

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*Кузнецова Е. Ф., ст. преп.,
Соболев Г. М., канд. техн. наук, проф.
Костромская государственная сельскохозяйственная академия
Соболев К. Г., канд. техн. наук, проф.
Университет Висконсин–Милуоки, США*

ПОЛУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЛИТЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И ОТХОДОВ КАМНЕОБРАБОТКИ

1100910asf@yandex.ru

Одним из направлений повышения эффективности бетона является увеличение его подвижности, что приводит к значительному снижению затрат труда и увеличению качества изделий. Исследование возможности получения эффективных литых бетонных смесей и бетонов на местных материалах с использованием отходов камнеобработки основывается на системном подходе к изучению взаимодействия отдельных компонентов бетонной смеси.

***Ключевые слова:** эффективные литые бетоны, местные материалы, отходы камнеобработки, расслаивание бетонной смеси, наносилика.*

В настоящее время для строительства зданий и сооружений широко применяются современные материалы, отвечающие установленным требованиям качества. В связи с чем, наиболее распространенным материалом стал монолитный бетон.

Поэтому получение эффективных литых бетонных смесей и бетонов на их основе с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами становится одним из наиболее важных направлений совершенствования технологии бетона [1].

Достигнуть данной цели можно через рациональный подбор состава бетонной смеси. Однако, в процессе проектирования следует учитывать, что высокая подвижность в большинстве случаев обеспечивается большим расходом воды, что в

$$\frac{V}{C}_{ист} = \frac{V - V_{п} \cdot П - V_{щ} \cdot Щ}{C} \leq \frac{V}{C}_{кр},$$

где C , V , $П$ и $Щ$ – расход цемента, воды, песка и щебня; $V_{п}$, $V_{щ}$ – водопотребность песка и щебня.

Существует ряд рекомендаций, позволяющих исключить вероятность расслаивания бетонной смеси (использовать цементы с высокой водопотребностью, снижать значение V/C путем введения добавок-пластификаторов, увеличивать долю песка в бетонной смеси) [2, 3]. Применение нанодобавок, таких как наносилика (продукт, содержащий 99 % SiO_2 с размерами частиц 10–100 нм, рис. 1.) является эффективным способом устране-

свою очередь может привести к расслоению бетонной смеси. Применение наносилики относительно в небольших дозировках позволяет устранить водоотделение и модифицировать структуру цементного камня.

Для оценки водоудерживающей способности цементного теста определяют критическое значение водоцементного отношения ($V/C_{кр}$), при котором еще не наблюдается расслоение цементного теста.

Ориентировочно $V/C_{кр} = 1,65НГ$, где $НГ$ – нормальная плотность цементного теста. Таким образом, при определении состава литой нерасслаиваемой бетонной смеси должно выполняться условие:

ния расслоения бетонных смесей с высокой удельной поверхностью [4–6].

В большинстве случаев при строительстве жилищно-гражданских объектов нет возможности использовать быстротвердеющие цементы или вводить большую долю пластификатора, так как это приводит к удорожанию конструкций или снижению прочностных характеристик.

Поэтому для увеличения подвижности и предотвращения расслаивания бетонной смеси широко используют местные материалы и техно-

генные отходы. Однако эти материалы не отвечают требованиям к сырью для получения бетонов.

Костромская область обладает значительными запасами глин, известняка, доломита, песчано-гравийных смесей. И в большинстве месторождений модуль крупности песка не превышает 2,0–2,2, то есть песок мелкий или средний с водопотребностью ($V_{п}$) 8–12 % в отличие от крупного с $V_{п}$ 6–7,5 %. Щебень, полученный из гравия, также обладает большей водоудерживающей способностью по сравнению с гранитным (5–7 % по сравнению с 1–3 % для гранитного щебня). Не следует также забывать об отсеве дробления гравия, который может быть использован в качестве замены части мелкого песка ($V_{отс} = 12...15$ %).

Цементное вяжущее можно модифицировать путем введения в его состав микронаполнителей и наночастиц на основе высокодисперсных минеральных частиц, которые не только увеличивают водопотребность, но и позволяют модифицировать структуру цементного камня, а также улучшить прочностные и деформативные характеристики бетонов. В качестве микронаполнителей могут выступать отходы промышленности, в том числе и камнеобработки.

В настоящее время хорошо проработана методика применения в бетонах таких побочных продуктов промышленности как микрокремнезем, зола-унос, доменный шлак, однако использование отходов камнеобработки в бетонных смесях и использование местных материалов отражается в научных работах крайне редко.

Поэтому в научной работе было рассмотрено введение известнякового микронаполнителя, полученного при обработке известняка Солигаличского месторождения (Костромская область).

Другим направлением в технологии бетона является введение метакаолина в состав бетонной смеси [7, 8]. Основными целями его введения являются повышение подвижности бетонной смеси и предотвращение ее расслоения, а также улучшением структуры бетона за счет реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образования вторичных CSH. Проведенные исследования показали, что бетонные смеси с метакаолином по своим характеристикам не уступают бетонным смесям с добавкой микрокремнезема [7–9].

Метакаолин получается при обжиге каолиновой глины при температуре 700 °С. Однако могут быть использованы карьерные остатки каолин содержащих пород и остатки после обогащения,

что скажется на количестве введения добавки в цемент в зависимости от доли активного вещества [7].

Рассмотрим перспективы использования смешанного вяжущего на основе портландцемента с комплексной органо-минеральной добавкой из известнякового микронаполнителя, метакаолина, наносилики и суперпластификатора С-3 с получением бетонных смесей марки по осадке конуса П5.

Материалы, использовавшиеся в научной работе для получения многокомпонентного вяжущего и бетона на основе местных строительных материалов:

– **Портландцемент** класса ЦЕМ I 42,5Н. Физико-механические свойства цемента: прочность на сжатие в возрасте 28 суток 51,5 МПа, $\rho_{нас} = 1114$ кг/м³, $\rho_{ист} = 3136$ кг/м³, тонкость помола 428 м²/кг, нормальная густота 25,25 %. Химико-минералогический состав клинкера: $\text{C}_3\text{S} = 63,04\%$, $\text{C}_2\text{S} = 12,59\%$, $\text{C}_3\text{A} = 9,5\%$, $\text{C}_4\text{AF} = 10,75\%$.

– **Известняковый микронаполнитель**. Основные характеристики: $\rho_{нас} = 1000$ кг/м³, $\rho_{ист} = 2675$ кг/м³, удельная поверхность 546 м²/кг, водопотребность $V_{п} = 36$ %

– **Песок**. Основные характеристики: $\rho_{нас} = 1578$ кг/м³, $\rho_{ист} = 2677$ кг/м³, пустотность $\Pi = 41,0$ %, модуль крупности $M_k = 2$, водопотребность $V_{п} = 10,7$ %.

– **Отсев дробления гравия**. Основные характеристики: $\rho_{нас} = 1418$ кг/м³, $\rho_{ист} = 2768$ кг/м³, пустотность $\Pi = 44,6$ %, модуль крупности $M_k = 2,52$, водопотребность $V_{п} = 14,75$ %.

– **Щебень из гравия**. Основные характеристики: $\rho_{нас} = 1509$ кг/м³, $\rho_{ист} = 2768$ кг/м³, пустотность $\Pi = 44,6$ %, водопотребность $V_{п} = 6,3$ %.

– **Метакаолин**. Для получения активной минеральной добавки был произведен обжиг каолина. Основные характеристики метакаолина: $\rho_{нас} = 414$ кг/м³, $\rho_{ист} = 2531$ кг/м³, удельная поверхность 1564 м²/кг, водопотребность $V_{п} = 65,8$ %.

– **Нанодобавка**. Для обеспечения нерасслаиваемости бетонной смеси использовалась добавка наносилики (99% SiO_2 , размер частиц 10–100 нм) производства АКЗО Нобель, в виде 50-% водной суспензии.

– **Суперпластификатор**. Для обеспечения высокой подвижности бетонной смеси в качестве химической добавки был использован суперпластификатор С-3.

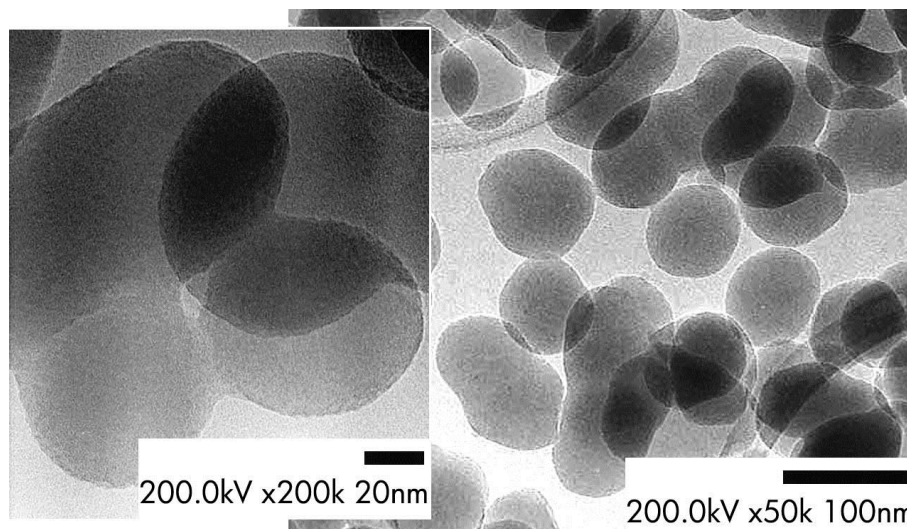


Рис. 1. РЭМ-изображение наночастицSiO₂ (Флорес и др. 2010)

На первом этапе было выполнено исследование влияния отдельных добавок на свойства цементных растворов, в которых часть вяжущего заменялась микронаполнителем, что позволило на линейных моделях определить оптимальные диапазоны введения добавок.

После чего на основании планирования эксперимента были построены математические модели влияния структурных характеристик (концентрация цементного камня, В/Ц истинное) и долей добавок (известняковый микронаполнитель, метакаолин, суперпластификатор С-3) на подвижность мелкозернистых бетонных смесей и прочность бетонов. Анализ полученных математических зависимостей позволил выбрать состав смешанного вяжущего для дальнейшего исследования.

В результате проведенной работы были приняты следующие соотношения компонентов ком-

плексной органо-минеральной добавки: известняковый микронаполнитель, метакаолин и суперпластификатор С-3 в соотношении 1:1,2:0,16. Наносилика использовалась в количестве 0,5 % от массы цемента.

На основе теории упаковок [10] была проведена оптимизация гранулометрического состава заполнителей для увеличения подвижности бетонной смеси и улучшения структуры бетона. В исследовании использованы местные заполнители: щебень из гравия и местные пески с модулем крупности равным 2. Для регулирования зернового состава использовался отсев дробления гравия.

Рассмотрим эффект от использования смешанных вяжущих на контрольных составах (табл. 1).

Таблица 1

Составы бетонных смесей на портландцементе и смешанном вяжущем

Состав	Цемент, кг	Известняковый микронаполнитель, кг	Метакаолин, кг	Суперпластификатор С-3, кг	Наносилика, кг	Песок крупный, кг	Песок мелкий, кг	Отсев дробления гравия, кг	Щебень гранитный, кг	Щебень из гравия, кг	Вода, л
Контрольный	452	–	–	–	–	541	–	–	1124	–	248
Состав 1	382	28,6	34,4	4,6	–	–	593	105	–	964	244
Состав 2	382	28,6	34,4	4,6	3,8	–	589	104	–	955	244

Были произведены испытания бетонных смесей на подвижность, а бетонов на прочность в

возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток (табл. 2).

Таблица 2

Свойства бетонных смесей и бетонов

Состав	В/ВВ	Осадка конуса, см	Распływ конуса, см	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сут				
				1	3	7	14	28
Контрольный	0,55	17	–	10,3	22,7	29,5	34,3	44,3
Состав 1	0,55	>26	62,5	7,9	23,6	30,1	38,5	44,4
Состав 2	0,55	>26	62	9,5	22,9	34,2	40	46,3

Из полученных данных видно, что использование вяжущих с комплексной органоминеральной добавкой позволяет получать бетоны, равнозначные по прочности, но при этом обладающие большей подвижностью. По результатам исследования свойств и составов бетонных смесей установлено, что осадка конуса возрастает на 35 %, а экономия цемента составит 15,5 % при одинаковом водовяжущем отношении. Применение наносилики относительно в небольших дозировках позволяет устранять водоотделение и модифицировать структуру цементного камня. В дополнение к улучшенной удобоукладываемости бетон с добавкой наносилики (состав 2) и разработанной комплексной органоминеральной добавкой имел улучшенные прочностные свойства.

Введение в бетон минерального наполнителя и активной минеральной добавки позволяет получить многокомпонентные вяжущие вещества с использованием отходов промышленности. На примере рационально подобранного состава бетонной смеси на основе многокомпонентного вяжущего и местных заполнителей (табл. 1) можно судить о том, что введение известнякового микронаполнителя совместно с метакаолином позволяет получать самоуплотняющиеся бетоны с более низким расходом цемента, а, следовательно, и стоимостью.

Практика показала, что при возведении многоэтажных зданий рационально применение литой бетонной смеси. При литьевой технологии и безвибрационной укладке трудоемкость подачи и укладки бетонной смеси снижается на 30...35 % вследствие ее высокой удобоукладываемости, а возможность получения более качественных лицевых поверхностей конструкций уменьшает затраты труда на последующих отделочных работах на 15...20 %. Применение литой смеси позволяет экономить суммарные энергозатраты на 15...20 %. По имеющимся данным, сведение к минимуму виброуплотнения смеси позволяет экономить в среднем до 4 кВт/м³ и существенно увеличить срок эксплуатации опалубки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт применения высокопрочных модифицированных бетонов на объектах ЗАО «Моспромстрой» / Р.К. Житкевич, Л.Л. Лазопуло, А.В. Шейнфельд, А.Г.Ферджулян, О.В. Пригоженко // Бетон и железобетон. 2005. №2. С.2–8.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2007. 528 с.
3. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Прогнозирование свойств бетонных смесей и бетонов с техногенными отходами // Известия ВУЗов. Строительство. 1997. №4. С 68–72
4. Фаликман В.Р., Соболев К. «Простор за пределом», или как Нанотехнологии могут изменить мир бетона, Часть 1 // Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал. Изд-во центр инновационных технологий. Наностроительство. 2010. № 6. С. 17–31.
5. Sobolev K., Ferrada-Gutiérrez M. How Nanotechnology Can Change the Concrete World: Part 1. // American Ceramic Society Bulletin. № 10. 2005. pp. 14–17.
6. Performance of Cement Systems with Nano-SiO₂ Particles Produced Using Sol-gel Method / I. Flores, K. Sobolev, L.M. Torres, P.L. Valdez, E. Zarazua, E.L. Cuellar // TRB First International Conference in North America on Nanotechnology in Cement and Concrete. (Irvine May 5–7. 2010), California, USA. 2010.
7. Properties of Blended Cements Based on Thermally Activated Kaolin / M. Arıkan, K. Sobolev, T. Ertün, A. Yeginobali, P. Türker // Construction and Building Materials. Vol. 23. № 1. 2009. pp. 62–70.
8. Jian-Tong Ding, Zongjin Li. Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete // ACI Materials Journal. 2002. №4. P. 393.
9. Rafat Siddique. Waste Materials and By-Products in Concrete // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.
10. Amirjanov A., Sobolev K. Optimization of Computer Simulation Model for Packing of Concrete Aggregates // Particulate Science and Technology. Vol. 26. № 4. 2008. pp. 380–395.