

УДК 691.535

Ю.В. ИСАЕВА, инженер (djuli_ya@mail.ru), Е.Г. ВЕЛИЧКО, д-р техн. наук (pct44@yandex.ru),
А.Ш. КАСУМОВ, инженер

Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Оптимизация структуры сверхлегкого цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов

Приведены результаты разработки облегченных и сверхлегких цементных растворов, обладающих низкой плотностью при достаточной прочности, достигнутых благодаря оптимизации структуры с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов. В качестве наполнителя предложено использовать полые стеклянные микросферы, а в качестве вяжущего – высокодисперсный цемент. Решена задача достижения максимально плотной упаковки микросфер, т. е. их максимальной объемной доли в объеме раствора за счет уменьшения толщины прослоек цементной матрицы. Определено, что тонкоизмельченный портландцемент можно заменить на новое высокоэффективное минеральное вяжущее «Микродур». В результате оптимизации структуры с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов и их энергетического состояния получены облегченные и сверхлегкие цементные растворы с высокими строительно-техническими свойствами.

Ключевые слова: цементный раствор, оптимальная структура, плотность, прочность, полые стеклянные микросферы, ультрадисперсное вяжущее вещество.

Yu.V. ISAEVA, Engineer (djuli_ya@mail.ru), E.G. VELICHKO, Doctor of Sciences (Engineering) (pct44@yandex.ru), A.Sh. KASUMOV, Engineer
Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavl Avenue, 129337, Moscow, Russian Federation)

Structure Optimization of Ultra-Light Cement Mortar with Due Regard for Geometrical and Physical and Mechanical Characteristics of Components

Results of the development of lightweight and ultra-light slurries having a low density with sufficient strength due to optimizing their structure with due regard for the geometric and physical-mechanical characteristics of components are presented. As a filler in these mortars, it is proposed to use hollow glass microspheres and as a binder – ultrafine cement. Because the hollow glass microspheres are more than 10 times lighter than cement, the increase in their share in the volume solution will reduce its average density. At that, it is necessary that the microspheres are characterized by maximally dense packing and are surrounded by a dense matrix, that is, their volume fraction in the bulk solution would be maximal. It is expected to achieve this fact by reducing the thickness of layers of the cement matrix, which is achieved by more fine dispersing the cement particles, or replacing the Portland cement by a new high efficient mineral binder – «Микродур». As a result of optimization of the structure with due regard for the geometric and physical-mechanical characteristics of components and their energy states, lightweight and ultra-light cement mortars with high construction and technical properties have been obtained.

Keywords: cement mortar, optimal structure, density, strength, hollow glass microspheres; ultrafine binder.

Облегченные и сверхлегкие цементные растворы широко применяются как в промышленном и гражданском (в качестве кладочных), так и в специальном строительстве (в качестве тампонажных). Обладая низкой теплопроводностью, такие растворы имеют низкие прочностные показатели, что является результатом снижения их средней плотности и повышенной водопоглощаемости. Известно, что структура и свойства строительных материалов функционально связаны с их составом. При снижении плотности и прочности материалов эти закономерности проявляются в большей степени, в том числе наиболее значимо в облегченных строительных и тампонажных растворах, получающих все более массовое применение в современном строительстве [1].

Минимальная средняя плотность раствора может быть достигнута путем получения максимальной плотности упаковки частиц тонкодисперсного наполнителя с соответствующим уменьшением объемной доли цементного камня. При разработке составов существующих строительных и тампонажных растворов комплексно не учитываются геометрические и физико-механические характеристики компонентов, что не позволяет максимально снизить среднюю плотность при обеспечении их требуемой прочности.

Решением обозначенной проблемы является разработка оптимальной структуры облегченного цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов и энергетического их состояния [2–4].

Задачи исследования решались с использованием физико-химической механики, основных законов те-

рии молекулярного отбора, термодинамики, молекулярной физики, а также анализа данных, содержащихся в современных научно-технических источниках, экспериментальных работах, с применением методов математического планирования эксперимента.

Выше было указано, что основным недостатком облегченных цементных растворов являются низкие прочностные показатели как результат снижения плотности. Однако при использовании наполнителей, имеющих низкую среднюю плотность и относительно высокую прочность, можно добиться значимого снижения плотности цементных растворов, обеспечивая при этом их достаточную прочность. Такими материалами являются, например, прочные тонкодисперсные стеклянные частицы в виде микросфер – полые стеклянные микросферы [5].

Полые микросферы производятся в России, США, Японии, Франции и других странах. Они обладают хорошей теплоизолирующей способностью, характеризуются малой плотностью и высокой удельной прочностью при объемном сжатии. В отличие от наполнителей сложной неизометричной формы вокруг частиц микросфер отсутствует неравномерное распределение концентраций напряжений, существенно снижающих их прочность и интегральную прочность раствора в целом.

Свойства полых стеклянных микросфер, произведенных на Андреевском заводе «Стеклопластик», приведены в табл. 1.

При одном и том же наполнителе свойства облегченного цементного камня будут зависеть от свойств це-

Таблица 1

Свойства полых стеклянных микросфер Андреевского завода «Стеклопластик»

Марка	Группа	Плотность, кг/м ³		Прочность, МПа, при объемном сжатии*	Удельная прочность, МПа, при плотности	
		средняя	насыпная		средней	насыпной
МС-В	1	200	120	2	10	16,7
	2	250	150	3	12	20
	3	290	180	4	13,8	22,2
МС-ВП	2	280	160	6	21,4	37,5
МС-ВП-А9х	1л	230	150	4	17,4	26,7
	2	280	180	6	21,4	33,3
	3	280	180	9	32,1	50
	4	290	180	13	44,8	72,2
	5	400	260	19	47,5	73,1

* Прочность при объемном сжатии в автоклаве в воде определялась при 10% разрушении.

Таблица 2

Характеристики дисперсности суспензии «Микродур»

Марка	Количество частиц с диаметром, мм, %						Удельная поверхность, см ² /г
	< 2	< 4	< 6	< 9,5	< 16	< 24	
S	17	34	49	68	90	95	8000
F	19	45	60	80	95	–	12000
U	25	55	78	95	–	–	16000
X	45	80	95	–	–	–	24000

ментной матрицы. Основные свойства цемента, в том числе его активность и скорость твердения, определяются не только химическим и минеральным составом клинкера, формой и размерами кристаллов алита и белита, наличием тех или иных добавок, но и в большей степени тонкостью помола продукта, его дисперсным составом, а также формой частиц порошка.

Каждая фракция частиц цемента оказывает различное влияние на синтез прочности цементного камня в разные сроки его твердения. Так, на показатели активности (прочность в возрасте 28 сут) основное влияние оказывает содержание фракций частиц порошка до 20 мкм; крупные частицы влияют на прочность в более поздние сроки твердения, в том числе за счет их прочных реликтов. Крупные цементные частицы при относительно небольшой дисперсности слабо вовлекаются в реакцию с водой, образуя небольшое количество гидратных фаз, и, наоборот, частицы активного диапазона размеров оказывают основное влияние на интенсивность гидратационных и гидролизных процессов, связанных в первую очередь с образованием аморфных частиц цементного геля, т. е. компонента, вносящего основную вклад в прочность цементного камня.

Диспергирование цемента до размера частиц в несколько сотен нанометров приводит к изменению физико-химических свойств материала, улучшению технологических параметров, повышению капиллярного потенциала и водоудерживающей способности.

Варируя содержание в порошке частиц различных фракций, возможно получать высокомарочные быстротвердеющие цементы, что позволит регулировать прочность бетонных изделий в разные сроки твердения, а также создавать оптимальную структуру цементного камня с прослойками минимальной толщины в облегченных растворах, приготовленных с использованием микросфер [6–8].

С 1995 г. в Германии и относительно недавно в России (ООО «ВЕСТА ИНЖ», ООО «Гидроспецстрой», ОАО ЦНИИС НИЦ «Тоннели и метрополитены») применяется новое высокоэффективное минеральное вяжущее – Mikrodur («Микродур») – продукт воздушной сепарации пыли при помоле клинкерных цементов с марками до 600. «Микродур» отличается высокой степенью дисперсности и относится к особо тонкодисперсным вяжущим (ОТДВ). Выпускаются четыре марки «Микродур» (табл. 2).

При использовании в качестве наполнителя полых стеклянных микросфер и вяжущего различной дисперсности можно получать оптимальную структуру, при которой частицы микросфер будут характеризоваться плотной упаковкой, их доля в объеме будет максимальной, а цементный камень, выполняя роль связующей прослойки, будет скреплять их в прочный материал конгломератного типа строения.

Оптимальной можно считать малодефектную структуру раствора, в которой составляющие (компоненты, фазы, поры и др.) равномерно распределены по объему, имеется непрерывная прослойка вяжущего вещества в виде пространственной матрицы при минимальном водоцементном отношении и прочной связи гидратных фаз с частицами наполнителя. Кроме того, важным признаком оптимальной структуры материала теплоизоляционного типа является наибольшее насыщение упаковки легкими прочными частицами твердой фазы. Очевидно, что получение максимального наполнения структуры тонкодисперсными частицами заполняющего компонента может наблюдаться при минимальной их раздвижке частицами вяжущего вещества. Однако более эффективной дисперсностью вяжущего вещества для облегченных цементных растворов с использованием тонкодисперсного наполнителя будет применение высокодисперсного вяжущего со средним размером ча-

Таблица 3

Свойства облегченного кладочного раствора оптимальной структуры

Состав, мас. %	Средняя плотность камня, кг/м ³	Прочность, МПа, при		Теплопроводность, Вт/(м·°С), при		Удельная прочность, МПа
		изгибе	сжатии	изгибе	сжатии	
МК1-100; ПСМС-36	570	11	26,5	46,45	19,28	0,19
МК2-100; ПСМС-31	611	8,5	26,25	42,98	13,92	0,21
ПЦ-100; ПСМС-4,7	1384	15,25	45,75	33,05	11,02	0,61

стиц, равным или значимо меньшим размера частиц наполнителя.

Учитывая сферическую форму равных по размеру частиц наполнителя, можно предположить, что в объеме материала им может быть присуще геометрически пространственное расположение, от простой кубической (пустотность 48%) до гексагональной (26%) упаковки. Очевидно, что при равной дисперсности частиц наполнителя и вяжущего вещества и простой кубической упаковке частиц наполнителя наиболее вероятно распределение частиц вяжущего вещества с учетом их электрокинетического потенциала в противоположных узлах по диагонали куба. При таком распределении частиц наполнителя и вяжущего вещества в элементарных ячейках содержание цементирующего вещества будет достаточным для создания относительно прочной с высокой степенью упорядоченности структуры раствора конгломератного типа. Содержание вяжущего вещества в этом случае составит 25% объема частиц наполнителя, а его масса – 400–410 кг/м³, т. е. средняя плотность облегченного раствора – 520–635 кг/м³. Учитывая фактическую неоднородность размера частиц наполнителя и вяжущего вещества, а также неизометричность частиц последнего, будет наблюдаться увеличение степени неупорядоченности образующейся системы, ее энтропии, снижение прочности. Следовательно, средняя плотность облегченного раствора и его свойства будут иметь статистически неоднородный характер. Необходимо отметить, что при простой кубической упаковке частиц, соответственно низкой степени насыщения объема твердой фазой (наполнитель, вяжущее вещество) и высоким капиллярном потенциале упаковки тонкодисперсных частиц водопотребность такого облегченного строительного раствора будет высокой, в том числе по этой причине требуется обязательное применение суперпластифицирующих добавок.

При образовании наиболее плотной гексагональной упаковки частиц наполнителя (нижнее ограничение по межчастичной пустотности геометрически правильных пространственных структур, состоящих из частиц одного диаметра – решеток Браве) для обеспечения прочной структуры облегченного раствора потребуется то же количество частиц вяжущего вещества, которые будут распределяться в центре параллельных гексагональных плоскостей, а степень наполнения частицами заполняющего компонента увеличится в 1,5 раза. Очевидно, что при меньшем объеме межчастичных пустот снизится водопотребность образовавшейся системы, повысится прочность, а также может наблюдаться снижение теплопроводности за счет более тонкодисперсной структуры порового пространства, в том числе с учетом размера пор в микросферах, существенно уменьшающих вклад конвективной составляющей в теплопроводность раствора.

Еще более эффективным, но относительно энергозатратным является использование вяжущего вещества с дисперсностью, при которой его частицы распределяются в межчастичных пустотах правильных геометрических структур (кубическая, гексагональная и др.), мак-

симально заполняя их и контактируя с каждой частицей наполнителя, например «Микродур» марок U, X.

Содержание частиц цементирующего вещества, объем которых будет достаточен для образования прочного облегченного раствора, сократится в два раза, концентрация твердой фазы в единице объема увеличится, повысится координационное число каждой частицы, связность растворной смеси и прочность системы облегченного раствора в целом. Однако, учитывая фактическую неоднородность размера частиц наполнителя и вяжущего вещества, в таких системах, так же как и при равнодисперсном составе их частиц, будет наблюдаться увеличение неупорядоченности структуры, но в меньшей степени.

Необходимо отметить, что положительным аспектом применения в качестве заполняющего компонента микросфер из щелочестойкого стекла с алюмонатрий-борсиликатным поверхностным слоем, образовавшимся вследствие молекулярного отбора [9], является его псевдомосорбционное взаимодействие с составляющими цементного камня, обеспечивая высокую прочность контактной зоны гидратных фаз и микросфер без коррозии их поверхности. Образование такой контактной зоны обусловлено ориентационным атомно-молекулярным взаимодействием однородных по составу химических элементов гидратных фаз цементного камня и поверхности микросфер вследствие молекулярного отбора. Прочная контактная зона и оказываемое на нее давление продуктов гидратации вяжущего вещества за счет увеличения их в объеме относительно объема исходных минералов в 2,2 раза по Паурсу приведет к однородному объемно-напряженному состоянию микросфер, повышая их трещино- и химическую стойкость, а также долговечность облегченного раствора в целом. Предполагается, что использование жидкого натриевого стекла в малом количестве может оказать положительное влияние на строительно-технические свойства облегченного раствора, приготовленного с использованием полых стеклянных микросфер.

В работе были получены цементные растворы оптимальной структуры. В табл. 3 приведены составы цементных растворов в виде долевого соотношения основных компонентов растворной смеси (портландцемента (ПЦ), «Микродур» образцов (МК1) и (МК2), полых стеклянных микросфер (ПСМС)) и свойства полученных растворов оптимальной структуры. «Микродур» МК1 и МК2 марки X (табл. 2), но с разным средним диаметром частиц. При использовании МК1 с меньшим размером частиц получают наилучшие показатели по прочности, плотности и теплопроводности.

Полученные результаты подтверждают справедливость научной гипотезы о том, что оптимизация структуры с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов и их энергетического состояния является необходимым условием получения облегченных и сверхлегких цементных растворов, обладающих высокими строительно-техническими свойствами.



Список литературы

- Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семёнов В.С. Общая схема получения облегченных и сверхлегких цементных растворов // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2010. № 11. С. 32–33.
- Орешкин Д.В., Беляев К.В., Макаренко Ю.В. Моделирование и разработка оптимальной структуры сверхлегкого цементного раствора // *Строительные материалы*. 2011. № 5. С. 42–43.
- Белов В.В., Образцов И.В., Куляев П.В. Методология проектирования оптимальных структур цементных бетонов // *Строительные материалы*. 2013. № 3. С. 17–18.
- Белов В.В., Смирнов М.А. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси // *Строительные материалы*. 2009. № 9. С. 17–18.
- Асланова М.С., Стеценко В.Я., Шустров А.Ф. Полые неорганические микросферы // *Обзорн. инф. «Химическая промышленность за рубежом»*. М.: НИИТЭХИМ, 1981. Вып. 9. С. 14–65.
- Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 476 с.
- Хинт И.А. Основы производства силикальцитных изделий. М.–Л.: Госстройиздат, 1962. 642 с.
- Волженский А.В., Попов Л.Н. Смешанные портландцементы повторного помола и бетоны на их основе. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. 107 с.
- Величко Е.Г. Строение и основные свойства строительных материалов. М.: ЛКИ, 2014. 496 с.

References

- Oreshkin D.V., Belyaev K.V., Semenov V.S. Thermal properties, porosity and water vapor permeability of light-weight mortars. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2010. No. 8, pp. 51–55. (In Russian).
- Belyaev K.V., Makarenkova U.V., Oreshkin D.V., Y.V. Simulation and development of optimal structure of super-light cement mortar. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 5, pp. 42–43. (In Russian).
- Belov V.V., Obraztsov I.V., Kulyaev P.V. Methodology of design of optimal structures of cement concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2013. No. 3, pp. 17–18. (In Russian).
- Belov V.V., Smirnov M.A. formation of optimal macrostructure of building mix. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials] Attachment Nauka. 2009. No. 9, pp. 17–18. (In Russian).
- Aslanova M.S., Stetsenko V.Y., Shustrov A.F. The hollow inorganic microspheres. Overview "Chemical industry abroad". Moscow: NIITEKHIM. 1981. Issue 9, pp. 14–65. (In Russian).
- Volzhensky A.V. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva [Mineral binders]. Moscow: Sroyizdat. 1986. 476 p.
- Khint I.A. Osnovy proizvodstva silikal'tsitnykh izdelii [Basics of silicalcite products]. Moscow: Gosstroizdat. 1962. 642 p.
- Volzhensky A.V., Popov L.N. Smeshannyye portlandtsementy povtornogo pomola i betony na ikh osnove [Mixed Portland cement re-grinding and concrete on their basis]. Moscow: State Publishing House of Literature on construction, architecture and building materials. 1961. 107 p.
- Velichko E.G. Stroenie i osnovnye svoystva stroitel'nykh materialov [Structure and basic properties of building materials]. Moscow: 2014. LKI. 497 p.

VIII Международная конференция

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ NTC-2016

25–30 марта 2016 г.

Шарм-эль-Шейх, Египет

Организаторы конференции

Национальный исследовательский центр жилья и строительства (НБРС)

Египетско-российский университет (ERU)

Ижевский государственный технический университет

им. М.Т. Калашникова

Египетский союз инженеров



Тематика конференции

- Нанокompозиты в строительных материалах
- Нанотехнологии в строительстве
- Защита от пожара с помощью наночастиц
- Нанотехнологии в кондиционировании воздуха
- Наноструктурирующие материалы в архитектуре
- Производство лакокрасочных материалов с нанодобавками
- Нанотехнологии стекол и керамики
- Нанотехнологии для энергоэффективности в зданиях
- Моделирование нанокompозитов
- Модификация минеральных вяжущих наносистемами

Информационная поддержка – журнал «Строительные материалы»®

Сайт конференции: http://inter.istu.ru/russian/nano_r.html

Контактная информация в России

Профессор Григорий Иванович Яковлев

ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

E-mail: gyakov@istu.ru

Тел.: 8-91285666688. Факс: +7(3412)59 25 55

Контактная информация в Египте

Профессор Шериф Солиман Хелми

Египетско-российский университет

Cairo High Road, Bard City-Suez

E-mail: president@eruegypt.com

Тел.: +20(02)28643349, (02)28643341. Факс: +20(02)28643332

Как подготовить к публикации научно-техническую статью



Журнальная научно-техническая статья — это сочинение небольшого размера (до 3-х журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Строительные материалы»® для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

Библиографические списки цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНИПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–5 лет в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние 5 лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

ВНИМАНИЕ! С 1 января 2014 г. изменены требования к оформлению статей. Обязательно ознакомьтесь с требованиями на сайте издательства в разделе «Авторам»!

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями изданий:

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 слов на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы»®, ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов (заполненная информационная карта). Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»® был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf

Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства <http://www.rifsm.ru/page/7>