

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

УДК 54-182:69.332

ИНОЗЕМЦЕВ Александр Сергеевич, аспирант каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, инженер-испытатель научно-образовательного центра по направлению «Нанотехнологии»;
КОРОЛЕВ Евгений Валерьевич, д.т.н., проф., директор научно-образовательного центра по направлению «Нанотехнологии»
Московский государственный строительный университет, Россия

INOZEMTCEV Alexandr Sergeevich, Postgraduate of Department of Binders and Concretes, Test Engineer of Research and Educational Center «Nanotechnology»;
KOROLEV Evgenij Valerjevich, Doctor of Engineering, Professor, Director of the Research and Educational Center «Nanotechnology»
Moscow State University of Civil Engineering, Russian Federation

ПРОЧНОСТЬ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ¹

STRENGTH OF NANOMODIFIED HIGH-STRENGTH LIGHTWEIGHT CONCRETES¹

В работе представлены результаты исследований, направленных на разработку наномодифицированных высокопрочных легких бетонов конструкционного назначения, обладающих низкой средней плотностью и высоким показателем предела прочности при сжатии. Для изготовления таких бетонов обосновано применение полых стеклянных и алюмосиликатных микросфер. В качестве наномодификатора поверхности микросфер для увеличения прочности сцепления цементного камня с наполнителем предложен комплексный наноразмерный модификатор на основе золь гидроксида железа и золь кремниевой кислоты. Выдвинута гипотеза о том, что предлагаемый модификатор оказывает комплексное влияние на гидратационную активность цемента и способствует увеличению прочности на границе раздела фаз наполнитель/цементно-минеральная матрица. Разработаны составы энергоэффективного наномодифицированного конструкционного высокопрочного легкого бетона со средней плотностью 1300...1500 кг/м³ и пределом прочности при сжатии 40...65 МПа. Представлены подходы к расчету состава высокопрочного легкого бетона средней плотностью менее 2000 кг/м³. Отмечено, что предлагаемые бетоны обладают умеренной подвижностью, могут быть подвержены вибрационному воздействию при укладке, имеют равномерную плотную структуру без расслоения.

¹ Печатается при поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-565.2012.1.

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

В работе обоснованы экономические и практические предпосылки для внедрения разработанных составов наномодифицированного высокопрочного легкого бетона конструкционного назначения в промышленном производстве.

The paper presents the results of research aimed at development of nanomodified high-strength lightweight concrete for construction. The developed concretes are of low average density and high ultimate compressive strength. It is shown that to produce this type of concrete one need to use hollow glass and aluminosilicate microspheres. To increase the durability of adhesion between cement stone and fine filler the authors offer to use complex nanodimensional modifier based on iron hydroxide sol and silica sol as a surface nanomodifier for hollow microspheres. It is hypothesized that the proposed modifier has complex effect on the activity of the cement hydration and, at the same time increases bond strength between filler and cement-mineral matrix. The compositions for energy-efficient nanomodified high-strength lightweight concrete which density is 1300...1500 kg/m³ and compressive strength is 40...65 MPa have been developed. The approaches to the design of high-strength lightweight concrete with density of less than 2000 kg/m³ are formulated. It is noted that the proposed concretes possess dense homogeneous structure and moderate mobility. Thus, they allow processing by vibration during production. The economic and practical implications for realization of high-strength lightweight concrete in industrial production have been justified.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, энергоэффективный бетон, легкий бетон конструкционного назначения.

Key words: high-strength lightweight concrete, energy efficient concrete, lightweight concrete for construction.

Стратегия социально-экономического развития России до 2020 года, подготовленная Министерством экономического развития РФ, предполагает достижение к 2020 году амбициозных задач по обеспечению высокого уровня благосостояния населения и укреплению роли страны в глобальной экономике [1]. Достижение этих целей возможно при развитии рынка высокотехнологичных услуг и увеличения доли выпускаемой инновационной продукции в промышленности.

Строительная отрасль как 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, новейших строительных материалов с применением разработок в области нанотехнологии должны обеспечивать интенсивный переход к высокотехнологичному строительному производству.

Перспективным направлением для строительной индустрии является разработка материалов, обладающих универсальным сочетанием эксплуатационных свойств. Одним из таких направлений является разработка конструкционных материалов с низкой средней плотностью и высокой прочностью.

Отечественный и зарубежный опыт, направленный на решение этой задачи, известен с 1999 года. Мировой опыт [2...9] показывает, что высокие значения показателя удельной прочности бетона, который характеризует его конструкционные качества, достижимы только при $\rho_{\text{ср}} \geq 1800 \text{ кг/м}^3$. При дальнейшем снижении средней плотности этот показатель, вычисленный по формуле:

$$R_{\text{уд}} = R_{\text{сж}} / \rho_{\text{отн}} \quad (1)$$

(где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии, МПа; $\rho_{\text{отн}}$ – относительная плотность) не превышает 30 МПа.

Отечественный опыт [10, 11] реализован в разработке нанобетонов на алюмосиликатных полых микросферах с дисперсной арматурой в виде базальтовой фибры, наномодифицированной углеродными частицами фулероидного типа, которые апробированы при реконструкции мостов через реки Волга и Вятка.

При этом отрасли необходимы высокопрочные легкие бетоны конструкционного назначения с удельной прочностью более 30 МПа.

Зарубежный и отечественный опыт по разработке высокопрочных легких бетонов показывает, что наилучшие результаты в этом направлении получены при использовании новых наполнителей – полых микросфер [12]. Сырьевой рынок микросфер ориентирован в основном на полимерные композиционные материалы [13], но в последнее время все больше этот наполнитель используется нефтегазодобывающей и строительной отраслью. Выделяют две группы микросфер: алюмосиликатные (керамические) и стеклянные. Их химический состав определяется содержанием сырьевых компонентов и способом получения.

Алюмосиликатные микросферы добывают на ТЭС, где зола от сгорания угля удаляется в виде водной пульпы. Микросферы, имея плот-

ность менее 1000 кг/м^3 , самопроизвольно всплывают на поверхность водных бассейнов золошлаковых отходов, после чего их собирают, сушат и классифицируют. Объемы производства таких микросфер ограничиваются производительностью и технологическими особенностями ТЭС. Авторами [14] проведен анализ зол ТЭС России, из которого следует, что стабильный объем добычи алюмосиликатных микросфер в Центрально-Европейском и Северо-Европейском регионах составляют 18 и 15 тыс. т/год, соответственно.

Другая часть сырьевого рынка ориентируется на промышленном производстве стеклянных микросфер. Большинство полых стеклянных микросфер производится путем пропускания мелких частиц, содержащих порообразователь, через высокотемпературную зону. Частицы плавятся или размягчаются в горячей зоне, а газообразователь формирует полость внутри частиц, расширяя их. При охлаждении сферы на воздухе ее стенки успевают затвердеть до момента уменьшения внутреннего давления газа [13]. Несмотря на высокие физико-механические свойства и инертность стеклянные микросферы имеют существенный недостаток, обусловленный их высокой стоимостью (в 8–10 раз по сравнению с алюмосиликатными микросферами).

В лабораториях НОЦ «Нанотехнологии» МГСУ разработаны составы энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных легких бетонов, содержащие вяжущее, минеральную часть, наномодифицированный наполнитель, пластифицирующую добавку и воду. В качестве вяжущего вещества используется портландцемент марки ПЦ500 Д0, соответствующий ГОСТ 30118-2003. Наполнителем, определяющим среднюю плотность бетона, являются полые алюмосиликатные и/или стеклянные микросферы. Минеральная часть состоит из кремнеземистых заполнителей полидисперсного состава, обеспечивающих образование плотного каркаса за счет заполнения пустот между наполнителем. Для снижения водопотребности и увеличения подвижности смеси вводят пластифицирующую добавку на поликарбоксилатной основе Meflux 1641F.

Очевидно, что важнейшим фактором, оказывающим влияние на прочность легких бетонов на полых микросферах, является прочность оболочки микросфер. Исследования влияния вида и марки микросфер на удельную прочность высокопрочных легких бетонов показывают, что полые стеклянные микросферы, аморфные по природе, имеют бо-

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

лее высокие показатели удельной прочности (рис. 1). Это объясняется более прочной структурой оболочки микросфер и меньшим размером частиц, средний размер которых – 30...35 мкм, что обеспечивает формирование более плотноупакованной структуры. Составы на алюмосиликатных микросферах обладают приемлемым показателем удельной прочности $R_{уд} \geq 30$ МПа, поэтому технически и экономически привлекательны полые алюмосиликатные микросферы.

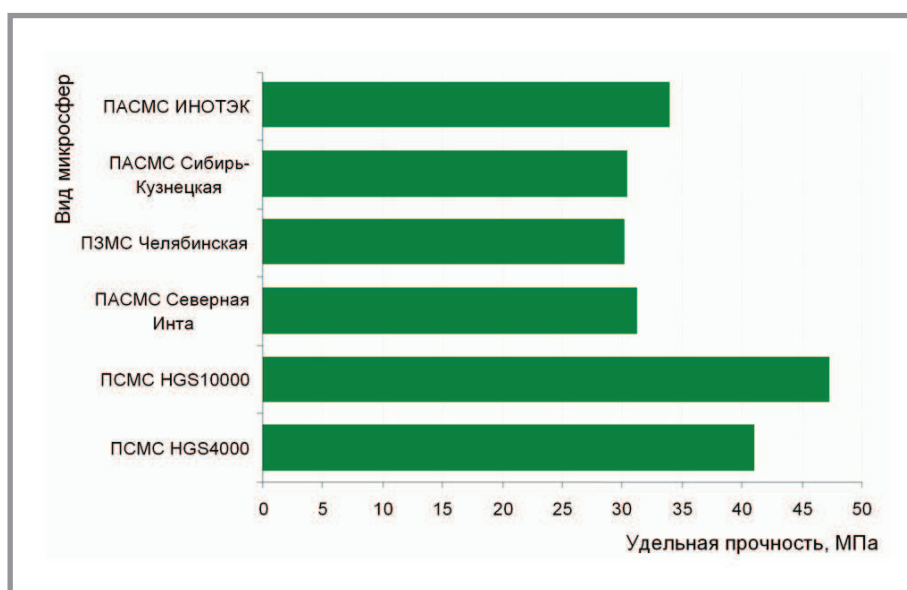


Рис. 1. Влияние вида микросфер на удельную прочность высокопрочных легких бетонов: ПСМС – полые стеклянные микросферы; ПАСМС – полые алюмосиликатные микросферы; ПЗМС – полые золомикросферы

Разработана методика проектирования составов наномодифицированных высокопрочных легких бетонов с различной маркой по плотности. Соотношение составных частей бетона определяется требуемыми физико-механическими показателями изделия и проектируется для каждой марки по плотности индивидуально.

Определяющим фактором для физико-механических свойств бетона является наполнитель (полые микросферы). Его содержание позволяет регулировать плотность бетона и его прочность посредством регулирования плотности упаковки каркаса частиц. Прочность бетона при прочих равных условиях зависит от прочности оболочки микросфер и цементно-минеральной матрицы, обволакивающей частицы наполнителя. Для увеличения прочности оболочки полых микросфер пред-

лагается использовать комплексный наноразмерный модификатор на основе золь гидроксида железа и золь кремниевой кислоты. Приготовление модификатора основывается на новом способе синтеза золя кремниевой кислоты [15], который заключается в химическом связывании положительно заряженных ионов натрия. Выдвинута гипотеза о том, что комплексное воздействие наномодификатора обеспечит повышение гидратационной активности цемента и, как следствие, повышение прочности цементного камня. Адгезия цементно-минеральной матрицы к наполнителю увеличивается за счет образования на поверхности микросфер тоберморитопобонных гидросиликатов кальция типа CSH (I) и появления представленной гетитом FeOOH [16] новой фазы.

Зависимость физико-механических свойств высокопрочных легких бетонов от содержания алюмосиликатных микросфер (рис. 2) показывает, что введение указанного наполнителя способствует закономерному снижению предела прочности при сжатии. Однако показатель технической эффективности, характеризуемый удельной прочностью, изменяется менее интенсивно, что объясняется конструктивным влиянием комплексного наноразмерного модификатора. Применение наноразмерного модификатора позволяет увеличить предел прочности при сжатии бетона не менее 15% в зависимости от объемной степени наполнения микросфер.

Очевидно, что введение микросфер приводит к структурным преобразованиям в бетоне. Различными исследователями предложены структурные критерии [17...19]:

$$L = \frac{C}{\Pi}, \quad (2)$$

$$\psi_p = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} = 1 - |\varphi_r| = 1 - \left| \frac{\vartheta_t - \vartheta_p}{\vartheta_m} \right|, \quad (3)$$

$$K_{hom} = \frac{1+3\varphi}{(1+\varphi)^3} \cdot \chi = \frac{1+3\varphi}{(1+\varphi)^3} \cdot \frac{v_m - v_{II}}{v_m}, \quad (4)$$

где C – содержание вяжущего; Π – пористость материала; $\Delta\sigma$ – упрочнение при текущем ψ_p ; $\Delta\sigma_0$ – максимальное упрочнение композита при $\psi_p = 1$; φ_r – коэффициент разделения фаз; ϑ_t , ϑ_p – объемные доли пле-

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

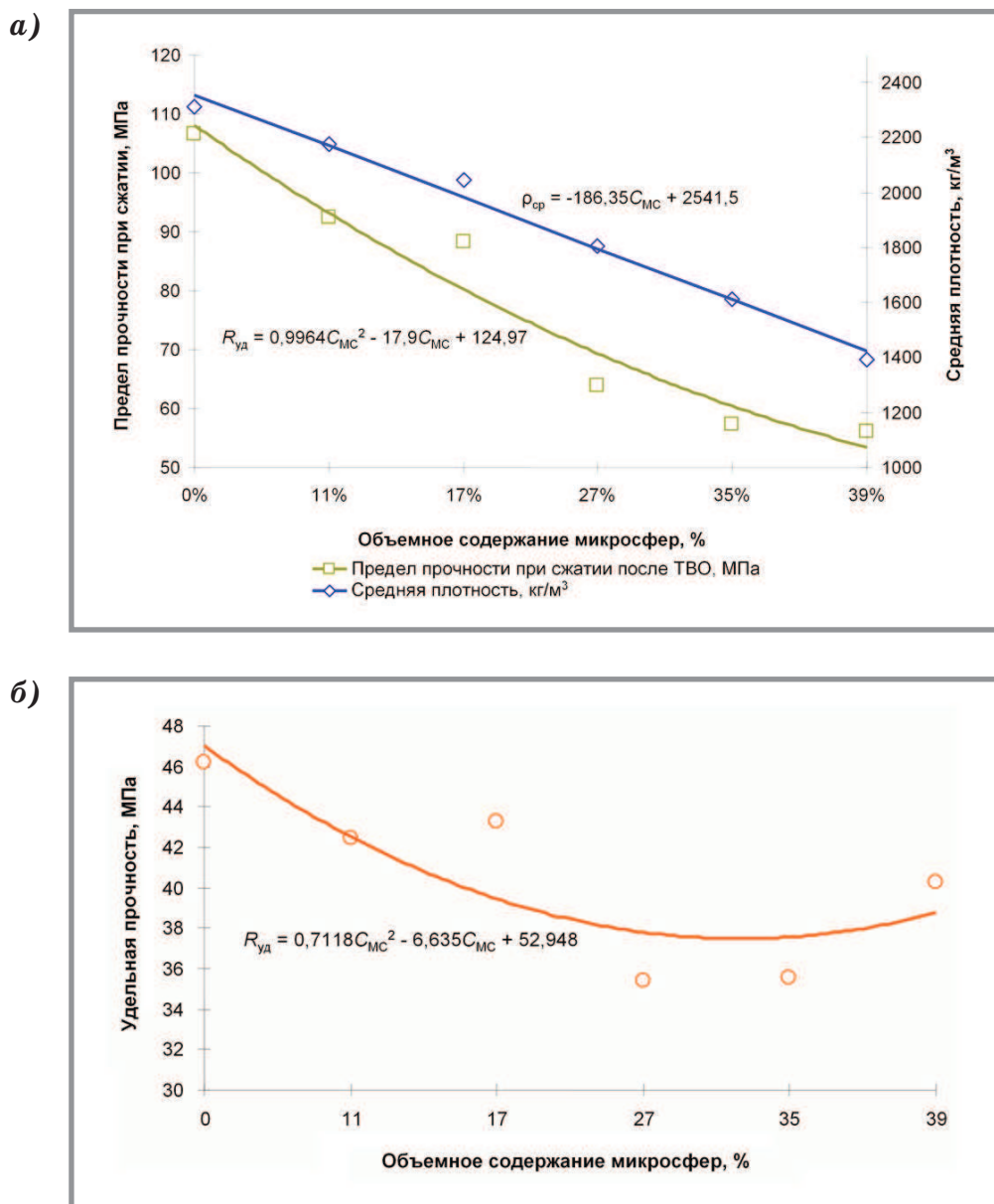


Рис. 2. Физико-механические свойства наномодифицированных высокопрочных легких бетонов: а – зависимость предела прочности при сжатии и средней плотности от содержания микросфер; б – зависимость удельной прочности от содержания микросфер

ночной и объемной фазы матрицы, соответственно; ϑ_p – объемная доля матрицы в композите; v_m , v_{II} – объемные доли матрицы и пор в композите, соответственно.

Зависимость удельной прочности высокопрочных легких бетонов от критериев L , ψ_p и K_{hom} представлены на рис. 3.

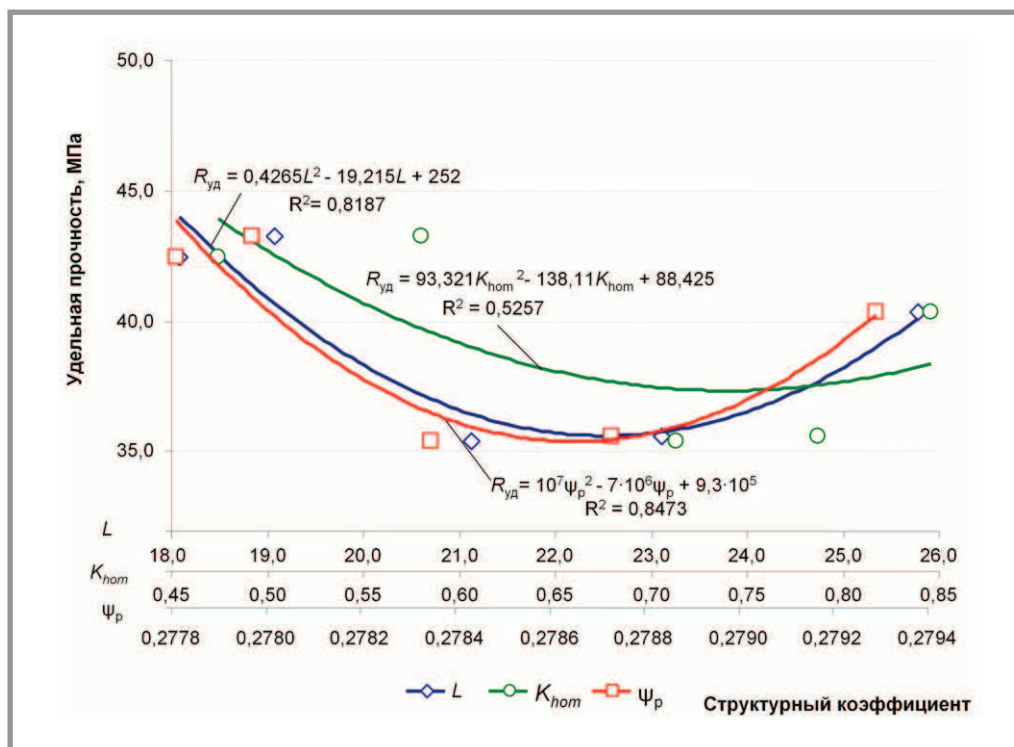


Рис. 3. Зависимость удельной прочности высокопрочных легких бетонов от структурных критериев L , ψ_p и K_{hom}

Анализ рис. 3 показывает, что независимо от вида структурного критерия изменение удельной прочности от содержания наполнителя для разработанных легких бетонов имеет экстремальный характер. Это объясняется следующим образом. Микросферы, вводимые в высокопрочную цементную матрицу, являются естественными дефектами структуры. Очевидно, что увеличение концентрации дефектов приводит к снижению прочности материала (рис. 2, а). В теории перколяции [19] рассматриваются две пороговые концентрации содержания дисперсной фазы: $\vartheta_{f,I} = 0,16$ и $\vartheta_{f,II} = 0,34$. При достижении первого порога перколяции $\vartheta_{f,I}$ формируется каркас из частиц наполнителя (микросферы), который обеспечивает непрерывность дисперсной фазы, а следовательно, дефектов структуры. Это способствует снижению прочности материала на $\sim 26\%$. Дальнейшее увеличение количества микросфер до второго порога перколяции $\vartheta_{f,II}$ приводит к формированию каркаса с достаточно плотным расположением микросфер (рис. 4), при котором трещины интенсивно ветвятся, что увеличивает энергетические затраты на разрушение и снижает скорость изменения прочности dR/dC_{MC} .

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

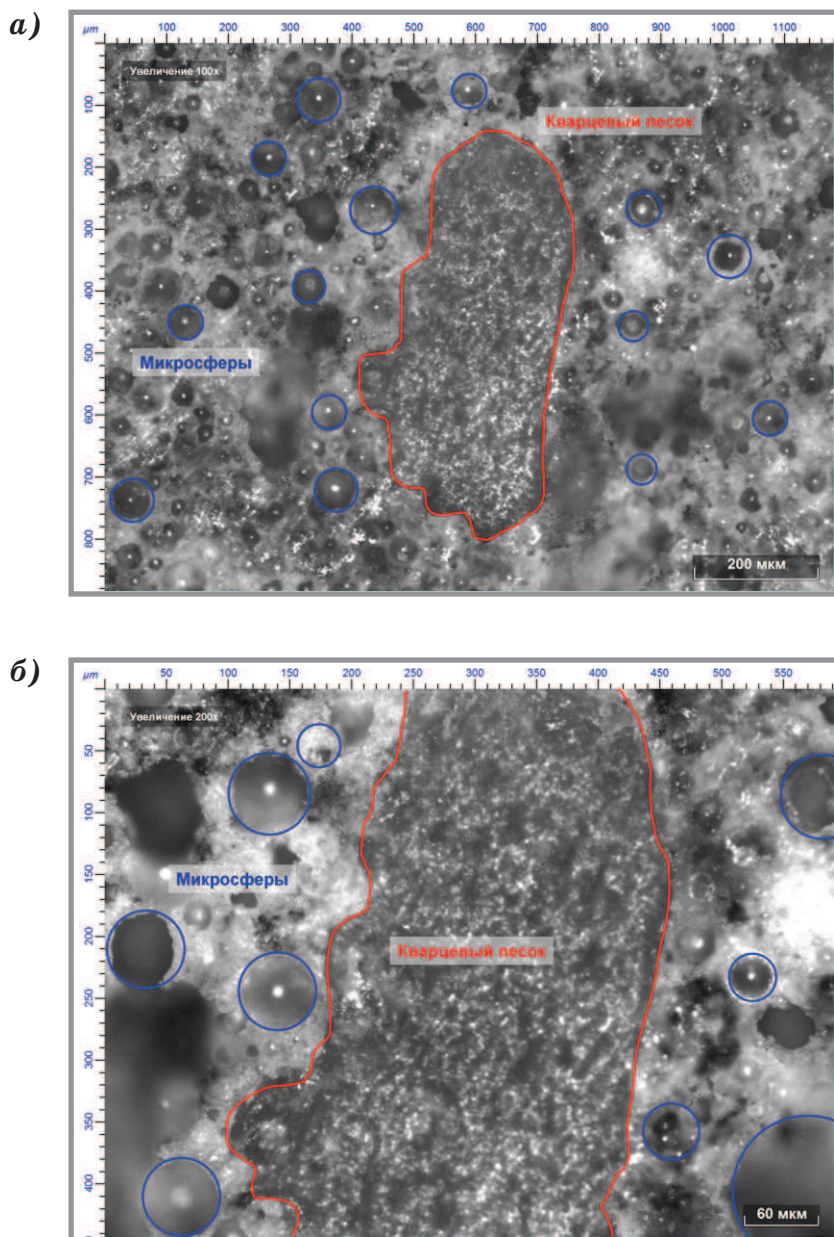


Рис. 4. Микрофотография структуры наномодифицированных высокопрочных легких бетонов:
а – увеличение x100; б – увеличение x200

При этом скорость снижения средней плотности $d\rho/dC_{MC}$ не изменяется: $\rho_{cp} = f(C_{MC})$ описывается линейной функцией (рис. 2, а). Кроме того, близкая к идеальной сфере форма наполнителя способствует высокой трещиностойкости бетона. Развитие трещин происходит при большей нагрузке за счет равномерного распределения напряжений, действу-

ющих на частицы правильной формы. Дополнительное усиливающее воздействие на границе наполнитель/цементно-минеральная часть, препятствующее распространению трещин, оказывает наноразмерный модификатор. Таким образом, формирование структуры при $C_{MC} \geq \vartheta_{f,II}$ приводит к увеличению $R_{уд}$. Кроме того, твердая оболочка микросфер обеспечивает закрытую пористость, сохраняя высокие эксплуатационные свойства бетона.

Микросферы, имея низкую насыпную плотность, в низковязких водонасыщенных системах поднимаются в верхние слои, что недопустимо. Применение поликарбоксилатных пластификаторов типа Melflux, обладающих высоким водоредуцирующим и пластифицирующим эффектом, позволяет получить стабильную, равномерную бетонную смесь умеренной подвижности без расслоения независимо от объемной степени наполнения микросфер.

На основе проведенных исследований получены составы 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 (см. табл.).

Таблица

Некоторые свойства наномодифицированного высокопрочного легкого бетона

Наименование показатель	Значение
Средняя плотность, кг/м ³	1300...1500
Предел прочности при сжатии, МПа	40,0...70,0
Удельная прочность, МПа	30,0...55,0
Водопоглощение, %	менее 2,5
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

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

Экономическая обоснованность внедрения предлагаемых бетонов требует комплексного подхода, учитывающего все свойства и преимущества материала. В [20] сформулированы экономические предпосылки применения наномодифицированных высокопрочных легких бетонов, основанные на уменьшении общего веса конструкции здания, экономии на теплоизоляционных работах и сокращении материалоемкости.

Перспективность использования разработанных высокопрочных легких бетонов обусловлена положительными качествами и преимуществами по отношению к широко применяемым тяжелым и легким бетонам на пористых заполнителях.

Уважаемые коллеги!

При использовании материала данной статьи просим делать библиографическую ссылку на неё:

Иноземцев А.С., Королев Е.В. Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2013, Том 5, № 1. С. 24–38. URL: http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_1_2013.pdf (дата обращения: _____).

Dear colleagues!

The reference to this paper has the following citation format:

Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Strength of nanomodified high-strength light-weight concretes. Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal, Moscow, CNT «NanoStroitelstvo». 2013, Vol. 5, no. 1, pp. 24–38. Available at: http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_1_2013.pdf (Accessed _____). (In Russian).

Библиографический список:

1. Стратегия 2020 – стратегия социально-экономического развития страны до 2020 года. // Итоговый доклад о результатах экспертной работы по актуальным проблемам социально-экономической стратегии России на период до 2020 года «Стратегия-2020: Новая модель роста – новая социальная политика». URL: <http://2020strategy.ru> (дата обращения: 01.10.2012).
2. *Альдуаиж Дж.* Легкий бетон в жарких прибрежных районах / Дж. Альдуаиж, Х. Альшале, М.Н. Акуэ, Х. Эллаити // *Cement and Concrete Composites*. 1999. Т. 21. № 5–6. С. 453–458.
3. *Прошин А.П.* Ячеистые бетоны для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и инженерных коммуникаций / А.П. Прошин, А.И. Еремкин, В.А. Береговой и др. // журн. «Строительные материалы». 2002. № 3. С. 14–15.
4. *Бедов А.И.* Использование бетонов и арматуры повышенной прочности в проектировании сборных и монолитных железобетонных конструкций / А.И. Бедов, В.В. Бабков, А.И. Габитов и др. // Научно-технический журн. «Вестник МГСУ». 2012. № 8. С. 76–84.
5. *Брайд С.П.* Производство и характеристики легких бетонов с использованием ценосфер / С.П. Брайд, А. Шукла, А. Бозе // *Journal of materials science*. 2002. Т. 37. С. 4217–4225.
6. *Россигноло Д.* Свойства высокопрочных легких бетонов для сборных конструкций с Бразильским легким заполнителем / Д. Россигноло, М. Агнесини, Д. Морраис // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Т. 25. С. 77–82.
7. *Ясар Э.* Прочностные свойства легких бетонов, изготовленных из базальтовой пемзы и золы-уноса/ Э. Ясар, Ц.Д. Атис, А. Килис, Х. Гульсен // *Materials Letters*. 2003. Т. 57. С. 2267–2270.
8. Технический отчет *Ishikawajimaharima* // Оценка усталостной долговечности сборных плит из легкого высокопрочного бетона. 2004. Т. 44. № 2. С. 83–90.
9. *Андрианов А.А.* Состав, ползучесть высокопрочного легкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: ФГУП НИЦ «Строительство». 2007. 15 с.
10. Пат. 2355656 С2 РФ, МПК С04В28/02. Бетонная смесь / А.Н. Пономарев, М.И. Юдович; опубл. 20.05.2009. 3 с.
11. *Фиговский О.Л.* Успехи применения нанотехнологий в строительстве / О.Л. Фиговский, Д.А. Бейлин, А.Н. Пономарев // «Нанотехнологии в строительстве: на-

- учный Интернет-журнал». М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2012. № 3. С. 6–22. URL: <http://www.nanobuild.ru> (дата обращения: 15.09.2012).
12. *Орешкин Д.В.* Полые микросферы – эффективный наполнитель в строительные и тампонажные растворы / Д.В. Орешкин, К.В. Беляев, В.С. Семенов, У.Е. Кротова // журн. «Промышленное и гражданское строительство». 2010. № 9. С. 50–51.
 13. *Бухарова С.В.* Наполнители для полимерных композиционных материалов: справочное пособие. / С.В. Бухарова, С.Г. Кулик, Т.И. Чалых, В.Г. Шевченко. М.: Изд-во «Химия». 1981. 736 с.
 14. *Дрожжин В.С.* Процессы образования и основные свойства полых алюмосиликатных микросфер в золах-уноса тепловых электростанций / В.С. Дрожжин, М.Я. Шпирт, Л.Д. Данилин и др. // журн. «Химия твердого тела». 2008. № 2. С. 53–66.
 15. *Гришина А.Н.* Синтез и исследование стабильности золя кремниевой кислоты в среде, содержащей наночастицы / А.Н. Гришина, Е.В. Королев // сборник тезисов «Второй конференции стран СНГ «Золь-гель-2012». Севастополь, Украина. 2012. С. 28.
 16. *Сватовская Л.Б.* Управление свойствами композиционных материалов на неорганическом вяжущем с добавками наноразмера. / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, В.А. Чернаков и др. URL: <http://ntsr.info/science/library/2906.htm> (дата обращения: 01.10.2012).
 17. *Королев Е.В.* Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов. Пенза, Оренбург: ИПК ОГУ. 2010. С. 220–229.
 18. *Баженов Ю.М.* Технология бетонов. М.: Изд-во АСВ. 2011. 528 с.
 19. Синергетика композиционных материалов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Л.О. Бабин и др. Липецк: НПО «Ориус». 1994. 153 с.
 20. *Иноземцев А.С.* Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Научный журнал «Научно-технический вестник Поволжья». 2012. № 5. С. 198–206.

References:

1. Strategy 2020 – the strategy of social and economic development of the country until 2020. // The final report on the results of the expert work on the issues of social and economic policy in Russia until 2020 «Strategy 2020: The new growth model – a new social policy». URL: <http://2020strategy.ru> (accessed 01.10.2012) (in Russian)
2. *Alduaij J., Alshaleh Kh., Haque M. N., Ellaithy Kh.* Lightweight concrete in hot coastal areas // *Cement and Concrete Composites*. 1999. Vol. 21. № 5–6. P. 453–458.
3. *Proshin A.P.* Cellular concrete for insulation of frame filling in buildings and engineering services / A.P. Proshin, A.I. Eremkin, M.A. Beregovoy et al. // *Journal «Construction Materials»*. 2002. № 3. P. 14–15 (in Russian).
4. *Bedov A.I.* The use of concrete and reinforcement of high strength to design prefabricated and monolithic concrete structures / A.I. Bedov, V.V. Babkov, A.I. Gabitov et al. // *Scientific and technical journal «Vestnik MGSU»*. 2012. № 8. P. 76–84 (in Russian).
5. *McBride S.P.* Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres / S.P. McBride, A. Shukla, A. Bose // *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. P. 4217–4225.
6. *Rossignolo J.A.* Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates / J.A. Rossignolo, M. Agnesini, J. Morais // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25. P. 77–82.
7. *Yasar E.* Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash / E. Yasar, C.D. Atis, A. Kilic, H. Gulsen // *Materials Letters*. 2003. Vol. 57. P. 2267–2270.
8. Ishikawajimamarima Tech. Report // Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength. 2004. Vol. 44. № 2. P. 83–90.
9. *Andrianov A.A.* Composition and creep of high-strength lightweight concrete mixtures of high mobility and cast consistency with organic-mineral modifiers / Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: FSUE SIC «Stroitel'stvo». 2007. 15 p (in Russian).
10. Patent 2355656 C2 RF IPC C04B28/02. Concrete mix / A.N. Ponomarev, M.I. Yudovich; publ. 20.05.2009. 3 p. (in Russian).
11. *Figovsky O.L.* Successful implementation of nanotechnology in building materials / O.L. Figovsky, D.A. Beilin, A.N. Ponomarev // *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. Moscow. CNT «Nanostroitelstvo». 2012. № 3. PP. 6–22. URL: <http://nanobuild.ru> (accessed 15.09.2012) (in Russian).

12. *Oreshkin D.V.* Hollow microspheres – effective filler for cement mortars / D.V. Oreshkin, K.V. Belyaev, V.S. Semenov, U.E. Kretova // Journal «Industrial and Civil Engineering». 2010. № 9. P. 50–51 (in Russian).
13. *Bukharov S.V.* Fillers for polymer composites: handbook / S.V. Bukharov, S.G. Kulik, T.I. Chalykh, V.G. Shevchenko. Moscow. Publishing House «Himija». 1981. 736 p. (in Russian).
14. *Drozhdzhin V.S.* Formation processes and the basic properties of hollow aluminum silicate microspheres in fly-ash of thermal power stations / V.S. Drozhdzhin, M.Ya. Shpirt, L.D. Danilin et al. / Journal «Himija tverdogo tela». 2008. № 2. P. 53–66 (in Russian).
15. *Grishina A.N.* Synthesis and study of the stability of the sol of silicic acid in the environment with nanoparticles / A.N. Grishina, E.V. Korolev // Abstracts of the 2nd Conf. «Zol-gel-2012». Sevastopol, Ukraine. 2012. P. 28. (in Russian).
16. *Svatovskaja L.B.* Control of the properties of composite materials based on inorganic binders with nanodimensional additives / L.B. Svatovskaja, V.Y. Soloviev, V.A. Chernakov, I.V. Stepanova. URL: <http://ntsr.info/science/library/2906.htm> (accessed 01.10.2012) (in Russian).
17. *Korolev E.V.* Radiation-protective and chemical-resistant sulfur building materials / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, A.I. Albakasov. Penza, Orenburg: PKI OSU. 2010. P. 220–229.
18. *Bazhenov Yu.M.* Technology of concretes. Moscow: Publishing House ASV. 2011. 528 p. (in Russian).
19. *Bobryshev A.N.* Synergetics of composites / A.N. Bobryshev, V.N. Kozomazov, L.O. Babin, V.I. Solomatov // Lipetsk: NPO «Orhus». 1994. 153 p. (in Russian).
20. *Inozemtcev A.S.* Economical conditions of high light concrete / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev // Scientific journal «Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja». 2012. № 5. P. 198–206. (in Russian).

Контакты
Contact information

e-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru
e-mail: KorolevEV@mgsu.ru