

Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке

П.Н. Курочка, А.В. Гаврилов

Качество бетона в большой степени зависит от используемых материалов, свойства которых должны удовлетворять соответствующим государственным стандартам и техническим условиям, обеспечивать заданный класс прочности, морозостойкости и другие физико-механические характеристики.

В тоже время среди общих геологических запасов песка, применяемого для изготовления бетона, достаточно большое количество месторождений мелких песков.

Использование мелкого песка приводит к уменьшению подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси вследствие большой удельной поверхности мелких зерен. Мелкие пески ухудшают структуру бетона и снижают его долговечность. В связи с этим для получения бетонной смеси заданной подвижности и бетона заданного класса требуется повышенный расход цемента. Степень перерасхода цемента изменяется в достаточно широких пределах и может достигать 30-40%. Увеличение расхода цемента неизбежно приводит к росту цен на бетонные и железобетонные изделия и конструкции.

Для решения этой проблемы наиболее перспективным научным направлением является модификация цементной матрицы путем замены некоторого количества цемента дисперсными минеральными добавками-наполнителями, представляющими собой порошки, получаемые из природного или техногенного сырья – золы, молотых шлаков, микрокремнезема и др.

Ю.М. Баженовым показано, что дальнейшее развитие технологии цементных бетонов будет происходить в направлении применения все более тонких компонентов и перехода к строительным композитам

гидратационного твердения на основе ультрадисперсных порошков. При этом одной из задач строительного материаловедения является разработка научно обоснованных способов получения качественных бетонов на мелких песках путем наполнения или «разбавления» цементного камня.

В работе была поставлена задача изучить прочность и структуру бетонов на комплексном вяжущем (цемент + тонкодисперсная минеральная добавка).

Для исследований в качестве порошковых минеральных добавок приняты: зола; горелая шахтная порода; литьевая керамика; ил шахтных вод; графит; сажа [1]; молотый кварцевый песок; отходы силикатного кирпича.

По классификации Ю.М. Баженова минеральные добавки, имеющие размер частиц меньше частиц цемента, являются уплотнителями цементного камня. По данным [2; 3; 4; 5; 6] механизм действия таких высокодисперсных уплотнителей заключается в образовании дополнительных центров кристаллизации и высокой поверхностной энергии, способствующих ускорению твердения и повышению прочности цементного камня.

Минеральные добавки, близкие по своему гранулометрическому составу к цементу, Ю.М. Баженовым отнесены к добавкам-разбавителям цемента. Количество таких добавок будет определяться их вяжущими свойствами и водопотребностью, т.е. водотвердым и водоцементным отношением.

Минеральные порошки, размер частиц которых находится в пределах между размером частиц цемента и минимальным размером частиц песка, можно отнести к добавкам – наполнителям цемента.

Оптимизация соотношения между цементом и добавками-уплотнителями, разбавителями или наполнителями очевидно должна производиться экспериментальным путем на основании физико-механических показателей модифицированного цементного камня и получаемого бетона. [7; 8; 9; 10].

Принятые для исследований добавки (за исключением сажи) были рассеяны на фракции: <0,05мм (уплотнители); 0,05-0,08мм (разбавители); 0,08-0,14 (наполнители).

На основании добавок и цемента путем перемешивания в пневматическом смесителе было получено комплексное вяжущее. Количество добавок в вяжущем составляло 20%. Исследована прочность бетонов на комплексных вяжущих. Опыты проводились на образцах-кубах 10x10x10 см и балочках размером 4x4x16 см.

Образцы изготавливались по обычной лабораторной технологии и подвергались твердению при нормально-влажных условиях.

Для всех бетонных смесей была принята подвижность П2, т.е. осадка конуса составляла 4-5 см.

Прежде всего был подобран контрольный состав бетонной смеси принятой подвижности для бетона М300 (В22,5). Расход компонентов для этой смеси составил (на 1 м³): цемент – 390 кг; песок ($M_{кр}=1,18$) – 620 кг; щебень (фракция 5-10 мм) – 1180 кг; вода – 194 л (В/Ц=0,495). Вторым контрольным был аналогичный состав с расходом цемента 312 кг (80% от принятого в первом составе).

Для бетонных смесей с тонкодисперсными минеральными добавками был принят такой же расход песка и щебня, а расход вяжущего составлял: цемент – 312 кг (80%); добавка – 78 кг (20%). Водовяжущее отношение определялось исходя из условия равноподвижности смесей.

Результаты исследований показали следующее.

При снижении расхода цемента на 20% прочность контрольного бетона при сжатии уменьшается на 20% (с 32,7 МПа до 26,1 МПа), а при изгибе на 32% (с 7,43 МПа до 5,12 МПа) (табл.1). Недостаток цемента в бетонах на мелком песке приводит к появлению контактов между частицами наполнителя и зернами заполнителя без цементной прослойки. Коэффициент трещиностойкости бетона при этом уменьшается на 14%.

При замещении в первом контрольном составе 20% цемента тонкомолотыми минеральными добавками происходит следующее (см. таблица №1).

Таблица № 1

Прочность и трещиностойкость бетонов на комплексном вяжущем из цемента и минеральных тонкодисперсных добавок

№ состава	Наименование добавки	Вид добавки	Прочность, МПа		Коэффициент трещиностойкости $K_{тр} = R_{изг} / R_{сж}$
			сжатие	изгиб	
1	2	3	4	5	6
1	Цемент без добавок, расход 390 кг/м ³ (100%)	-	32,70	7,43	0,227
2	Цемент без добавок, расход 312 кг/м ³ (80%)	-	26,15	5,12	0,196
3	Кварцевый песок	Уплотнитель	38,63	9,10	0,236
4		Разбавитель	36,29	7,76	0,214
5		Наполнитель	33,42	6,88	0,206
6	Отходы силикатного кирпича	Уплотнитель	34,31	8,02	0,234
7		Разбавитель	32,22	7,02	0,218
8		Наполнитель	31,69	6,46	0,204
9	Литьевая керамика	Уплотнитель	28,96	6,67	0,230
10		Разбавитель	28,02	6,55	0,234
11		Наполнитель	26,84	6,49	0,242

Продолжение таблицы № 1

1	2	3	4	5	6
12	Горелая шахтная порода	Уплотнитель	27,89	5,21	0,187
13		Разбавитель	25,87	4,94	0,191
14		Наполнитель	22,19	4,39	0,198
15	Зола	Уплотнитель	33,64	7,63	0,227
16		Разбавитель	31,82	6,58	0,207
17		Наполнитель	31,12	6,56	0,211
18	Ил шахтных вод	Уплотнитель	24,73	4,70	0,190
19		Разбавитель	24,18	4,25	0,176
20		Наполнитель	22,78	4,12	0,181
21	Графит	Уплотнитель	30,18	5,40	0,179
22		Разбавитель	29,43	5,18	0,176
23		Наполнитель	29,11	4,69	0,161
24	Сажа	Уплотнитель	34,96	7,65	0,219
25	Песок(40%) +сажа(60%)	Уплотнитель	37,84	8,85	0,234

Добавка-уплотнитель из кварцевого песка не только обеспечивает прочность бетона со 100%-ным расходом цемента, но и повышает ее на 18%. При этом необходимо отметить, что прочность цементного камня с этой добавкой возрастает на 30%.

Добавка-наполнитель из кварцевого песка увеличивает прочность бетона при сжатии на 10%. Практически на такую же величину с этой добавкой возрастает и прочность цементного камня (13%).

Добавка-разбавитель из кварцевого песка обеспечивает прочность бетона практически такую же, как и при 100% расходе цемента. Однако при этом необходимо учесть, что добавка-уплотнитель кварцевого песка не снижает, а даже несколько повышает коэффициент трещиностойкости бетона. В то же время добавка-наполнитель и добавка-разбавитель снижают коэффициент трещиностойкости с 0,227 до 0,214 и 0,206 соответственно.

Для определения возможной причины снижения эффективности добавки-уплотнителя в цементном камне по сравнению с бетоном были определены фактические объемы наполненного цемента. Полученные результаты (таблица № 2) сравнивались между собой и объемом цемента массой, равной массе цемента с тонкодисперсной минеральной добавкой.

Объемы вяжущего из цемента и тонкодисперсного кварцевого песка

Масса цемента, г	Объем цемента $V_{ц}$, $см^3$	Вид добавки из кварцевого песка	Масса добавки, г	Объем добавки $V_{д}$, $см^3$	Суммарный $V_{ц+д}$, $см^3$	Полученный объем вяжущего $V_{ц+д}$	$\frac{V_{ц+д}}{V_{ц} + V_{д}}$	$\frac{V_{ц+д}}{V_{ц}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	62,0	Уплотнитель	20	12,7	74,7	67,2	0,89	0,97
		Разбавитель		13,6	75,6	76,8	1,01	0,99
		Наполнитель		14,2	76,2	78,4	1,03	1,01

$V_{ц}^*$ - объем 100 г цемента, равный 77,4 $см^3$

Объем цемента массой 100 г составил 77,4 $см^3$. Наполненное вяжущее приготавливалось путем пневматического смешивания 80 г цемента и 20 г добавки уплотнителя, разбавителя или наполнителя из кварцевого песка. Перед смешиванием определялся объем добавки в насыпном состоянии.

При сравнении полученных результатов установлено, что объем вяжущего, полученного из цемента и добавки-уплотнителя составляет 0,87 от объема цемента с такой же массой. Следовательно, такого количества вяжущего недостаточно для получения оптимально плотной структуры. Поэтому получаемая прочность бетона ниже, чем ожидаемая исходя из прочности цементного камня с добавкой-уплотнителем из кварцевого песка (прирост прочности цементного камня составил 20 МПа).

Объемы вяжущего, полученного из цемента и добавок наполнителя и разбавителя практически равны объему цемента соответствующей массы.

Добавка-уплотнитель из тонкодисперсного силикатного кирпича увеличивает прочность бетона на 5% (цементный камень имеет прирост прочности 10,5%), т.е. меньше чем у цементного камня. Это можно объяснить не только недостаточным количеством вяжущего (по аналогии с кварцевым песком), но и более высокой водопотребностью бетонной смеси. Одновременно с этим, как и для кварцевого песка, коэффициент

трещиностойкости бетона остается высоким, что является следствием меньших усадочных деформаций в твердеющем цементном камне.

Добавки разбавитель и наполнитель из тонкодисперсного силикатного кирпича обеспечивают заданную прочность бетона и достаточно высокий коэффициент его трещиностойкости.

Тонкомолотая минеральная добавка из литевой керамики с дисперсностью уплотнителя и разбавителя повышает прочность бетона по сравнению с его прочностью при 80% расходе цемента. Однако заданную прочность (при 100% расходе цемента) она не обеспечивает. Добавка-наполнитель из литевой керамики практически не влияет на прочность бетона. В то же время тонкомолотая литевая керамика обеспечивает достаточно высокий коэффициент трещиностойкости бетона, т.е. увеличивает его прочность при изгибе.

При введении в вяжущее добавки-уплотнителя из горелой шахтной породы прочность бетона остается практически такой же как и на чистом цементе, при расходе 312 кг/м^3 (80%). Добавка-наполнитель и добавка-разбавитель из горелой шахтной породы снижают прочность бетона.

Степень воздействия золы на прочность бетона практически не зависит от дисперсности добавки. Все добавки (уплотнитель, разбавитель, наполнитель) обеспечивают такую же прочность, как и при 100% расходе цемента. У бетона с этими добавками высокий коэффициент трещиностойкости.

Добавки ила шахтных вод всех гранулометрических фракций снижают прочность бетона как при сжатии, так и при изгибе.

Прочность бетона с добавками графита превышает прочность бетона с 80% расходом цемента, но не достигает прочности бетона со 100% расходом цемента. Кроме того, добавки графита снижают коэффициент трещиностойкости (прочность при изгибе снижается).

Добавка сажи увеличивает прочность бетона практически на столько, на сколько возрастает прочность цементного камня.

Было изучено влияние на прочность бетона комплексной добавки-уплотнителя фулеренного действия состоящей из кварцевого песка (40%) и сажи (60%). Общее количество добавки составило 20% от массы вяжущего. Полученные результаты показали (табл.1), что по сравнению с сажой, обеспечивающей прочность бетона при сжатии 34,96 МПа, комплексная добавка повышает прочность бетона до 37,84 МПа с высоким коэффициентом трещиностойкости (0,234).

Анализируя полученные результаты, все изученные добавки можно разбить на три группы (рис. 1).

- упрочняющие добавки, которые могут заменить 20% цемента при обеспечении заданной прочности бетона.
- стабилизирующие добавки, которые могут быть добавлены в количестве 20% к нормативному расходу цемента для гарантийного обеспечения требуемой прочности бетона.
- тонкомолотые минеральные добавки, снижающие прочность бетона и не рекомендуемые к практическому применению.

Добавки, снижающие прочность бетона, были исключены из дальнейших исследований.

Изучена структура, водонепроницаемость и морозостойкость бетонов, изготовленных на комплексном вяжущем, содержащем цемент и тонкодисперсные минеральные добавки. Результаты исследований показали следующее.

Упрочняющие добавки, заменяя 20% расхода цемента, способствуют формированию мелкопористой структуры бетона. При этом его водонепроницаемость возрастает до значений В8-В10, а морозостойкость в два и более раз (табл.3).

Добавление к нормативному расходу цемента 20% стабилизирующих добавок обеспечивает 100%-ую вероятность получения бетона заданной прочности (табл.4).

Рсж, МПа

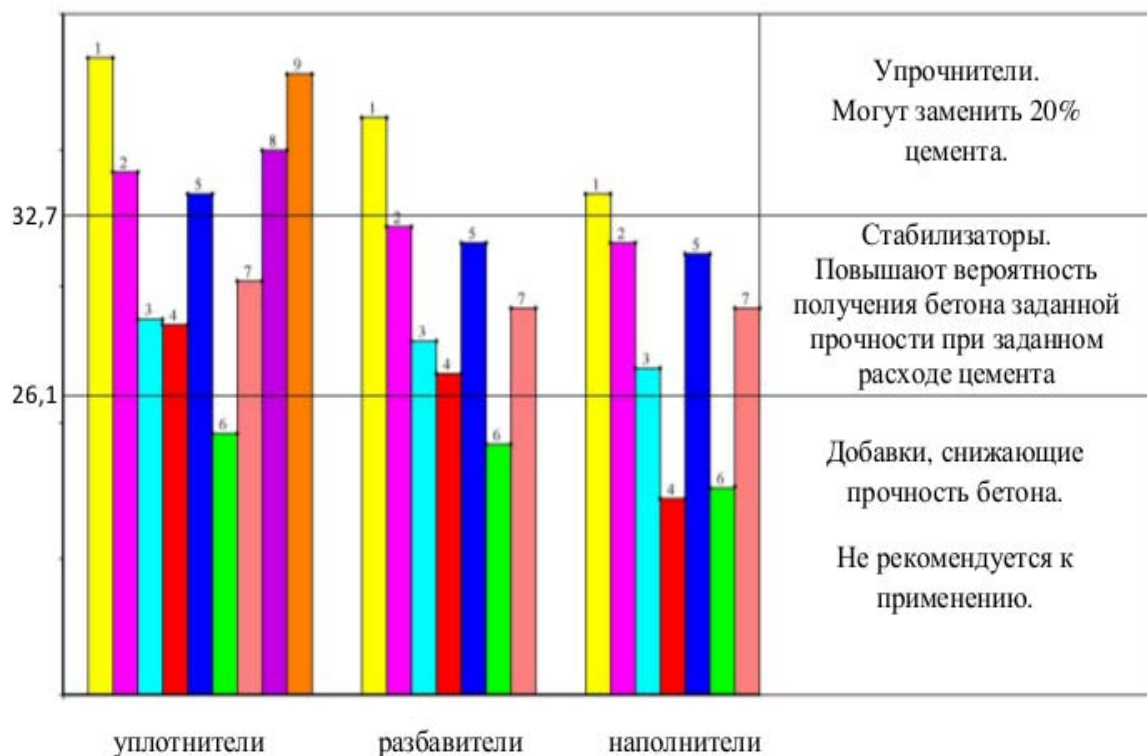


Рис. 1 – Влияние вяжущего из цемента и тонкодисперсной минеральной добавки (20% от массы вяжущего) на прочность при сжатии бетонных образцов

- 1 – кварцевый песок;
- 2 – силикатный кирпич;
- 3 – литевая керамика;
- 4 – горелая шахтная порода;
- 5 – зола;
- 6 – ил шахтных вод;
- 7 – графит;
- 8 – сажа;
- 9 – кварцевый песок (40%) + сажа (60%).

Таблица № 3

Физико-механические свойства бетонов на основе вяжущего из цемента и тонкодисперсной минеральной добавки, увеличивающей прочность бетона
(добавки-упрочнители)

№ состава по табл. 1	Прочность в возрасте 28 сут, МПа		Параметры поровой структуры		Водопоглощение, %	Водонепроницаемость	Морозостойкость, цикл
	сжатие	изгиб	ψ	α			
1	2	3	4	5	6	7	8
Цемент без добавки. Расход 390 кг на 1 м ³ (100%)	32,70	7,43	1,22	0,52	6,59	B4	F75
Цемент без добавки. Расход 312 кг на 1 м ³ (80%)	26,15	5,12	1,95	0,51	7,87	B2	F50
1	38,63	9,10	0,85	0,47	4,98	B10	F200
2	36,29	7,76	1,09	0,52	5,71	B8	F150
3	33,42	6,88	1,21	0,49	6,02	B6	F150
4	34,31	8,02	0,93	0,45	5,26	B8	F150
13	33,64	7,63	1,04	0,56	6,43	B6	F150
22	34,96	7,65	0,76	0,64	4,82	B8	F150
-	37,84	8,85	0,71	0,69	4,16	B10	F200

Примечание: В составах бетонных смесей принят следующий расход компонентов: на 1 м³: вяжущее – 390 кг (цемент – 312 кг, тонкомолотая минеральная добавка – 78 кг); песок ($M_{кр}=1,18$) – 620 кг; щебень (фракция 5-10 мм) – 1180 кг.

Таблица № 4

Физико-механические свойства бетонов на основе вяжущего из цемента и тонкодисперсной минеральной добавки, стабилизирующей прочность бетона (добавки-стабилизаторы)

№ состава по табл. 5.1	Наименование добавки	Вид добавки	В/Ц	В/В	Прочность в возрасте 28 сут, МПа		Параметры поровой структуры		Водопоглощение по массе, %
					При сжатии	При изгибе	ψ	α	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	-	-	0,506	0,506	26,15	5,12	1,95	0,51	7,87
7	Силикатный кирпич	Разбавитель	0,650	0,520	32,22	7,02	1,41	0,58	7,72
8	Силикатный кирпич	Наполнитель	0,646	0,517	31,69	6,46	1,27	0,52	7,69
9	Литьевая керамика	Уплотнитель	0,612	0,490	28,96	6,67	1,04	0,56	5,99
10	Литьевая керамика	Разбавитель	0,615	0,492	28,02	6,55	1,21	0,56	6,35
11	Литьевая керамика	наполнитель	0,615	0,492	26,84	6,49	1,26	0,52	6,91
12	Горелая порода	уплотнитель	0,640	0,512	27,89	5,21	2,06	0,49	8,76
16	Зола	разбавитель	0,612	0,490	31,82	6,58	1,81	0,59	7,98
17	Зола	Наполнитель	0,612	0,490	31,12	6,56	2,12	0,64	8,08
21	Графит	Уплотнитель	0,637	0,510	30,18	5,40	1,09	0,60	6,68
22	Графит	Разбавитель	0,631	0,505	29,43	5,18	1,07	0,66	7,12
23	Графит	наполнитель	0,632	0,506	29,11	4,69	1,19	0,64	7,701

Выводы.

При использовании в бетонных смесях мелкого песка заданная прочность бетона без увеличения расхода цемента может быть обеспечена комплексным вяжущим, состоящим из нормативного количества цемента и тонкодисперсных минеральных добавок. В качестве добавок рекомендуются тонкомолотый кварцевый песок, тонкодисперсный порошок из силикатного кирпича, зола, сажа, а также смесь сажи с кварцевым песком.

Стабильность получения бетона заданного класса при определенном расходе цемента может быть обеспечена путем добавления к цементу минеральных добавок, указанных на рис. 1 и в табл. 4.

Литература:

1. Несветаев Г.В., Та Ван Фан. Влияние белой сажи и метаксаолина на прочность и деформационные свойства цементного камня [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (часть 1). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1110> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Красный, И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителя [Текст] // Бетон и железобетон. 1987. №5. С. 10-11.
3. Pistill, M.F. Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian Source and Influence on the Properties of Portland Cement // Cem. Concr. and Aggr. – 1984. – V.6: - №1. – P. 33-37.
4. Setter, N., Roy, D.M. Mechanical Flatures of Chemical Shrinkage of Cement Paste. // Cem. and Concr. Res. – 1978. – V.8. - №5. – P. 623-634.
5. Vivian, H.E. Effect of Particle Size on the Properties of Cement Paste. // Symp. Structure of Portland Cement. – 1966. – P. 18-25.
6. Плешко, М.С., Крошнеv, Д.В. Влияние свойств твердеющего бетона на взаимодействие системы «крепь – массив» в призабойной зоне ствола [Текст] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №9. – С. 320-325.

7. Строкова, В.В. Кристаллохимический подход к проблеме выбора сырья [Текст]. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород. 2003. №5. С. 376-378.
8. Хамидулина, Д.Д., Гаркави, М.С. Применение дробленых песков для производства мелкозернистых бетонов [Текст]. Сб. докладов «Проблемы и достижения строительного материаловедения». Белгород. 2005. С. 238-240.
9. Форопонов К.С., Ткаченко Г.А. Структурообразование и свойства модифицированных жесткопрессованных цементно-меловых композиций [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/230> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
10. Баженов, Ю.М., Алимов, Л.А., Воронин, В.В. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами [Текст] // Изв. вузов. Строительство. – 1996. - №4 – С.55-58