

**К.Н. Южаков, А.С. Пермяков, Н.С. Семейных, Ю.А. Мезенцева
K.N. Yuzhakov, A.S. Permyakov, N.S. Semeynyh, Y.A. Mezenceva**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

**ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ СОВМЕЩЕННОГО
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ
НАНОУГЛЕРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ**

**CELLULAR CONCRETE WITH COMBINED STRUCTURE
FORMATION MODIFIED BY CARBON NANOSYSTEMS**

Рассмотрены пути упрочнения ячеистых бетонов совмещенного структурообразования с сохранением теплоизолирующей способности и низкой плотности материала. Модификация производится путем введения углеродных наносистем с совместным влиянием различных видов добавок.

Ключевые слова: ячеистый бетон, углеродные наноструктуры, поризованный бетон, микрокремнезем, известь.

The ways of strengthening of cellular concrete with combined structure formation are studied; though heat insulating ability and low density of the material are saved. The modification is made by a simultaneous introduction of carbon nanosystems and various additives.

Keywords: cellular concrete, carbon nanostructures, aerated concrete, microsilica, lime.

Одной из современных тенденций развития строительного рынка является широкое внедрение ячеистого бетона. Под понятием «ячеистый бетон» подразумевается искусственный камень с равномерно распределенными порами. Такая структура определяет ряд высоких физико-механических свойств ячеистого бетона и делает его весьма эффективным строительным материалом.

Современное производство изделий из всех видов ячеистых бетонов составляет около 45–50 млн м³ в год, в том числе в России – свыше 3,0 млн м³, Польше – 4,0 млн м³, Германии – 3,6 млн м³, Японии – 3,5 млн м³, Великобритании – 2,8 млн м³, Швеции – 1,5 млн м³.

Высокая эффективность применения изделий из ячеистых бетонов обусловлена относительно высокими прочностными и эксплуатационными свойствами при низкой плотности, позволяющей значительно снизить массу конструкции при обеспечении требуемых конструктивных и теплоизоляци-

онных показателей, что в свою очередь создает предпосылки для эффективного решения задач ресурсо- и энергосбережения в строительстве при возведении зданий и сооружений [1].

На сегодняшний день наиболее распространенными и популярными видами ячеистых бетонов являются пенобетоны и газобетоны на известково-кремнеземистом или цементном вяжущем. Пенобетон – легкий ячеистый бетон, получаемый в результате твердения поризованного раствора на основе цемента, кварцевого песка, воды и заранее приготовленной пены. В качестве наполнителя также могут быть использованы карбонатные пески, получаемые при переработке горных пород, шлаковые отходы тепловых электростанций и другие подобные сыпучие материалы. Кроме того, в состав сырьевых компонентов могут быть введены различные красители для офактуривания стеновых панелей, ускорители твердения пенобетонной массы, пластификаторы, дисперсные армирующие добавки. Пена обеспечивает необходимое содержание воздуха в бетоне и его равномерное распределение во всей массе в виде замкнутых ячеек. В качестве пенообразователя могут быть использованы различные органические вещества, получаемые на основе натурального протеина, и синтетические, получаемые при производстве моющих средств. Твердение пенобетона на цементном вяжущем возможно осуществлять в естественных условиях, что позволяет использовать его непосредственно на месте применения.

Газобетон (газосиликат) – легкий ячеистый бетон, получаемый в результате твердения поризованного раствора на основе известково-кремнеземистого вяжущего, кварцевого песка, цемента, газообразователя и воды. После смешивания компонентов происходит процесс газообразования за счет физико-химических реакций. Выделяющийся газ увеличивает в 5 раз объем сырой смеси. Полученные пористые массивы после твердения поступают в автоклав, где при определенных условиях идет упрочнение массива. Изделия из ячеистого бетона изготавливают в заводских условиях и к непосредственному заказчику поступают в виде готовых к применению блоков, перемычек, плит и т.д.

Следует отметить возможность сочетания двух способов получения ячеистой структуры: пенообразования и газобразования. Полученный пеногазобетон позволяет решить основные проблемы ячеистых бетонов, совмещая плюсы пено- и газобетонов.

Традиционными недостатками ячеистых бетонов остаются низкая сопротивляемость растягивающим напряжениям и повышенная хрупкость, в результате чего изделия приобретают нежелательные сколы и трещины при изготовлении, транспортировании и монтаже. Неавтоклавные пенобетоны характеризуются к тому же сильными деформациями усадки, что приводит

к интенсивному трещинообразованию и даже разрушению изделий [2, 3]. Производство эффективного по теплофизическим характеристикам неавтоклавного пенобетона низких марок по средней плотности является проблемным из-за сложности обеспечения стабильной тонкодисперсной ячеистой структуры и высокой прочности, зависящих от рецептурно-технологических факторов.

Одним из путей решения данной задачи является разработка принципов проектирования неавтоклавных ячеистых материалов с направленно регулируемыми свойствами и эффективным структурированием на всех размерных уровнях организации матрицы для производства композитов строительного назначения, с заданной гетерогенностью структуры. Именно при использовании таких подходов можно перейти на новый этап производства строительных материалов, изделий и конструкций, отличающихся простотой, мобильностью, экономичностью, высокими эксплуатационными свойствами и конкурентоспособностью продукции.

Анализ исследований и теоретических данных [4] позволил определить два основных пути упрочнения материалов с сохранением теплоизолирующей способности и низкой плотности материала: первый – это упрочнение каркаса, второй – улучшение поровой структуры.

Известно [5], что прочность ячеистого бетона определяется прочностью межпоровых перегородок. Причем для достижения необходимого коэффициента конструктивного качества она должна достигать значений не менее 30 МПа. Для упрочнения каркаса разрабатываются различные способы уплотнения межпоровых перегородок за счет введения наполнителей, расширяющихся цементов, волокнистых добавок, уменьшения количества воды затворения, а также введения нанокремнеземных структур (углеродных нанотрубок и фуллеренов), которые осуществляют направленное структурообразование в ячеистых бетонах [6].

Рациональная упаковка частиц наполнителя позволяет достичь повышения плотности и, соответственно, прочности межпоровых перегородок. При этом наиболее компактная упаковка достигается при использовании полидисперсного наполнителя. Эксперименты показали, что при совместном введении в состав композиции золы-уноса и молотого шлака при соотношении 1:1 механическая прочность цементного камня на 40 % выше по сравнению с композицией на одном виде наполнителя (таблица).

Использование в составе композиции крупно- и мелкодисперсных компонентов в количестве 40 % доменного шлака и 10 % микрокремнезема позволяет получить максимальную прочность пенобетона [7].

Зависимость прочности при сжатии от состава композиции

№ п/п	Состав композиции, мас. %*			В/Ц	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут**		
	Цемент	Шлак	Зола		7	14	28
1	50	5	45	0,27	14,6	20,4	33,6
2	50	10	40	0,29	15,7	21,9	27,8
3	50	15	35	0,31	15,6	18,3	26,4
4	50	20	30	0,31	11,4	17,7	32,8
5	50	25	25	0,32	16,5	34	51,1
6	50	30	20	0,31	10,8	20	30,9
7	50	35	15	0,32	18,8	21,9	36,6
8	50	40	10	0,32	17	28,9	42,1
9	50	45	5	0,31	16,6	22,9	34,7

Примечания. * Подвижность раствора 16 см по Суттурду. ** Образцы-кубики 40×40×40.

Микрокремнезем представляет собой ультрадисперсный материал, состоящий из частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки печей при производстве кремнийсодержащих сплавов. Основным компонентом материала является диоксид кремния аморфной модификации. Микрокремнезем не только играет роль наполнителя, но и проявляет себя как гидравлически активная минеральная добавка (рисунок).

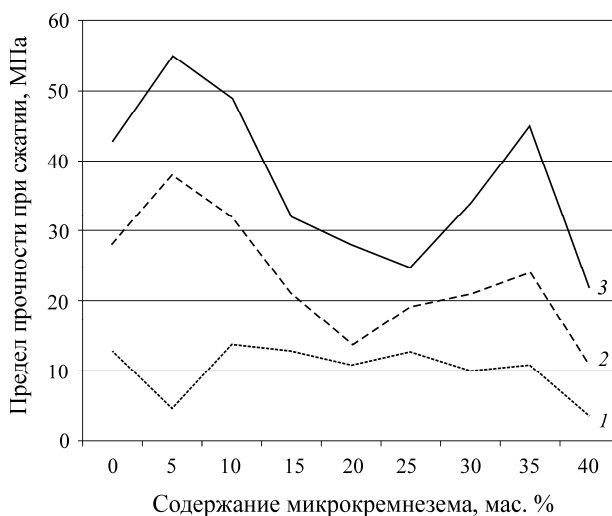


Рис. Зависимость механической прочности камня от содержания микрокремнезема в составе смеси и от сроков твердения: 1 – прочность через 7 сут твердения; 2 – через 14 сут; 3 – через 28 сут

Как показали исследования, для достижения максимальной прочности межпоровой перегородки оптимальным является совместное использование нескольких видов наполнителей с различной природой гидравлической активности и величиной дисперсности [8]. Следует отметить, что повышение компактности упаковки частиц наполнителя положительно влияет на газодерживающую способность бетонной массы.

Улучшенные механические свойства цементных пенобетонов достигаются при использовании в качестве модифицирующих добавок углеродных нанодисперсных систем [9]. Установлено [10], что введение углеродных наносистем в состав минеральной вяжущей матрицы приводит к ее структурированию с формированием кристаллогидратных новообразований повышенной плотности и прочности. При этом отмечается, что использование даже сверхмалых количеств углеродных наносистем приводит к повышению прочности композиционных материалов в 2–3 раза [11].

Наночуглеродные структуры можно использовать не только как центры кристаллизации, но и как объекты, изменяющие направление и регулирующие скорость физико-химических процессов в твердеющих материалах [12].

Анизотропия и высокая механическая и термодинамическая устойчивость формы большинства наноструктур определяют стабильность их свойств.

Результаты проводимых в настоящее время научно-исследовательских работ по наноструктурированию строительных композиций с использованием фуллероидных наномодификаторов позволяют прогнозировать создание совершенно новых строительных материалов, обладающих уникальными свойствами [13].

Проведенные исследования по применению углеродных нанотрубок в тяжелых бетонах и неавтоклавном пенобетоне открывают перспективы успешного использования их в ячеистых бетонах совмещенного структурообразования и получать так называемые пеногазобетоны. Управление процессами структурообразования неавтоклавного пеногазобетона возможно обеспечить за счет упрочнения цементной матрицы путем введения наномодификаторов (второй путь упрочнения материалов). Улучшение поровой структуры заключается в формировании матрицы композита на всех размерных уровнях с использованием как физико-химических процессов, так и технологических факторов при формировании структуры материала на различных этапах его производства. Пеногазобетон за счет варьирования состава комплексного порообразователя должен обладать заданной степенью поризации и стабильной гетеропористой структурой, что обеспечивает более плотную структуру межпоровых перегородок и, соответственно, улучшает технико-эксплуатационные показатели.

Механизм процесса структурообразования цементной матрицы ячеистого композита заключается в модифицировании вяжущего нанокристаллическими структурами, выступающими в качестве центров кристаллизации и интенсифицирующими рост гидратных новообразований вяжущего. Это обеспечивает снижение дефектности микроструктуры, влияющей на прочностные показатели композитов, за счет уменьшения количества негативной (разрывов, щелей, свищей) нано-, микро- и макропористости [7].

Положительный фактор при совмещении путей структурообразования (газопенная поризация) был найден при использовании в качестве активатора вспучивания добавки частично гашеной извести и сульфата натрия. Частично гашеную известь получали при смешивании молотой негашеной извести и наполнителя, содержащего заданное количество влаги. В составе добавки до 50 % извести находилось в виде гидратной извести, а другая часть содержала частицы негидратированного СаО. При карбонизации поверхностных слоев негидратированных частиц СаО в процессе выдерживания сырца наблюдается повышение времени гашения извести с 10 до 85 мин. Значительное количество тепла, которое выделяется при гашении извести за счет экзотермической реакции и образования водорода при действии газобразователя, а также теплота гидратации клинкерных минералов приводят к повышению температуры смеси до 60 °С уже через 2 ч после начала формования. Максимальная температура смеси до 80 °С может быть достигнута через 6 ч твердения.

Теоретические предпосылки физико-механических процессов указывают на то, что эффект саморазогрева, который можно назвать гидратационным автокатализом, положительно влияет на механическую прочность пеногазобетона. Выявлено, что высокая температура, развивающаяся в массиве, создает условия самопропаривания, что способствует ускорению процессов гидратации клинкерных минералов и приводит к увеличению гидратационной активности наполнителя. Повышенное давление в образованных пузырьках, которое создается водородом за счет реакции газообразования и испаряющейся влагой, уплотняет межпоровые перегородки, находящиеся в пластичном состоянии. Таким образом создаются стесненные условия, при которых развиваются процессы перекристаллизации первичных неустойчивых продуктов гидратации в более стабильные. В результате этого формируется структура с мелкими порами, что в результате влияет на прочность системы.

В настоящее время при поддержке кафедры «Строительного инжиниринга и материаловедения» и ПМК «Строительные материалы и специальные технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета проводятся эксперименты, направленные на изучение влия-

ния нанодисперсных углеродных добавок в ячеистые бетоны совмещенного структурообразования и выявление оптимальных количественных характеристик исходных компонентов.

Список литературы

1. Шагитов И.Н. Конструктивно-теплоизоляционный газобетон на основе местного сырья с добавкой серы и шлама производства хлористого бария: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2004. – 190 с.

2. Моргун В.Н. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения с компенсированной усадкой: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/Д, 2004. – 176 с.

3. Митина Н.А., Лотов В.А. Перспективы использования дисперсного армирования теплоизоляционных ячеистых бетонов // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: сб. докладов VI Всерос. науч.-практ. конф., 31 мая – 2 июня 2006 г., г. Бийск / ЦНИИХМ. – М., 2006. – С. 91–97.

4. Лотов В.А., Митина Н.А. Формирование оптимальной пористой структуры газобетона неавтоклавного твердения // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2000. – Т. 43, вып. 3. – С. 118–119.

5. Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Макарычев В.В. Ячеистые бетоны (технология, свойства и конструкции). – М.: Стройиздат, 1972. – 136 с.

6. Строкова В.В. Неавтоклавный ячеистый бетон на основе модифицированного вяжущего // Наука и молодежь в начале нового столетия: сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Губкин, 2007. – С. 65–68.

7. Удачкин В.И., Удачкин И.Б. Новые технологии в производстве пенобетона // Строительная газета. – 2005. – 22 июля. – С. 6.

8. Пат. 2164504 Российская Федерация, МПК⁷ С 04 В 38/02. Состав смеси для изготовления неавтоклавного газобетона / Лотов В.А., Митина Н.А. – заявл. 09.11.2004; опубл. 10.05.2006, Бюл. № 2276121. – 2 с.

9. Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированного цементного камня: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2009. – 19 с.

10. Модификация поризованных цементных матриц углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев [и др.] // Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 99–102.

11. Korzhenko A., Havel M. A Practical use of Graphis-trength carbon nanotubes in composites // Proceedings of the II International Conference 'Nanotechnology for green and sustainable construction'. – Cario, 2010. – P. 35–37.

12. Королев Е.В., Баженов Ю.М., Береговой В.А. Модифицирование строительных материалов наноуглеродными трубками и фуллеренами // Строительные материалы – наука. – 2006. – № 8. – С. 2–4.

13. Ялунина О.В., Бессонов И.В. Модификация материалов на основе гипса углеродными наносистемами // Строительные материалы – наука. – 2007. – № 9. – С. 12–13.

Получено 14.12.2012

Южаков Константин Николаевич – кандидат педагогических наук, доцент, ПНИПУ, СТФ, e-mail: yuzhakov.k@mail.ru.

Пермяков Александр Сергеевич – ассистент, ПНИПУ, СТФ, e-mail: permyakov.stf@mail.ru.

Семейных Наталья Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, СТФ, e-mail: smstf@pstu.ac.ru.

Мезенцева Юлия Алексеевна – магистрант, ПНИПУ, СТФ, ПСК-11-1м, e-mail: ula90mezen@yandex.ru.