

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОЙ ЗАМЕНЫ ПЛОТНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ПОРИСТЫМИ НА СРЕДНЮЮ ПЛОТНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ БЕТОНОВ

Лахтарина С.В., Зайченко Н.М. д.т.н. проф.

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Макеевка, Украина*

Анализ целого ряда уникальных проектов, реализованных в мировой практике строительства, показывает, что при проектировании и возведении современных зданий и сооружений наблюдается тенденция минимизации их собственного веса. Это особенно актуально для крупных городов, где острый дефицит земельных участков обуславливает необходимость проектировать здания большой этажности, а также при строительстве на территориях со сложными геологическими характеристиками.

Уменьшение массы строительных конструкций без снижения их несущей способности и других эксплуатационных свойств является одним из основных факторов повышения эффективности строительства.

Это обеспечивает экономию арматуры (уменьшении процента армирования конструкций) и бетона за счет снижения нагрузок на фундаменты и несущие конструкции. Практическим способом решения этой задачи является применение легких конструкционных бетонов.

Анализ литературных источников [2-13] свидетельствует о том, что основные преимущества использования конструкционных легких бетонов заключается в следующем:

- создание более изящных контуров при увеличении длины пролетов несущих конструкций, работающих на изгиб, где собственная масса составляет значительную долю от полной нагрузки (большепролетные мосты);
- сокращение расхода бетона и арматуры и, соответственно, транспортировочной и монтажной массы;
- возможность получения менее теплопроводного бетона для ограждающих конструкций. Последнее обусловлено тем, что коэффициент теплопроводности легких бетонов составляет

приблизительно 1/3 теплопроводности тяжелых, т. е. они оказывают в три раза больше сопротивление теплопередаче, чем тяжелые [5];

- при использовании в составе конструкционного легкого бетона предварительно водонасыщенного пористого заполнителя создаются условия для повышения степени гидратации цемента, снижение риска трещинообразования вследствие развития аутогенной и влажностной усадки бетона, что положительно отражается на повышении долговечности строительных конструкций из легкого бетона и, соответственно, надежности зданий и сооружений.

Согласно [9] к конструкционным легким относятся бетоны, на основе легких пористых заполнителей, характеризующиеся пределом прочности при сжатии более 17,2 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения и средней плотностью не более 1842 кг/м³. Европейским стандартом EN 206-1 для конструкционных легких бетонов установлены диапазоны средней плотности от 1100 до 2000 кг/м³, и по прочности при сжатии – классы от LC8/9 до LC 80/88.

Для получения высокопрочных легких бетонов используют те же технологические приемы, что и в технологии тяжелых высокопрочных бетонов: применение высокомарочных, в том числе композиционных цементов и максимально прочных пористых заполнителей; проектирование состава бетона с предельно низким водоцементным отношением; применение супер- и гиперпластификаторов в сочетании с микрокремнеземом или другими тонкодисперсными кремнеземистыми добавками; в ряде случаев предварительная подготовка легкого заполнителя (водонасыщение, активация поверхности, гидрофобизация и др.); особо тщательное перемешивание и уплотнение бетонной смеси с сохранением ее высокой однородности; создание благоприятных условий твердения бетона [14].

В то же время известно, что характерной особенностью легких бетонов на пористых заполнителях является то обстоятельство, что каждый тип крупного заполнителя позволяет получать бетоны только до определенной прочности, по достижении которой дальнейшее повышение прочности раствора (за счет повышения расхода цемента и снижения водоцементного отношения), не приводит к заметному повышению прочности бетона. Так по данным [14] для получения бетона с прочностью свыше 60 МПа и средней плотностью около 1750 кг/м³ (ККК=34) применяли высокопрочный керамзит и органоминеральный модификатор серии МБ.

С другой стороны бетоны с высоким коэффициентом конструктивного качества получены при частичной замене плотного

крупного заполнителя пористым (ККК=39) [15], хотя при этом средняя плотность бетона остается достаточно высокой – 2050 кг/м³. Дальнейшее снижение средней плотности бетона может быть достигнуто при замене плотного мелкого заполнителя пористым. При этом, в случае высокой пуццолановой активности мелкого заполнителя может быть существенное повышение прочности бетона, обусловленное уплотнением микроструктуры и контактной зоны. Например, по данным [16,17] отмечен положительный эффект частичной замены плотного песка и цемента комбинированной минеральной добавкой в виде микрокремнезема и золы-уноса.

Целью настоящей работы является исследование влияния минеральной добавки в виде зольных сфер и керамзитового песка в качестве частичной (полной) замены плотного песка, а также керамзита фракции 5-10 мм. – как частичная (полная) замена гранитного щебня, на показатели подвижности бетонных смесей, среднюю плотность и прочность бетона.

Характеристика исходных материалов

В качестве компонентов бетонных смесей приняты:

– **портландцемент (ПЦ):** Криворожский портландцемент ПЦ I -500 Н (активность 52,5 кгс/см²; нормальная густота 25%);

– **минеральная добавка (МК):** микрокремнезем: МАРЕPLAST SF (содержание SiO₂>85 %; удельная поверхность – 25м²/г);

– **химическая добавка:** суперпластификатор (СП) на основе эфира поликарбоксилата – Melflux 5581 F ;

– **крупный заполнитель плотный:** щебень (Щ) гранитный Караньского месторождения фракции 5-10 мм (насыпная плотность 1226 кг/м³);

– **крупный заполнитель пористый (КЗП):** дробленый керамзитовый гравий, фракции 5-10 мм. (табл. 1);

– **мелкий заполнитель плотный:** песок (П) кварцевый Краснополянского месторождения (модуль крупности 2,0; насыпная плотность 1408 кг/м³);

– **мелкий заполнитель пористый:** песок керамзитовый (Кер.П.) (насыпная плотность 508 кг/м³);

– **мелкий заполнитель/ минеральная добавка:** зольные микросферы (МС) Старобешевской ТЭС (табл 2).

Микросферы – это полые зольные шарики размером в среднем от 20 до 500 мкм. со сплошными непористыми стенками толщиной от 2

до 10 мкм. Они образуются в топках ТЭС при высокотемпературном факельном сжигании угля.

Средняя насыпная плотность микросфер примерно в четыре раза меньше плотности других минеральных наполнителей, однако они имеют высокую механическую прочность.

Сферы обеспечивают минимальное отношение площади поверхности к занимаемому объему и наиболее компактную укладку. Коэффициент упаковки микросфер – 60-80% от теоретического. Близкая к идеальной форма микросфер и малый размер частиц (рис. 1) обуславливают высокую текучесть смесей на их основе, обеспечивают эффективное заполнение форм, уменьшают усадку.

Таблица 1. Основные свойства дробленого керамзита

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Средняя плотность в зерне, кг/м ³	793
2	Насыпная плотность, кг/м ³	415
3	Водопоглощение по массе, %	47%
4	Общая пористость, %	71%
5	Закрытые пористость, %	33,6%

Предел прочности при сжатии бетонов определяли на образцах-кубах с размером ребро 7,07 см. Подвижность (ОК, мм) / Текучесть ($D_{распл}$) смесей определяли при помощи уменьшенного конуса Абрамса ($d_1=140$ мм, $d_2=65$ мм, $h=215$ мм $V=2,2$ л.). Состав и свойства бетонных смесей представлены в табл. 3.

Таблица 2. Основные физические и химические свойства микросфер

Физические свойства		Химический состав	
Свойство	Значение	Оксиды	Значение, %
Цвет	светло-серый	SiO ₂	55 - 65
Форма частиц:	сферическая	Al ₂ O ₃	15 – 39
pH	6,0-7,0	Fe ₂ O ₃	1 – 5
Насыпная плотность	300-450 кг/м ³	K ₂ O+Na ₂ O	1-4

Коэффициент теплопроводности:	0,08-0,20 Вт/(м*К)	TiO ₂	0,5-1,5
-------------------------------	-----------------------	------------------	---------

Бетонные смеси были приготовлены с применением в качестве активной минеральной добавки микрокремнезема в количестве 10% от расхода цемента и характеризовались одинаковыми значениями водоцементного **0.37** и водовяжущего **0.33** отношения. Количество суперпластификатора принято также постоянным – 0,7% от расхода цемента.

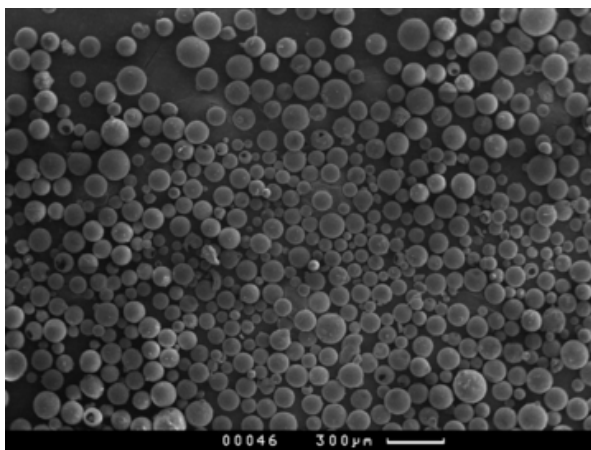


Рис 1. Электронная фотография зольных микросфер [1]

Таблица 3. Состав и свойства свежеприготовленных бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг/м ³									Свойства бетонной смеси	
	ПЦ	МК	П	В	Щ	КЗП	МС	Кер. П	СП	средняя плотность, кг/м ³	ОК/Д _{расп} , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Керамзит 5-10 мм.											
1	612	61	788	224	687	0	-	-	4,3	2253	Д _{расп} 390
2	612	61	788	224	515	59	-	-	4,3	2137	Д _{расп}

											310
3	612	61	788	224	343	118	-	-	4,3	2027	ОК 145
4	612	61	788	224	172	177	-	-	4,3	1919	ОК 55
5	612	61	788	224	0	236	-	-	4,3	1732	ОК 25
Микросфера											
6	612	61	591	224	687	-	47	-	4,3	2121	Драсп 550
7	612	61	394	224	687	-	94	-	4,3	1996	Драсп 530

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	612	61	197	224	687	-	141	-	4,3	1920	Драсп 500
9	612	61	0	224	687	-	187	-	4,3	1815	Драсп 500
Керамзитовый песок											
10	612	61	591	224	687	-	-	81	4,3	2121	Драсп 530
11	612	61	394	224	687	-	-	163	4,3	2111	Драсп 500
12	612	61	197	224	687	-	-	244	4,3	2011	ОК 14,5
13	612	61	0	224	687	-	-	326	4,3	1920	ОК 12,5
Керамзит + Микросфера											
14	612	61	394	224	515	59	94	-	4,3	1834	Драсп 500
15	612	61	197	224	515	59	141	-	4,3	1711	Драсп 500
16	612	61	0	224	515	59	187	-	4,3	1554	Драсп 500

Результаты экспериментов и обсуждение

Частичная (полная) замена крупного заполнителя дробленным керамзитом фракции 5-10 мм в количестве 25, 50, 75 и 100% по объему (табл. 3 составы 1-5) приводит к снижению средней плотности от 5 до 23% соответственно и к снижению предела прочности при сжатии на 16,8-45,5% от контрольного (рис 2а,б).

Кроме того, введение пористого заполнителя в количестве 50% и более (составы 3-5) оказывает существенное влияние на подвижность бетонных смесей вследствие поглощения части воды затвердения пористым заполнителем. Так, введение более 50% керамзита фракции 5-10 мм снижает подвижность смеси от 145 мм до 25 мм.

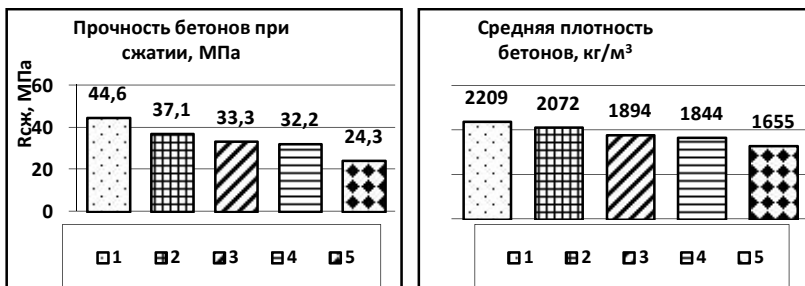


Рисунок 2. Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней

плотности (б) бетонов с заменой гранитного щебня дробленным керамзитом

При замене мелкого заполнителя – кварцевого песка, зольными микросферами в количестве 25, 50, 75, 100% по объему (составы 6-9 табл. 3) также наблюдается снижение средней плотности бетонов на 6,8-19,3% соответственно, однако прочность при сжатии в 28 суточном возрасте возрастает на 61,8-5,6% (рис 3а,б).

Это связано с высокой пуццолановой активностью зольных микросфер, а также формой их частиц, которые обеспечивают минимальное отношение площади поверхности к занимаемому объему и наиболее компактную укладку.

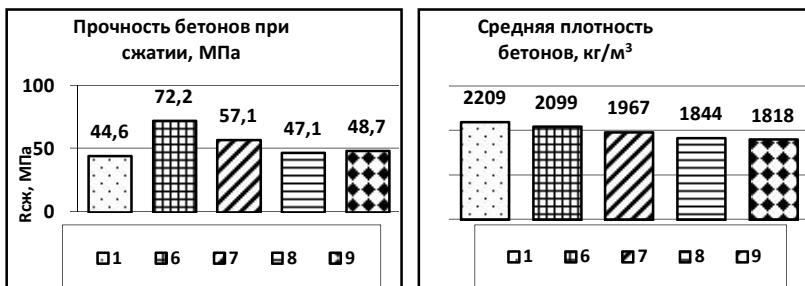


Рисунок 3 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней

плотности (б) бетонов с заменой кварцевого песка зольными микросферами

При замене плотного кварцевого песка пористым керамзитовым в количестве 25, 50, 75, 100% по объему (составы 10-13 табл. 3) также наблюдается снижение средней плотности бетонов от 4,5 до 15,1% (рис. 5), а бетоны характеризуются пределом прочности при сжатии от 48,7 (при 100% замене плотного песка пористым) до 71,5 МПа (25% керамзитового песка), что на 9,2% и 60,3% соответственно выше от контрольного состава 1 (табл. 3).

Бетонные смеси с заменой кварцевого песка керамзитовым характеризовались высокой начальной подвижностью, однако она резко уменьшалась с увеличением доли пористого мелкого заполнителя вследствие его водопоглощения. Так, при 50% замене мелкого заполнителя бетонная смесь имеет высокую текучесть, характеризующуюся диаметром расплыва конуса более чем 500 мм, тогда как начальная подвижность бетонных смесей с 75% 100% заменой мелкого заполнителя характеризуются осадкой конуса 145и 125 мм. соответственно.

Более высокие значения показателя предела прочности при сжатии бетонов с керамзитовым песком по сравнению с контрольным составом вероятно можно связать с уменьшением эффективного водоцементного отношения вследствие поглощения пористым заполнителем части воды затворения, которая постепенно будет доступна для гидратации цемента.

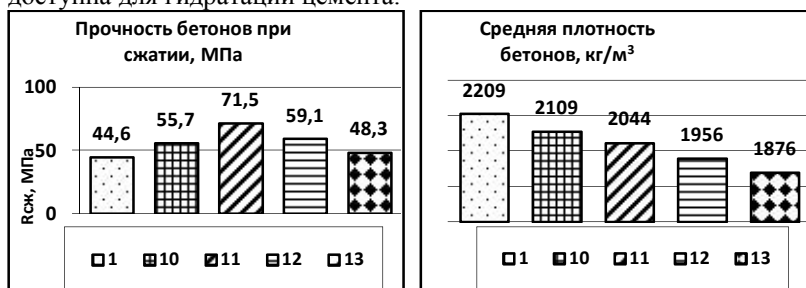


Рисунок 4 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) бетонов с заменой кварцевого песка керамзитовым

Исходя из полученных данных о влиянии зольных микросфер и керамзита фракции 5-10 мм на показатели физико-механических свойств бетонов, рассмотрена целесообразность одновременной замены кварцевого песка зольными микросферами в количестве 50, 75 и 100% и гранитного щебня керамзитом в количестве 25% по объему (составы 14-16 табл.3).



Рисунок 5 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) бетонов с заменой кварцевого песка на зольными микросферами и гранитного щебня керамзитовым

Бетонные смеси имеют высокую подвижность, характеризующуюся диаметром расплыва конуса более чем 500 мм, при этом не наблюдалось резкой потери подвижности во времени.

При такой комбинации заполнителей возможно получение бетонов, характеризующихся средней плотностью от 1553 до 1892 кг/м³ и показателями предела прочности при сжатии от 35,6 до 66,2 МПа (рис 5). Более высокие значения предела прочности при сжатии бетонов при меньшем показателе средней плотности (более высокий коэффициент конструктивного качества) также можно связать с уменьшением эффективного значения водоцементного отношения вследствие поглощения части воды затворения крупным пористым заполнителем.

Выводы

Разработаны составы конструкционных легких бетонов с частичной (полной) заменой плотных заполнителей пористыми, характеризующиеся пределом прочности при сжатии 35,8-59,8 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения и средней плотностью в высушенном состоянии 1553-1967 кг/м³, коэффициентом конструктивного качества – ККК 23-35. При этом в качестве заполнителей бетона использованы рядовой низкомарочный керамзит и отход промышленности – зольные микросферы. Такой бетон может найти эффективное применение в ограждающих конструкциях высотных зданий, в длинно-пролётных несущих конструкциях мостов, в конструкциях новых архитектурных форм.

Summary

Structures of concretes with partial replacement of dense aggregates by porous, are developed with: a compression strength at the age of 28 days normal hardening 35-60 MPa, average density of 1553-1967 kg/m³, which can be carried to the light weight aggregate concretes with high factor of constructive quality. The influence of small and coarse expanded aggregates (fly-ash microspheres, expanded clay sand, and expanded clay) as partial (full) replacement of dense small and coarse aggregates to workability of concrete mixes, average density and compressive strength of structural light weight aggregates concretes were investigated.

Литература

1. Wandell T. Cenospheres: from waste to profits // American Ceramic Society Bulletin. – 1996. – Vol. 75.
2. Вальц К., Вишерс Г. Конструктивный высокопрочный легкий бетон.— М.: Изд-во лит. по строит., 1969.—80 с.
3. Горчаков Г. И. Повышение трещиностойкости и водостойкости легких бетонов/ Горчаков Г. И и др. М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 158 с.
4. Иванов И. А. Исследование свойств пористых заполнителей и легких бетонов посредством структурной модели/ Иванов И. А., Макридин Н. И. // Final Reports of the Simposium Rilem. – 1967. – Budapest. – С. 176—181.
5. Иванов И. А. Новые данные о структурных особенностях конструктивных легких бетонов: // Структура и деформативность легких и некоторых специальных бетонов. – 1970. – Вып. V. – С. 73 – 79.
6. ACI 211.2-98 (Reapproved 2004) "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete" (ACI 211.2-98) Reported by ACI Committee 211. – Detroit Michigan: American Concrete Institute, 2004. – 20 p.
7. Shannag M.J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures / M.J. Shannag // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 658-662.
8. Jacek Sliwinski. New Generation Cement Concretes. Ideas, Design, Technology and Applications / Jacek Sliwinski et al // LLP – Erasmus: 9203-0574/IP/Kosice 03/REN. – 2010. – 189 pp.
9. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete / EuroLightCon - Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete: Document BE96-3942/R23, June 2000 – 50 pp.
10. Bai Y. Properties of light-weight concrete manufactured with fly ash, furnace bottom ash and Lytag / Y. Bai, R. Ibrahim, P.A.M. Basheer // Intern Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. 2004. – P. 77-88.
11. Holland R.B. High Strength Lightweight Concrete Properties of the I-85 Ramp over State Route 34 / R.B. Holland, F.L. Kahn // HPC Bridge Views. - Issue 61, May/June 2010. – P. 1-10.

12. Sadrekarimi A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete / A. Sadrekarimi // J. of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, No 3. – P. 409-417.
13. K. Ganesh. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume / K. Ganesh Babu, D. Saradhi Babu // Cem.and Con. Res. – 2003. – Vol. 33. – P. 755-762.
14. Баженов Ю.М. Технология бетона/ Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.
15. Kenneth S. Engineering properties of structural lightweight concrete / S. Kenneth, P.E. Harmon // [http://www.stalite.com/uploads/ Engineering properties. pdf](http://www.stalite.com/uploads/Engineering_properties.pdf).
16. Subasi S. The effect using fly-ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate/ S. Subasi // Scientific Research and Essay. – 2009. – Vol 4 (4), April. – P.275-288.
17. Yasar E. High strength lightweight concrete made with ternary mixtures of cement-fly ash-silica fume and scoria as aggregate / E. Yasar, C.D. Atis, A. Kilic// Turkish J. Eng. Env. Sci. – 2004. – Vol. 28. – P. 95-100.

