

doi: 10.5862/MCE.51.4

Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов

*К.т.н., младший научный сотрудник А.С. Иноземцев,
Московский государственный строительный университет*

Аннотация. В работе представлены результаты анализа структуры высокопрочных легких бетонов, выполненного методами рентгеновской томографии и оптической микроскопии, и исследований их средней плотности и пористости.

Установлено, что составы высокопрочных легких бетонов средней плотностью 1300...1500 кг/м³ имеют однородную структуру с равномерным распределением полого заполнителя по объему (коэффициент расслоения не более 0,008) и прослойки цементно-минеральной матрицы (13...17 мкм). Совокупность высоконасыщенной газовой фазы (объемное содержание микросфер до $u_f = 0,43...0,53$), разделенной более плотными крупными включениями кварцевого песка, и продуктов гидратации цемента в зоне контакта позволяет получать композиционный материал, обладающий низкой средней плотностью, большой закрытой пористостью (до 40 %) и высокими прочностными характеристиками (предел прочности при сжатии – более 40 МПа).

Применение модификаторов для повышения адгезии на границе раздела фаз «цементный камень – микросфера» приводит к уплотнению зоны контакта и уменьшению водопоглощения высокопрочного легкого бетона (до 1 %), а также обеспечивает его высокую водостойкость (коэффициент водостойкости более 0,95).

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон; полые микросферы; нанотехнологии; микроструктура; средняя плотность; пористость

Введение

Исследованиям, направленным на разработку строительных материалов с низкой плотностью и высокой прочностью, посвящено множество отечественных и зарубежных трудов [1–7]. При этом, несмотря на территориальную дифференцированность сырьевых ресурсов, для получения легких бетонов с такими свойствами в разных странах используют преимущественно вспученные заполнители [2–4]. Анализ работ [4–7] показывает, что использование заполнителей с развитой открытой поровой структурой позволяет получать бетоны с низкой средней плотностью до 1000 кг/м³ или с высокой прочностью до 80 МПа. Поэтому актуальной является задача по комбинированию этих свойств в материале. Высокопрочный легкий бетон должен обладать «компромиссной» структурой, где сочетается высокое объемное содержание газовой фазы с плотным и прочным каркасом.

Формирование плотной и однородной структуры является обязательным условием получения высокопрочных легких бетонов с требуемой средней плотностью. Фактором, обеспечивающим технико-экономические преимущества таких бетонов, являются геометрические параметры заполнителя – полых стеклянных или алюмосиликатных микросфер. Сферическая форма частиц микросфер способствует формированию плотноупакованной структуры из частиц заполнителя в объеме материала, которая определяет его среднюю плотность и прочность.

Для создания высокопрочных легких бетонов важно, чтобы увеличение доли газовой фазы в объеме материала сопровождалось высокой плотностью упаковки частиц основных компонентов. Установлено [8], что использование микрокремнезема в количестве не более 20 % от массы цемента приводит к уплотнению бетона за счет заполнения микропор в цементном камне. В работе [9] показано, что применение комплексного наноразмерного модификатора, несмотря на уменьшение подвижности бетонной смеси, приводит к незначительному изменению средней плотности легких бетонов благодаря связыванию гидроксидов кальция и образованию гидросиликатов на границе раздела фаз. Эти процессы предопределяют плотную структуру материала.

Методы и оборудование

Среднюю плотность бетона определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1–94 «Бетоны. Методы определения плотности».

Исследования структуры выполнены на оптическом микроскопе «Eclipse MA200» фирмы «Nikon» с объективами 5×0,15, 10×0,30, 20×0,60, 50×0,75 и 100×1,25, максимальное увеличение микроскопа 2000х, а также на основе анализа данных, полученных с помощью микротомографа высокого разрешения SkyScan 1172¹.

Объем открытых капиллярных пор бетона оценивали по водопоглощению по объему:

$$\Pi_o \equiv W_o = \frac{W_m \rho_o}{\rho_v},$$

где W_o – объемное водопоглощение бетона в серии образцов; ρ_v – плотность воды, принимаемая равной 1 г/см³; W_m – водопоглощение по массе, %.

Определение параметров поровой структуры проводили методом А.Е. Шейкина по кинетике водопоглощения образцов. Устанавливали показатели среднего размера пор и однородности их размеров. Водопоглощение определяли в соответствии с ГОСТ 12730.3-94 «Бетоны. Методы определения водопоглощения».

Результаты и обсуждение

Очевидно, что определяющим фактором, влияющим на среднюю плотность высокопрочных легких бетонов, является количество легкого заполнителя (полых микросфер). Формирование закрытой поровой структуры в исследуемых составах осуществляется преимущественно за счет газовой фазы микросфер, поэтому свойства микросфер будут оказывать определяющее влияние на среднюю плотность бетона. Исследования влияния рецептурных и технологических факторов на среднюю плотность и пористость высокопрочных легких бетонов показали [8, 9], что определяющее влияние на формирование структуры материала оказывают полые микросферы. Объемная доля заполнителя в наибольшей мере влияет на плотность бетона. Увеличение объемной доли микросфер прямо пропорционально уменьшает среднюю плотность, при этом скорость изменения тем выше, чем меньше плотность самого заполнителя.

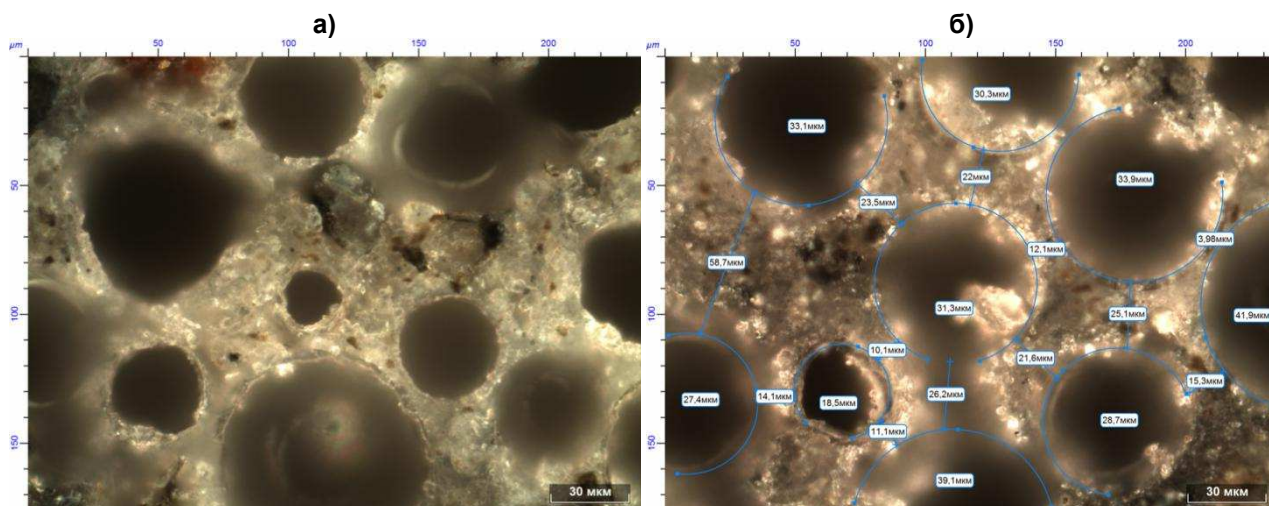


Рисунок 1. Оптическая микрофотография структуры высокопрочного легкого бетона (увеличение 500х): а – средняя плотность бетона 1300 кг/м³; б – средняя плотность 1500 кг/м³

Анализ микрофотографий (рис. 1) структуры высокопрочного легкого бетона, полученных на оптическом микроскопе с увеличением 500х, показывает, что в разработанных составах [8–10] сферы микрометрического размера равномерно распределяются по объему материала (таблица 1).

¹ Дополнительные технические характеристики оборудования представлены на сайте www.nocnt.ru
Иноземцев А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов

Таблица 1. Показатели структуры и средней плотности высокопрочного легкого бетона

№ п/п	Проектная плотность бетона, кг/м ³	Слой образца	Средняя плотность, кг/м ³	Среднеквадратическое отклонение, σ	Стандартное отклонение, s	Толщина прослойки цементного камня, мкм	Коэффициент расслоения
1	1300	Верхний	1295	2,9	3,51	13,5±0,5	0,008
		Нижний	1305	2,1	2,52	12,9±0,3	
2	1400	Верхний	1398	3,1	3,77	14,9±0,3	0,006
		Нижний	1406	2,0	2,41	15,6±0,3	
3	1500	Верхний	1496	3,9	4,77	17,2±0,4	0,008
		Нижний	1508	4,9	6,00	16,7±0,2	

Примечание: коэффициент расслоения рассчитывается по формуле $k = 1 - \rho_{\text{ср}}^{\text{В}} / \rho_{\text{ср}}^{\text{Н}}$, где $\rho_{\text{ср}}^{\text{В}}$ – средняя плотность верхнего слоя, $\rho_{\text{ср}}^{\text{Н}}$ – средняя плотность нижнего слоя [6–8].

Результаты расчетов, представленные в таблице 1, свидетельствуют о высокой однородности распределения заполнителя в разработанных высокопрочных легких бетонах, которая незначительно уменьшается с повышением средней плотности материала. Это также подтверждается результатами, полученными с применением рентгеновского томографа² (рис. 2).

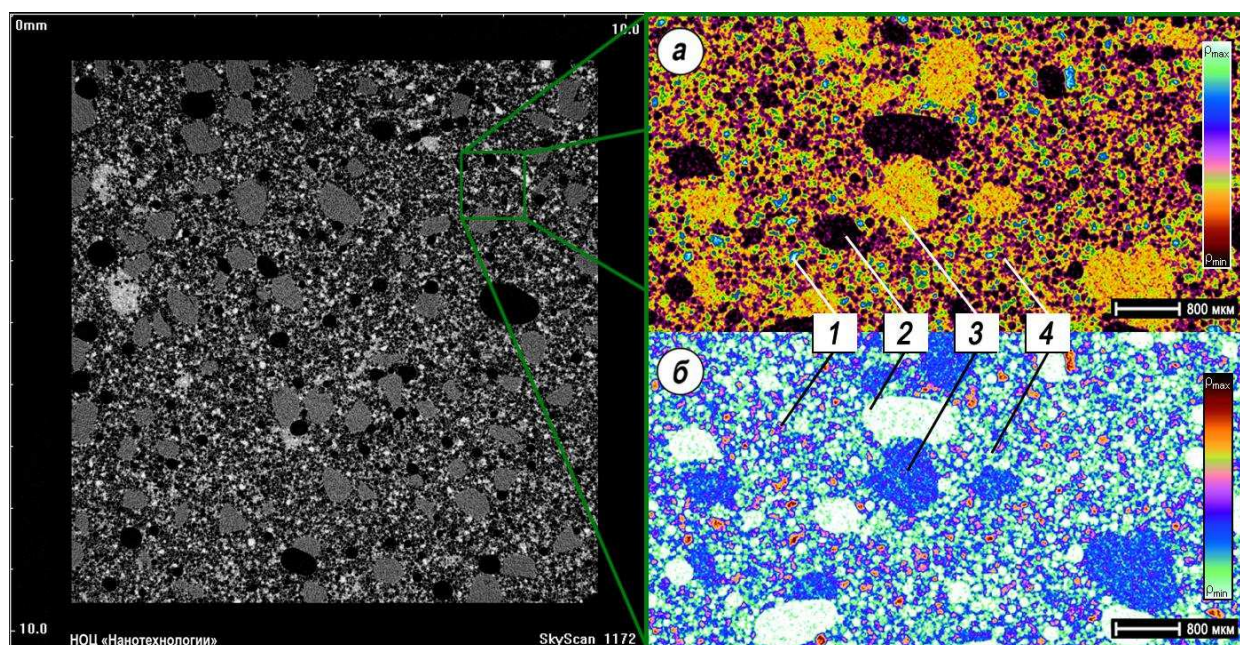


Рисунок 2. Рентгеновские фотографии микроструктуры высокопрочного легкого бетона:
а – градиент теплых цветов; б – градиент холодных цветов;
1 – цементный камень; 2 – пустоты и поры; 3 – кварцевый песок; 4 – микросферы

Представленная на рисунке 2 микрофотография структуры в градиенте теплых и холодных цветов демонстрирует, что полые микросферы, стенки которых (красно-фиолетовые сферы на рисунке 2а) являются наименее плотной дисперсной фазой, разряжены более плотными включениями кварцевого песка большего размера (желто-оранжевые объекты на рисунке 2а) и продуктами гидратации цемента (желто-красные включения на рисунке 2б). Кроме того, на рисунке 2б видно, что предложенный бетон обладает структурой, высоко насыщенной газовой фазой (белый цвет). В таблице 2 представлены данные, которые указывают, что в объеме бетона содержится более 1 % пор, образовавшихся за счет вовлечения воздуха при перемешивании. Совокупность этих факторов способствует формированию такого строения, которое позволяет получать композитный материал с комплексным набором свойств, сочетающим низкую среднюю плотность и высокие прочностные характеристики.

² Исследование выполнено в лаборатории Почвенного института им. В.В. Докучаева, Москва. Иноземцев А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов

Таблица 2. Параметры пористости высокопрочных легких бетонов

№ п/п	Диаметр пор, мм	Средний диаметр пор, мм	Доля, %	Объем одной поры, мм ³	Относительный объем пор, %	Общий относительный объем пор, %
1	≤ 0,2	0,30	54,6	0,038	0,21	2,34
2	0,2...0,3		27,3	0,113	0,31	
3	0,3...0,4		10,9	0,523	0,57	
4	0,5...0,9		5,5	0,904	0,49	
5	≥ 1,0		1,7	4,187	0,76	

Образование дополнительного количества пор будет оказывать влияние на способность жидкости диффундировать в тело бетона и способствовать развитию деструктивных процессов в эксплуатационных условиях. Важной прогностической характеристикой, позволяющей проводить оценку качества структуры и долговечности материала, является вид и количество пор. Для алюмосиликатных микросфер толщина стенки составляет 5...10 % от диаметра частицы, что соответствует объему газовой фазы 51,2...72,9 % от общего объема микросфер. Расчеты свидетельствуют, что для достижения средней плотности бетона 1300...1500 кг/м³ объемная доля микросфер должна составлять 43,8...53,2 %. Объем газовой фазы при этом составит 22,4...38,8 %. Отсюда очевидно, что объем закрытых пор в разработанных наномодифицированных высокопрочных легких бетонах с учетом вовлеченного воздуха может составлять до 40 % в зависимости от средней плотности бетона.

Открытые поры отличаются способностью поглощать воду (или другие жидкости), общий объем пор (открытая пористость) может быть определен по величине водопоглощения по объему. Открытые поры имеют различные геометрические характеристики, поэтому кинетика водопоглощения имеет асимптотический характер: первоначально заполняются крупные поры, в завершении – мелкие поры [11–21].

Зависимость водопоглощения от времени может быть аппроксимирована функцией вида [21–23]:

$$W_T = W_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\bar{\lambda} T^\alpha}\right),$$

где W_T – водопоглощение материала на период времени T ; $W_{\max}$ – максимальная величина водопоглощения, численно равная величине максимальной открытой пористости; $\bar{\lambda}$ – константа скорости, характеризующая средний размер капилляров модельного поликапиллярного материала; $0 \leq \alpha \leq 1$ – однородность размеров капилляров (для монокапиллярного материала $\alpha = 1$).

Таблица 3. Результаты исследования поровой структуры методом Шейкина

№ п/п	Водопоглощение после выдержки t (час), %						$\bar{\lambda}$	α
	0	0,5	1	2	24	48		
Немодифицированный высокопрочный легкий бетон								
1	0	0,52	0,57	0,63	0,87	0,89	1,14	0,356
	0	0,56	0,59	0,67	0,87	0,92	1,15	0,289
	0	0,55	0,57	0,65	0,87	0,90	1,18	0,329
Среднее квадратичное отклонение, %							1,8	10,4
Наномодифицированный высокопрочный легкий бетон								
2	0	0,386	0,407	0,537	0,920	0,942	0,75	0,510
	0	0,384	0,545	0,571	0,974	1,006	0,68	0,509
	0	0,383	0,410	0,583	0,955	0,987	0,70	0,502
Среднее квадратичное отклонение, %							0,80	5,0

Результаты, представленные в таблице 3, указывают на однородность порового пространства высокопрочного легкого бетона, приготовленного на модифицированных микросферах, что подтверждено результатами в таблице 1. Однородность капилляров по размеру значительно выше (в 1,7 раза) – разброс данных не превышает 5 %. Сопоставление величин $\bar{\lambda}$ свидетельствует о том, что размер капилляров в структуре наномодифицированного легкого бетона также меньше (в 1,63 раза), чем в составах без модификатора. Это объясняется действием комплексного наноразмерного модификатора, который оказывает уплотняющее действие на

границе раздела фаз, заполняя поровое пространство и препятствуя проникновению воды в материал.

Так как долговечность материалов определяется их способностью сопротивляться деструктивным процессам, обусловленным различными агрессивными эксплуатационными воздействиями, то сокращение поглощающей способности высокопрочных легких бетонов будет способствовать снижению негативного влияния эксплуатационной среды, приводящей к разрушению за счет физического и/или химического воздействия. Интенсивность деструктивного воздействия зависит от глубины проникновения среды в материал. Эта величина может быть оценена количеством абсорбированной жидкости – массопоглощением (частный его вид – водопоглощение).

Открытая пористость наномодифицированного высокопрочного легкого бетона составляет не более 1,5 %. Применение комплексного наноразмерного модификатора способствует снижению водопоглощения на 20...23 %. Это закономерно способствует повышению долговечности таких бетонов (рис. 3).

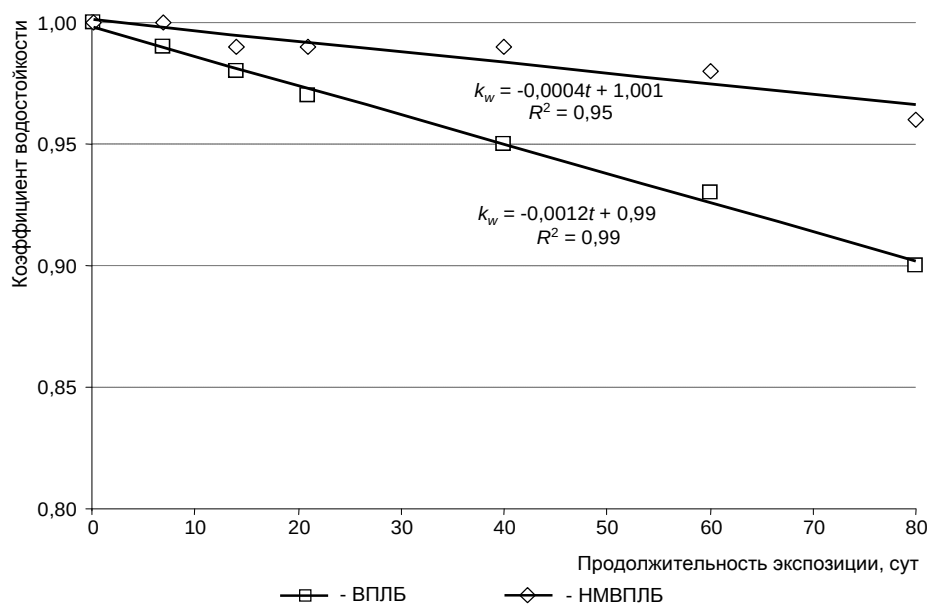


Рисунок 3. Изменение коэффициента водостойкости ВПЛБ и НМВПЛБ в зависимости от продолжительности экспозиции

Из приведенных на рисунке 3 результатов следует, что коэффициент водостойкости для высокопрочных легких бетонов закономерно отличается от коэффициента водостойкости бетонов, приготовленных на модифицированных микросферах. Очевидно, что водостойкость бетона будет зависеть от его пористости и величины капиллярной диффузии жидкости в материал. Более плотная структура наномодифицированного высокопрочного легкого бетона способствует снижению водопоглощения и, следовательно, уменьшению площади контакта с агрессивной средой, что, очевидно, также снижает негативное влияние воды на структуру бетона: коэффициент водостойкости увеличивается до 0,96 (в возрасте 80 суток).

Выводы

На основании анализа структуры высокопрочных легких бетонов методами рентгеновской томографии, оптической микроскопии и исследований их средней плотности и пористости можно сделать следующие выводы:

- в разработанных составах высокопрочных легких бетонов легкий заполнитель, представленный алюмосиликатными микросферами, равномерно распределенными по объему (коэффициент расслоения не более 0,008) и разделенными однородной прослойкой (13...17 мкм) из цементно-минеральных компонентов матрицы, формирует закрытую поровую структуру объемом до 40 % в зависимости от проектной средней плотности бетона;

- совокупность высоконасыщенной газовой фазы (объемное содержание микросфер до $u_f = 0,43...0,53$), разделенной более плотными крупными включениями кварцевого песка, и продуктов гидратации цемента в зоне контакта позволяет получать композиционный материал, сочетающий низкую среднюю плотность $1300...1500 \text{ кг/м}^3$ и высокие эксплуатационные характеристики;
- применение комплексного наноразмерного модификатора, уплотняющего границу раздела фаз «цементный камень – микросфера», приводит к уменьшению водопоглощения (до 1 %) и обеспечивает высокую водостойкость (коэффициент водостойкости более 0,95) разработанного бетона.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-565.2012.1.

Литература

1. Angelin A.F., Ribeiro L.C.L.J., Pires M.S.G., Lintz R.C.C., Trautwein L.M., Gachet-Barbosa L.A. Study of Density and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Brazilian Aggregate // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 467. Pp. 257–261.
2. Yew M.K., Mahmud H.B., Ang B.C., Yew M.C. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete // Materials & Design. 2014. Vol. 54. Pp. 702–707.
3. Nguyen L.H., Beaucour A.-L., Ortola S., Noumowé A. Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 51. Pp. 121–132.
4. McBride S. P., Shukla A., Bose A. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres // Journal of Materials Science. 2002. Vol. 37. Pp. 4217–4225.
5. Андрианов А. А. Состав, ползучесть высокопрочного легкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе: автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. 15 с.
6. Rossignolo J. A., Agnesini M., Morais J. Properties of highperformance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates // Cement and Concrete Composites. 2003. Vol. 25. Pp. 77–82.
7. Tommy Y. Lo Structural lightweight concrete in Hong Kong: now, new, next [Электронный ресурс]. URL: http://www.service.hkpc.org/hkiemat/previous/2008/mastec03_notes/TLO.PDF (дата обращения: 01.02.2014).
8. Korolev E.V., Inozemtcev A.S. Preparation and research of the high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 746. Pp. 285–288.
9. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Структурообразование и свойства конструкционных высокопрочных легких бетонов с применением наномодификатора BisNanoActivus // Строительные материалы. 2014. № 1. С. 33–37.
10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Динамика развития высокопрочных лёгких бетонов. Анализ мировых достижений // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 12-1 (19). С. 87-94.
11. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И.. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
12. Плаченнов Т.Г., Колосенцев С.Д. Порометрия. М.: Химия, 1988. 176 с.
13. Шейкин А.Е., Добшиц А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, 1989. 128 с.
14. Альбакасов А.И., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Управление структурой и свойствами наномодифицированных строительных материалов // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 2. С. 9–17.
15. Калашников В.И. Высокопрочные порошково-активированные пропариваемые песчаные бетоны нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. №5. С. 14–19.
16. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Пудов И.А., Дулесова И.Г., Бурьянов А.Ф., Сабер М. Структуризация цементных вяжущих матриц многослойными углеродными нанотрубками // Строительные материалы. 2011. №11. С. 22–24.

17. Беляев К.В., Макаренкова Ю.В., Орешкин Д.В. Моделирование и разработка оптимальной структуры сверхлегкого цементного раствора // Строительные материалы. 2012. №9. С. 58–60.
18. Suryavanshi A.K., Swamy R.N. Development of lightweight mixes using ceramic microspheres as fillers // Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32. No. 11. Pp. 1783–1789.
19. Пономарев А.Н. Нанобетон: концепция и проблемы. синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и армирующей фибры // Строительные материалы. 2007. №6. С. 69–71.
20. Фиговский О. Л., Бейлин Д. А., Пономарев А. Н. Успехи применения нанотехнологий в строительстве // Нанотехнологии в строительстве. 2012. №3. С. 6–22. URL: <http://www.nanobuild.ru> (дата обращения: 20.02.2014).
21. Смирнов В.А., Королев Е.В., Данилов А.М., Круглова А.Н. Фрактальный анализ микроструктуры наномодифицированного композита // Нанотехнологии в строительстве. 2011. №5. С. 77–86.
22. Логанина В.И., Макарова Л.В., Кислицына С.Н., Сергеева К.А. Повышение водостойкости покрытий на основе известковых отделочных составов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. №1. С. 41–46.
23. Зырянова В.Н., Лыткина Е.В., Бердов Г.И. Повышение механической прочности и водостойкости магниезальных вяжущих веществ при введении минеральных заполнителей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. №3. С. 21–26.

Александр Сергеевич Иноземцев, Москва, Россия

Тел. раб.: +7(499)1880400; эл. почта: InozemcevAS@mgsu.ru

© Иноземцев А.С., 2014

doi: 10.5862/MCE.51.4

Average density and porosity of high-strength lightweight concrete

A.S. Inozemtcev*Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia
+74991880400; e-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru*

Key words

high-strength lightweight concrete, hollow microspheres, nanotechnology, microstructure, average density, porosity

Abstract

The analysis results of high-strength lightweight concrete (HSLWC) structure are presented in this paper. The X-ray tomography, optical microscopy and other methods are used for researching of average density and porosity.

It has been revealed that mixtures of HSLWC with density 1300...1500 kg/m³ have a homogeneous structure. The developed concrete has a uniform distribution of the hollow filler and a uniform layer of cement-mineral matrix. The highly saturated gas phase which is divided by denser large particles of quartz sand and products of cement hydration in the contact area allow forming a composite material with low average density, big porosity (up to 40%) and high strength (compressive strength is more than 40 MPa).

Special modifiers increase adhesion, compacts structure in the contact area, decrease water absorption of high-strength lightweight concrete (up to 1 %) and ensure its high water resistance (water resistance coefficient is more than 0.95).

References

1. Angelin A.F., Ribeiro L.C.L.J., Pires M.S.G., Lintz R.C.C., Trautwein L.M., Gachet-Barbosa L.A. Study of Density and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Brazilian Aggregate. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 467. Pp. 257–261.
2. Yew M.K., Mahmud H.B., Ang B.C., Yew M.C. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete. *Materials & Design*. 2014. Vol. 54. Pp. 702–707.
3. Nguyen L.H., Beaucour A.-L., Ortola S., Noumowé A. Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 51. Pp.121–132.
4. McBride S.P., Shukla A., Bose A. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres. *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. Pp. 4217–4225.
5. Andrianov A. A. *Sostav, polzuchest vysokoprochnogo legkogo betona iz smesey vysokopodvizhnoy i litoy konsistentsii s modifikatorami na organomineralnoy osnove* [Composition, creep of high-strength lightweight concrete by highly mobile and cast consistence mixtures with modifiers on organic base]. Abstract of PhD thesis. Moscow: FGUP NITs «Stroitelstvo», 2007. 15 p. (rus)
6. Rossignolo J. A., Agnesini M., Morais J. Properties of highperformance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25. Pp. 77–82.
7. Tommy Y. Lo *Structural lightweight concrete in Hong Kong: now, new, next* [Online]. URL: http://www.service.hkpc.org/hkiemat/previous/2008/mastec03_notes/TLO.PDF (accessed: February 1, 2014)
8. Korolev E.V., Inozemtcev A.S. Preparation and research of the high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746. Pp. 285–288.
9. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. *Strukturoobrazovaniye i svoystva konstruktsionnykh vysokoprochnykh legkikh betonov s primeneniym nanomodifikatora BisNanoActivus* [Structuring and properties of the structural high-strength lightweight concretes with nanomodifier BisNanoActivus]. *Building materials*. 2014. No. 1. Pp. 33–37. (rus)
10. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. *Dinamika razvitiya vysokoprochnykh legkikh betonov. Analiz mirovykh dostizheniy* [Highstrength lightweight concrete. analysis of world achievements]. *International research journal*. 2013. No. 12-1 (19). Pp. 87–94. (rus)

11. Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. *Struktura i svoystva tsementnykh betonov* [Structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 344 p. (rus)
12. Plachenov T.G., Kolosentsev S.D. *Porometriya* [Porosimetry]. Moscow: Khimiya, 1988. 176 p. (rus)
13. Sheykin A.E., Dobshits A.E. *Tsementnyye betony vysokoy morozostoykosti* [Cement concrete high frost resistance]. Leningrad: Stroyizdat, 1989. 128 p. (rus)
14. Albakasov A.I., Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Upravleniye strukturoy i svoystvami nanomodifitsirovannykh stroitelnykh materialov [Management structure and properties of nano-modified building materials]. *Regional architecture and engineering*. 2011. No. 2. Pp. 9–17. (rus)
15. Kalashnikov V.I. Vysokoprochnyye poroshkovo-aktivirovannyye proparivayemyye peschanyye betony novogo pokoleniya [High-strength powder-activated steamed sand concretes of a new generation]. *News of Higher educational institutions. Construction*. 2011. No. 5. Pp. 14–19. (rus)
16. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Pudov I.A., Dulesova I.G., Buryanov A.F., Saber M. Strukturizatsiya tsementnykh vyazhushchikh matrits mnogoslownymi uglirodnyimi nanotrubkami [Structuring of cement binding matrices by multiwall carbon nanotubes]. *Building materials*. 2011. No. 11. Pp. 22–24. (rus)
17. Belyayev K.V., Makarenkova Yu.V., Oreshkin D.V. Modelirovaniye i razrabotka optimalnoy struktury sverkhlegkogo tsementnogo rastvora [Modeling and development optimal structure ultralight mortar]. *Building materials*. 2012. No. 9. Pp. 58–60. (rus)
18. Suryavanshi A.K., Swamy R.N. Development of lightweight mixes using ceramic microspheres as fillers. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. No. 11. Pp. 1783–1789.
19. Ponomarev A.N. Nanobeton: kontseptsiya i problemy. sinergizm nanostrukturirovaniya tsementnykh vyazhushchikh i armiruyushchey fibry [Nanocrete: concept and problems. synergies nanostructuring cement binders and reinforcing fibers]. *Building materials*. 2007. No. 6. Pp. 69–71. (rus)
20. Figovskiy O. L., Beylin D. A., Ponomarev A. N. Uspekhi primeneniya nanotekhnologiy v stroitelstve [Success of nanotechnology applications in construction]. *Nanotechnology in construction*. 2012. No. 3. Pp. 6–22. (rus)
21. Smirnov V.A., Korolev E.V., Danilov A.M., Kruglova A.N. Fraktalnyy analiz mikrostruktury nanomodifitsirovannogo kompozita [Fractal analysis of the microstructure of the composite nanomodified]. *Nanotechnology in construction*. 2011. No. 5. Pp. 77–86. (rus)
22. Loganina V.I., Makarova L.V., Kislitsyna S.N., Sergeyeva K.A. Povysheniye vodostoykosti pokrytiy na osnove izvestkovykh otdelochnykh sostavov [Increase the water resistance of coatings based on lime finishing compositions]. *News of Higher educational institutions. Construction*. 2012. No.1. Pp. 41–46. (rus)
23. Zyryanova V.N., Lytkina Ye.V., Berdov G.I. Povysheniye mekhanicheskoy prochnosti i vodostoykosti magnezialnykh vyazhushchikh veshchestv pri vvedenii mineralnykh zapolniteley [Improvement of the mechanical strength and water resistance of magnesia binders with the introduction of mineral fillers]. *News of Higher educational institutions. Construction*. 2010. No. 3. Pp. 21–26. (rus)

Full text of this article in English: pp. 31–37