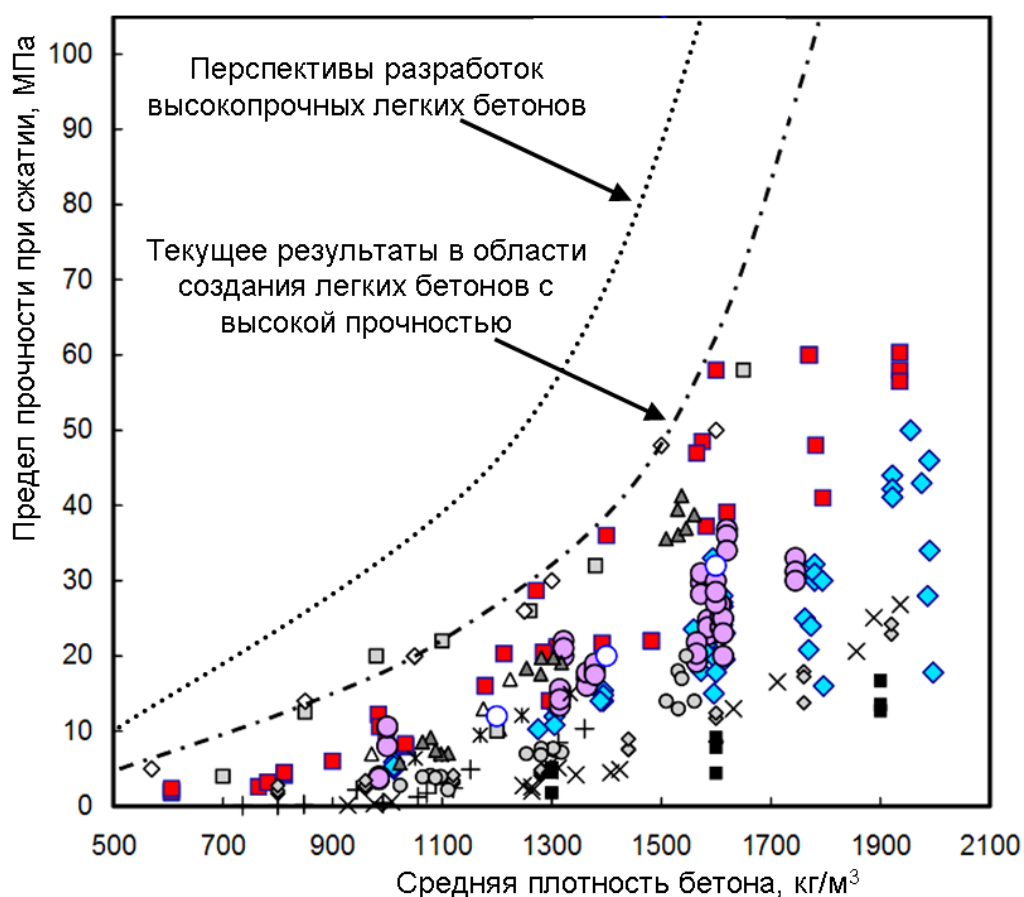


Рисунок 5 – Перспективы разработки высокопрочных лёгких бетонов

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о перспективности разработки составов высокопрочных лёгких бетонов с высоким показателем удельной прочности ($R_{уд} \geq 30$ МПа), которые будут востребованы 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 теплонормирующих свойств обеспечивает эффективность применения такого бетона не менее 30 % [36]. При этом в процессе эксплуатации здания энергопотребление сокращается более чем на 25 %.

В лабораториях НОЦ «Нанотехнологии» МГСУ разработаны составы энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов. В качестве наполнителя, определяющего плотность бетона,

использовались полые стеклянные или алюмосиликатные микросферы, поверхность которых модифицирована комплексным наноразмерным модификатором на основе золь гидроксида железа и золя кремниевой кислоты. 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 лёгких бетонов позволяют получать состав любой марки по плотности, получая как облегченный бетон, так и лёгкий бетон со средней плотностью менее 2000 кг/м^3 .

Очевидно, что важнейшим 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 и адгезии на границе раздела фаз 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. Кроме того компоненты наномодифициатора являются активными по отношению к цементу и продуктам его гидратации. Так золь $\text{Fe}(\text{OH})_3$ способствует увеличению гидратационной активности цемента, а активный нанокремнезем связывает гидроксид Са, образуя силикаты кальция CSH и упрочняя зону контакта цементного камня и заполнителя [37].

Получены составы высокопрочных лёгких бетонов со средней плотностью 1300...1500 кг/м³ и определены базовые показатели прочности при сжатии с использованием стеклянных и алюмосиликатных полых микросфер, которые составили значения в диапазоне 40,0...70,0 МПа [38]. Удельная прочность таких составов варьируется от 30,0 до 50,0 МПа.

Таблица 2 – Некоторые параметры энергоэффективного наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона

Наименование показателя	Значение показателя
Подвижность по диаметру расплыва конуса, мм	не менее 155
Средняя плотность, кг/м ³	1300...1500
Общая пористость, %	33,4
в том числе: закрытая	31,9
открытая	1,5
Предел прочности при изгибе, МПа	5,0...8,0
Предел прочности при сжатии, МПа	40,0...70,0
Удельная прочность, МПа	40,0...45,0
Коэффициент трещиностойкости	0,10...0,12
Коэффициент трещиностойкости по методу МИИТ	0,27...0,42
Модуль упругости, ГПа	9,5...15,2
Коэффициент Пуассона	0,13...0,15
Водопоглощение по массе, %	1,0
Коэффициент водостойкости	0,95
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,48...0,70
Коэффициент температуропроводности, ·10 ⁻⁷ м2/с	3,43...4,04
Удельная теплоемкость (при T = 25 °C), кДж/(кг·К)	1,08...1,17
Морозостойкость	F300

Таким образом, получены составы энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов с высоким показателем технической эффективности $R_{yd} \geq 30$ МПа, что позволяет существенно расширить область применения лёгких бетонов. Такие бетоны позволяют более чем на 40% уменьшить нагрузку на конструкционные

элементы здания, сохранить несущие характеристики и улучшить теплофизические свойства (таблица 2).

а)



б)



Рисунок 6 – Фотографии зданий со сложной архитектурой:
а – «Танцующий дом» (Прага, Чехия), б – Жилой комплекс Хабитат (г. Монреаль, Канада)

Снижение веса конструктивных элементов зданий позволит решать сложные архитектурные задачи и расширит область применения бетонов при строительстве многоэтажных и высотных зданий, возведении большепролетных сооружений, устройстве сложных строительных объектов, где применение высокоплотных материалов не возможно. Кроме того, такие бетоны могут быть рекомендованы для строительства в сейсмоопасных районах или в местах пролегания подземных коммуникаций (линии метрополитена, тоннели и т.д.).

Снижение веса конструктивных элементов зданий позволит решать сложные архитектурные задачи (рисунок 6) и расширит область применения лёгких 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: 02.08.2012)

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, – 1997 – Part 1.
4. Kawai T. State of the art report on high-strength concrete in Japan. Recent developments and applications, 2007. – P. 87-107.
5. High-strength concrete / Concrete technology today. – 1994. – V.15, №1. – P. 1-4.
6. 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, 2009. – №1. – С. 28-37.
7. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И. и др. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружения ММДЦ «Москва-Сити» // Строительные материалы. – 2006. – №10. – С. 13-18.
8. 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. – 1999. – №8. – P. 171–204.
9. Bimson D. T. O. A critical analysis of the pont de Normandie cable-stayed bridge, Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference, 2007.
10. Орешкин Д.В. Полые микросферы – эффективный наполнитель в строительные и тампонажные растворы / Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семенов В.С., Кретьева У.Е. // Промышленное и гражданское строительство, – 2010. – №9. – С. 50-51.

- 11.Иноземцев А.С. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов / Иноземцев А.С., Королев Е.В. // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №10. – С. 80-83.
- 12.Королев Е.В. Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // Журнал «Строительные материалы» – 2013. – №6. – С. 60-64.
- 13.Гайдаров М. М-Р., Сутырин А.В., Юсупходжаев М.А. Облегченные буровые растворы на углеводородной основе с добавкой микросфер // Газовая промышленность, – 2007. – № 12. – С. 66–68.
- 14.Сокол Э.В., Спирин С.А., Максимова Н.В., Нигматулина Е.Н., Френкель А.Э. Полые силикатные микросферы из золы-уноса углей Челябинского бассейна // Минералогия техногенеза - 2000, Миасс. 2000. – С. 146-165.
- 15.Гладких И.В., Волынкина Е.П. Безобжиговые теплоизоляционные материалы на основе зольных микросфер из золоотвала Западно-Сибирской ТЭЦ // Журнал «Известия вузов. Черная металлургия». 2008. – № 4. – С. 49-53.
- 16.ГОСТ 25820-2000 «Бетоны лёгкие. Технические условия».
- 17.Андрианов А.А. Состав, ползучесть высокопрочного лёгкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе / Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. – 15 с.
- 18.Пат. 2355656 С2 РФ, МПК С04В28/02. Бетонная смесь / Пономарев А.Н., Юдович М.И. - Оpubл. 20.05.2009. – 3 с.
- 19.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.

20. Rossignolo JA, Agnesini MVC, Morais JA. Properties of highperformance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. Cem. Con. Compo., 2003. – №25. – P. 77-82.
21. Technical Report Ishikawajimaharima // Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength, 2004. – Vol. 44, №2. – P. 83-90.
22. S. P. McBride, A. Shukla, A. Bose, Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres // Journal of materials science, 2002. – №37. – P. 4217-4225.
23. Jun-Yan Wang, Min-Hong Zhang, Wei Li, Kok-Seng Chia, Richard J.Y. Liew, Stability of cenospheres in lightweight cement composites in terms of alkali-silica reaction // Cement and Concrete Research. – 2012. – Vol. 42, №5. – P. 721-727.
24. F. Blanco, P. García, P. Mateos, J. Ayala, Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres // Cement and Concrete Research. – 2012. – Vol. 30, №11. – P. 1715-1722.
25. Document BE96 - 3942/R14. Structural LWAC: Specification and guideline for materials and production, 2000. – p. 69.
26. Assoc Prof WEE Tiong-Huan Recent developments in lightweight high strength concrete with and without aggregates”, The Third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, University of British Columbia, Vancouver. Canada, 2005. – 22-24.
27. Ergul Yasar, Cengiz Duran Atis, Alaettin Kilic, Hasan Gulsen, Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash// Materials Letters, 2003. – № 57. – P. 2267-2270.
28. Jamal Alduaij, Khalid Alshaleh, M Naseer Haque, Khalid Ellaithy, Lightweight concrete in hot coastal areas // Cement and Concrete Composites, 1999. – Vol. 21, №5–6. – P. 453-458.

29. Al-Khaiat H., Haque M.N. Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete // Cement and Concrete Research, 1998. – Vol. 28, №6. – P. 859-866.
30. Payam Shafigh, Mohd Zamin Jumaat, Hilmi Mahmud Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete // Construction and Building Materials, 2011. – Vol. 25, № 4. – P. 1848-1853.
31. Niyazi Ugur Kockal, Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes // Materials and Design, 2011. – Vol. 32, № 4. – P. 2396-2403.
32. Hugo Costa, Eduardo Júlio, Lourenço J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete // Construction and Building Materials, 2012. – Vol. 35. – P. 84–91.
33. Кириллов К.И. Эффективный тампонажный раствор с полыми стеклянными микросферами / Кириллов К.И., Орешкин Д.В., Ляпидевская О.Б. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – №3. – С. 40-41.
34. Семенов В.С. Свойства облегченных кладочных растворов с полыми стеклянными микросферами и противоморозными добавками / Семенов В.С., Орешкин Д.В., Розовская Т.А. // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №3. – С. 9-11.
35. Орешкин Д.В. Облегченные и сверхлегкие цементные растворы для строительства // Строительные материалы. – 2010. – №6. – С. 34-37.
36. Иноземцев А.С. Королев Е.В. Экономические предпосылки внедрения высокопрочных лёгких бетонов // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья», – 2012. – №5. – С. 198-205.
37. Иноземцев А.С. Королев Е.В. Прочность наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов // Нанотехнологии в строительстве:

научный Интернет-журнал. – Москва: ООО «ЦНТ
«НаноСтроительство» – 2013. – №1. – С.24-38.

38.Иноземцев А.С. Королев Е.В. Особенности реологических свойств
высокопрочных лёгких бетонов на полых микросферах // Вестник
МГСУ. – 2013. – №6. – С.100-108.