

УДК 691.32

О. В. Тараканов^а, Т. К. Акчурин^б, Е. А. Белякова^а

^а Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

^б Волгоградский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Показана востребованность и экономическая целесообразность применения высокопрочных бетонов в строительстве. Проанализированы основные аспекты получения высокопрочных бетонов нового поколения на основе суперпластификаторов и тонкомолотых плотных и прочных горных пород и возможные процессы гидратации пластифицированных цементных систем. Изучены значения водопоглощения и усадки порошково-активированных, песчаных и щебеночных бетонов нового поколения. Проанализированы возможные механизмы влияния гидратных фаз цементного камня на показатели усадки бетона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бетоны нового поколения, высокопрочные бетоны, специальные сооружения, высотные дома, экономическая целесообразность, полифункциональность бетонов, суперпластификаторы, каменная мука, молотый песок, водопонижение, реакционно-порошковый бетон, песчаный бетон, процессы гидратации, механизм действия добавок, заряд поверхности частиц, микроструктура, водопоглощение, усадка.

Высокопрочные и многофункциональные бетоны нового поколения (БНП) в настоящее время широко внедряются в строительное производство. Создание высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов нового поколения началось за рубежом в восьмидесятых годах прошлого столетия. Это было связано с необходимостью строительства специальных сооружений (небоскребов, морских платформ и т. д.) из материалов, обладающих высокой прочностью и эксплуатационными свойствами.

Металлические конструкции, особенно работающие в агрессивных средах, не могут быть альтернативой высокопрочным бетонам (ВПБ). ВПБ нового поколения, обладающие полифункциональными свойствами, в этих случаях универсальны и, возможно, безальтернативны. Преимуществом технологии ВПБ является возможность получения сверхтекучих бетонных смесей на основе экологически чистых гиперпластификаторов на поликарбоксилатной полиакрилатной основе и тонкомолотых реологически и гидратационно активных минеральных добавок, позволяющих получать эффективные бетоны прочностью 150...200 МПа.

Опыт строительства за рубежом свидетельствует о том, что высокопрочные бетоны марок М1000 более востребованы при возведении специальных сооружений, таких как морские газонефтяные платформы, большепролетные мосты и путепроводы, башни, резервуары, работающие под давлением, высотные дома и небоскребы. В России переход к бетонам нового поколения начался на рубеже 80—90-х гг. прошлого столетия. Однако массового внедрения в строительстве технологии бетонов нового поколения до сих пор не получили. Вместе с тем экономическая эффективность бетонов нового поколения очевидна. В конструкциях из высокопрочных бетонов удорожание компонентов ориентировочно составляет 1,5 раза. Однако снижение расходов

всех компонентов бетона и арматуры (за счет перехода на более высокие марки) вследствие возможности уменьшения сечения конструкций составляет до 2—3 раз. Это, в свою очередь, приводит к снижению массы зданий, уменьшению сечений конструкций, параметров оснований и фундаментов, уменьшению транспортных расходов и т. д.

Современные высококачественные БНП можно отнести к полифункциональным, сочетающим в себе широкий спектр бетонов различного назначения и свойств [1—4]. Этот факт объясняется достаточно просто: высокопрочные бетоны имеют высокую плотность, что обеспечивает значительное повышение таких показателей, как водо- и газонепроницаемость, морозо- и солестойкость, деформативность, повышенная трещиностойкость и др. Особый интерес представляют дисперсно-армированные бетоны, которые могут использоваться в сочетании с обычной и предварительно напряженной арматурой, а также для производства тонкостенных конструкций, архитектурных элементов и деталей. В практике строительства за рубежом интенсивно развивается направление применения для армирования текстильно-волоконными объемными каркасами из высокопрочных полимерных и щелочестойких нитей. Применение высокотехнологичных и высокопрочных бетонов связано с использованием современных эффективных супер- и гиперпластификаторов и тонкомолотых минеральных добавок, полученных дроблением и помолом твердых и прочных горных пород. Механизм действия большинства СП и ГП достаточно изучен и связан с адсорбцией молекул пластификаторов на поверхности цементных и минеральных частиц, с изменением ионно-электростатического заряда, электрического потенциала и со стерическим эффектом.

Начальным актом механизма диспергирования и разжижения цементных и минеральных паст является адсорбция молекул СП на цементных и минеральных частицах с дефектной поверхностью. Дефекты, возникающие в процессе помола и появляющиеся за счет разрыва ковалентных или ионных связей, усиливают адсорбцию и хемосорбцию. Вода и водяной пар из воздуха гидроксилируют поверхность минеральных частиц и активируют процесс гидратации (хемосорбцию) цементных частиц. Цементные частицы связывают большие количества воды уже с первых секунд после водозатворения, в то время как частицы минерального наполнителя лишь гидроксилируются, что и позволяет повышать эффективность СП и ГП в цементно-минеральных системах.

В работах В. И. Калашникова [5—7] показано, что современные СП и ГП в большей степени разжижают минеральные порошки, чем чисто цементные системы. Этот факт и является ключом к раскрытию механизма получения наполненных бетонов нового поколения. Цементные системы, для которых и разрабатывались СП и ГП, в меньшей степени разжижаются в их присутствии. Таким образом, в бетонах с низким расходом цемента СП и ГП не приводят к значительному водопонижению в отличие от бетонов с высоким содержанием цемента. Высокие водоредуцирующие эффекты могут быть достигнуты в бетонах с СП и ГП за счет создания (увеличения) реологически активной жидкотекучей матрицы, состоящей из смеси цемента и близкого к нему по значению удельной поверхности тонкодисперсного минерального порошка (каменной муки). Попытки заменить часть цемента (до 50 %) механически активированными минеральными порошками не могли привести к высоким водоредуцирующим эффектам [8—10].

Создание БНП связано с появлением не только эффективных СП и ГП, но и активных пуццолановых добавок — микрокремнеземов (МК), дегидратированных метакаолинов и реакционно-активных зол ТЭЦ. Количество компонентов в бетоне увеличилось, а водоцементное отношение снизилось до 0,22...0,28. Высокая прочность бетона обеспечивается использованием тонкодисперсного микрокремнезема, а также за счет применения реакционно-активной каменной муки, получаемой помолом плотных и прочных горных пород. Другим важным аспектом технологии БНП является то, что переход от высокопрочных бетонов к бетонам с более низкой прочностью возможен в случае трансформации реологических матриц, обеспечивающих высокую эффективность СП и ГП. В этом случае тонкодисперсная матрица должна состоять из цемента, каменной муки и тонкопомолотого песка. Количество последних может достигать 100 % и более, в зависимости от расхода цемента. Например, при расходе цемента 200 кг/м³ количество каменной муки и тонкопомолотого песка может составлять 100...120 % от массы цемента. С увеличением расхода цемента, например до 500...600 кг/м³, количество минеральных компонентов может быть снижено и составлять 50...60 % от массы цемента.

Цемент является нестабильной гидратирующейся системой, и на поверхности цементных частиц при контакте с водой образуются кристаллические алюминатные гидраты и желеобразные гидросиликаты кальция. Если же процесс гидратации осложняется присутствием комплексных добавок, например ускоряюще-пластифицирующих, процесс еще больше осложняется, поскольку поверхность как цементных частиц, так и минеральных микронаполнителей имеет, как правило, мозаичный заряд. Этот фактор практически не учитывается при анализе механизмов действия добавок. Вероятнее всего, мы имеем дело с результирующим фактором. Однако в работах В. И. Калашникова [5—7, 11] доказаны высокие водоредуцирующие эффекты при использовании СП и ГП в суспензиях многих чистых минералах и оксидах, имеющих известный заряд поверхности.

При исследовании каменной муки, полученной помолом горных пород, кроме проблемы их водопоглощения, более сложной задачей является анализ зарядового состояния полиминеральных частиц и оценки его влияния на характер действия СП и ГП, как в чисто минеральных системах, так и в цементно-минеральных. Оценить зарядовое состояние частиц каменной муки в условиях лабораторий заводов ЖБИ достаточно сложно, поэтому решением вопроса становится реологическое тестирование минеральных порошков перед использованием в бетонных смесях.

Большое внимание в теории и практике бетоноведения в последнее время уделяется вопросам использования тонкомолотого кварцевого песка. Вполне понятно, что тонкомолотый песок является менее гидратационно активным, чем микрокремнезем и, кроме того, поверхность песка в естественных условиях всегда гидроксильирована и силоксановые группы на поверхности частиц создают отрицательный заряд, способствующий снижению эффективности действия СП и ГП. Однако в присутствии ионного раствора жидкой фазы цементных систем и их адсорбции на поверхности частиц песка (особенно в присутствии комплексных добавок, содержащих неорганические соли), очевидно, возможно изменение зарядового состояния частиц

песка [11]. Эти вопросы во многом остаются малоизученными. Достаточно сложно однозначно описать процесс гидратации многокомпонентных цементно-минеральных систем, особенно в присутствии сложных по кристаллохимическому строению и зарядовому состоянию поверхности частиц минеральных порошков (гранит, диабаз, базальт, вулканические стекла и т. д.). Тем не менее повышенная эффективность СП и ГП в минеральных и цементно-минеральных системах экспериментально доказана и требует дальнейшего анализа.

Важным вопросом в технологии БНП является повышение плотности упаковки структуры. Это может быть достигнуто применением фракционированных песков в сочетании с тонкодисперсными микронаполнителями. Необходимо создать такие «стесненные» условия в структуре бетона, когда более мелкие фракции заполняют пустоты между более крупными частицами. Это становится необходимым условием не только для повышения плотности структуры, но и для возможности максимального сближения частиц цемента, микронаполнителя и песка до кратчайших расстояний, когда при условии образования в жидкой фазе бетона пересыщенных растворов возможно образование гидратных фаз в межчастичном пространстве, связывающих частицы между собой посредством кристаллизационных мостов, формирующихся в диффузионном потоке.

Не менее важным вопросом строительного материаловедения является изучение микроструктуры цементных и цементно-минеральных систем. Продукты гидратации являются результирующим откликом реакции цементных композиций на химическую модификацию гидратационных процессов. Известно, например, что все пластифицирующие добавки угнетают гидратацию, особенно на ранних стадиях [12, 13]. Важным направлением исследований в теории и практике строительного материаловедения является исследование микроструктуры цементного камня и бетона.

Суть разработки порошково-активированных БНП заключается в создании в бетонной смеси значительного объема высококонцентрированной, тонкодисперсной, агрегативно устойчивой суспензии (матрицы), которая не препятствует перемещению более крупных частиц — тонкого и грубого песка и щебня, создавая критерии избытка [14]. При этом следует иметь в виду, что эта суспензия должна состоять из смеси порошков цемента и тонкодисперсной каменной муки, полученной на основе прочных и плотных горных пород. Подобная суспензия позволяет значительно повысить эффективность СП и ГП и получать высокоподвижные (в том числе и самоуплотняющиеся) бетонные смеси при пониженных значениях водотвердого отношения.

Высокопрочные реакционно-порошковые и песчаные бетоны состоят из повышенного расхода портландцемента, молотой прочной и плотной горной породы (каменной муки), мелкого кварцевого песка и песка-заполнителя. Анализируя возможный характер развития усадочных деформаций с позиций влажностной усадки, необходимо отметить, что цементные системы с высоким содержанием цемента ($600 \dots 800 \text{ кг/м}^3$) должны проявлять большие усадочные деформации. Однако следует учитывать тот факт, что в реакционно-порошковых и порошково-активированных песчаных бетонах при низком водосодержании объем капиллярных пор будет небольшим и, следовательно, усадочные деформации также будут незначительными. Необходимо

выяснить, будет ли фактор низкого водосодержания в пластифицированных бетонных смесях определяющим по сравнению с фактором микродисперсности бетона в отношении снижения значений усадочных деформаций. Задачей исследования являлось изучение характера влияния различных микронаполнителей БНП на показатели водопоглощения и усадки бетона.

С целью определения влияния природы минеральных микронаполнителей на гигрометрические свойства бетонных смесей нового поколения были исследованы составы реакционно-порошковых (РПБ) и порошково-активированных песчаных (ПАПБ) и щебеночных бетонов (ПАЩБ) (табл.). В качестве каменной муки были использованы высокопрочные тонкодисперсные горные породы (гранит, доломит, высококальциевый известняк, базальт, диабаз, кварц) и осадочные породы месторождений Пензенской области (песчаник и доломитизированный известняк). Удельная поверхность всех тонкомолотых минеральных наполнителей составляла $S_{уд} = 2,8...5,0$ тыс. $см^2/г$. В качестве пуццоланической добавки был использован порошкообразный микрокремнезем Челябинского электрометаллургического комбината с содержанием аморфного SiO_2 81...83 %. В качестве гиперпластифицирующей добавки использовался Melflux 5581F в количестве 0,8 % от массы цемента.

Соотношение компонентов в реакционно-порошковых (суспензионных) бетонах (составы № 1—16) Ц : КМ : П_т : ПД (где Ц — цемент, КМ — каменная мука, П_т — песок тонкий фр. 0,14...0,63 мм, ПД — пуццоланическая добавка) соответствовало оптимальному соотношению: 1 : 0,5 : 1,5 : 0,1. Количество воды подбиралось таким образом, чтобы обеспечить расплыв бетонной смеси из конуса Хегерманна равным 30...34 см.

Рецептура порошково-активированных песчаных бетонов на молотом граните и мраморе (каменная мука, КМ), гранитном наполнителе (П_т) и гранитном заполнителе (П_з, фр. 0,63...2,50 мм) (составы № 17, 18) подбирались таким образом, чтобы соотношения основных компонентов были равны Ц : КМ : П_т : П_з = 1 : 0,5 : 1,05 : 0,7. Расплыв ПАПБ из конуса Хегерманна составил 34...36 см.

Для сравнения были представлены составы порошково-активированных щебеночных бетонов (составы № 19—25) с низким содержанием цемента (247...310 $кг/м^3$). Бетонные смеси отличались низкой подвижностью с осадкой конуса 4...8 см.

Коэффициенты объемной концентрации во всех составах находились в заданных оптимальных пределах $C_{вд}^V = 0,31...0,4$; $C_{вдг}^V = 0,45...0,51$ и $C_p^V = 0,63...0,68$.

Низкое водоцементное отношение, уменьшение содержания капиллярных пор в бетоне определяют водопоглощение материала. Водопоглощение обычного бетона марок М300—М400 не бывает меньше 3 % по массе. Объемное водопоглощение, характеризующее насыщение объема бетона водой, при этом составляет не менее 70 л воды в 1 $м^3$ бетона при эксперименте в течение трех суток. Водопоглощение цементных бетонов косвенно свидетельствует о показателях морозостойкости [15, 16]. Морозостойкость разработанных РПБ не изучалась, так как по проведенным ранее исследованиям [17—19] БНП показывали более 500, а некоторые высокоплотные — более 900 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

*Гигрометрические и прочностные показатели образцов реакционно-порошкового
и порошково-активированного песчаного и щебеночного бетонов*

№ состава	Вид цемента, расход на 1 м ³ , кг	Вид каменной муки, удельная поверхность	Водо-твердое отношение В/Т	Водо- цементное отношение В/Ц	Плотность бетона $\rho_{вл}$, кг/м ³	Объемная концентрация водно- дисперсной фазы $C_{вд}^V$, %	Прочность при сжатии $R_{сж}^{28}$, МПа, через 28 сут	Водопоглощение W_m^3 , %, через 28 сут	Усадка в естественно- воздушных условиях $\epsilon_{ус}$, мм/м, через 180 сут
<i>Реакционно-порошковые бетоны</i>									
1	Цемент датский, 655	Известняк (п. Исса) $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,116	0,361	2302	61,7	110,5	2,11	0,34
2	Цемент датский, 670	Доломит (г. Воронеж) $S_{уд} = 445 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,117	0,363	2335	61,8	105,4	2,11	0,36
3	Цемент датский, 680	Доломит (г. Воронеж) $S_{уд} = 445 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,106	0,328	2324	60,1	110,5	2,92	0,31
4	Цемент датский, 683	Доломит (г. Воронеж) $S_{уд} = 445 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,099	0,308	2328	60,3	113,1	2,19	0,27
5	Цемент красноярский, 670	Доломит (г. Воронеж) $S_{уд} = 445 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,106	0,328	2304	60,9	102,9	2,38	0,31
6	Цемент красноярский, 678	Доломит (г. Воронеж) $S_{уд} = 445 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,106	0,328	2307	60,9	109,7	2,32	0,28
7	Цемент датский, 681	Пылевидный кварц $450 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,124	0,386	2333	62,4	103,7	2,94	0,39
8	Цемент датский, 681	Пылевидный кварц $450 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,124	0,386	2289	62,1	113,9	2,84	0,37

9	Цемент датский, 677	Песчаник (г. Никольск) $S_{уд} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,154	0,479	2095	64,3	85,0	5,89	0,80
10	Цемент датский, 664	Пылевидный кварц $450 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,123	0,383	2296	62,3	113,9	2,34	0,38
11	Цемент датский, 669	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,123	0,383	2318	62,1	113,9	2,97	0,35
12	Цемент датский, 657	Песчаник (д. Саловка) $S_{уд} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,123	0,383	2234	62,0	103,7	2,69	0,42
13	Цемент датский, 660	Диабаз $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,123	0,383	2305	61,6	107,1	2,81	0,32
14	Цемент шуровский, 664	Пылевидный кварц $450 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,128	0,397	2253	62,7	105,4	2,70	0,35
15	Цемент шуровский, 690	Гранит $S_{уд} = 420 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,115	0,347	2302	61,4	108,8	2,17	0,32
16	Цемент шуровский, 697	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,115	0,347	2331	60,2	112,2	2,22	0,49
<i>Песчаные бетоны без микрокремнезема</i>									
17	Цемент шуровский, 623	Гранит $S_{уд} = 420 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,128	0,379	2296	57,5	107,2	1,69	0,36
18	Цемент шуровский, 643	Мрамор $S_{уд} = 440 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,096	0,314	2303	55,8	105,4	1,76	0,42

№ состава	Вид цемента, расход на 1 м ³ , кг	Вид каменной муки, удельная поверхность	Водо-твердое отношение В/Т	Водо-цементное отношение В/Ц	Плотность бетона $\rho_{вл}$, кг/м ³	Объемная концентрация водно-дисперсной фазы $C'_{вд}$, %	Прочность при сжатии $R^{28}_{сж}$, МПа, через 28 сут	Водопоглощение W^3_m , %, через 28 сут	Усадка в естественно-воздушных условиях $\epsilon_{ус}$, мм/м, через 180 сут
<i>Щебеночные бетоны</i>									
19	Цемент ново-троицкий, 310	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,064	0,496	2538	34,0	78,2	2,09	0,31
20	Цемент ново-троицкий, 295	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,093	0,722	2464	38,1	40,8	3,36	0,35
21	Цемент ново-троицкий, 300	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,074	0,57	2445	34,3	68,0	2,47	0,28
22	Цемент ново-троицкий, 247	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,069	0,65	2404	31,4	52,7	2,61	0,35
23	Цемент ново-троицкий, 300	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,068	0,515	2451	31,1	90,1	2,37	0,24
24	Цемент челябинский, 294	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,055	0,427	2369	31,2	54,4	2,41	0,28
25	Цемент челябинский, 450	Известняк (г. Тольятти) $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$	0,066	0,326	2370	39,7	97,8	2,89	0,24

У всех представленных в табл. составов определялись усадка в естественно-воздушных условиях при относительной влажности воздуха (65 ± 5) % (по ГОСТ 24544-2020 «Методы определения деформаций усадки и ползучести»), водопоглощение (по ГОСТ 12730.3-2020 «Метод определения водопоглощения»), а также набухание в воде после усадки.

Водопоглощение реакционно-порошковых бетонов через трое суток насыщения в основном находится в пределах 2...3 % и не превышает значений водопоглощения традиционных тяжелых щебеночных бетонов старого поколения с расходом цемента 300...400 кг/м³. Усадочные деформации находятся в диапазоне 0,3...0,4 мм/м, т. е. также не превышают допустимых значений для тяжелого бетона. Необходимо при этом учесть, что, в отличие от бетонов со щебнем и песком, реакционно-порошковые бетоны более чем на половину состоят из тонкомолотых компонентов, а тонкозернистый песок расположен дискретно. В связи с этим утверждение о существенном возрастании усадки с увеличением расхода цемента (600...700 кг/м³) и тонкомолотых добавок, справедливое для бетонов старого поколения, не правомерно для бетонов нового поколения.

Из анализа результатов табл. следует, что все виды наполнителей из горных пород за отдельным исключением не отличаются от показателей водопоглощения и усадки контрольного состава ($W_m^3 = 2,34$ %, $\epsilon_{yc} = 0,38$ мм/м). Из данной серии выделяются несколько образцов. Так, водопоглощение образца на Никольском песчанике (состав № 9) на третьи сутки больше контрольного в 2,5 раза: $W_m^3 = 5,89$ %. Причина заключается в высоком водосодержании бетона и низкой его плотности (2095 кг/м³).

Анализ водопоглощения песчаных порошково-активированных бетонов показал, что водопоглощение на 28-е сутки составляет 1,70...1,76 % по массе. Такое низкое водопоглощение может свидетельствовать об оптимальной гранулометрии смесей.

Усадка порошково-активированных щебеночных бетонов с повышенным В/Ц-отношением равна 0,35 мм/м. При снижении водоцементного отношения усадка понижается до 0,24...0,30 мм/м. В целом, низкие значения усадочных деформаций самоуплотняющихся реакционно-порошковых бетонов нового поколения дают основание говорить о повышенной их трещиностойкости от средовых и силовых воздействий при эксплуатации конструкций.

Усадочные деформации способствуют возникновению внутренних напряжений, которые неблагоприятно сказываются на морозостойкости, солестойкости и непроницаемости бетона, поэтому столь пристальное внимание уделяется этому вопросу. Анализируя условия возникновения усадочных деформаций, следует отметить несколько факторов, влияющих на этот показатель. Усадочные деформации связаны не только с количеством цемента в смеси, но и с его составом. В большей степени усадка возрастает с увеличением в составе цемента C_2S и C_3A .

Контракционная усадка, являющаяся составной частью общей усадки, связана с изменением структуры химически связанной воды в структуре псевдокристаллических, гелеобразных гидросиликатов кальция, а также адсорбционной воды. Контракционная усадка ведет к незначительному увеличению

пористости, однако ее показатели значительно ниже влажностной усадки. В литературе весьма ограниченно встречаются сведения о влиянии состава гидратных фаз на показатели усадки. Ранее в наших исследованиях было показано, что практически все СП и ГП замедляют гидратацию силикатных фаз цемента [12, 13, 20], в частности снижают количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в системе в результате гидратации C_3S и C_2S . Это способствует замедлению процесса формирования жесткого кристаллического каркаса и, следовательно, приводит к удлинению времени процесса усадки.

Другим негативным фактором применения СП и ГП в технологии БНП является их стабилизирующее влияние на метастабильные гидроалюминаты кальция, образующиеся на ранних стадиях гидратации. Подобные гидроалюминаты, содержащие в своей структуре 8...19 молекул воды, постепенно трансформируются в более стабильные фазы (например, C_3AH_6). В результате чего из метастабильных гидратов выделяется свободная вода, способствующая протеканию процессов вторичной гидратации, а следовательно, изменению плотности структуры, поскольку, например, плотность фазы C_3AH_8 равна 1950 кг/м^3 , а фазы C_3AH_6 — 2530 кг/м^3 .

При проектировании составов цементных бетонов необходимо учитывать тот фактор, что состояние гидроалюминатов зависит от температуры окружающей среды. Например, при температурах в пределах $+5^\circ\text{C}$ стабильной является фаза CAH_{10} , при средних температурах $t = +15...+20^\circ\text{C}$ — фазы C_2AH_8 и $\text{Al}(\text{OH})_3$, при более высоких температурах $t = +30...+50^\circ\text{C}$ — C_3AH_6 . Кроме того, при повышении температуры кристаллы C_3AH_6 увеличиваются в размерах, а скорость перекристаллизации AFm-фаз также возрастает [20].

Подобные явления могут приводить к разуплотнению структуры (хотя и незначительному, вследствие малого количества алюминатных фаз в составе цемента) и появлению внутренних напряжений, аналогичных тем, которые возникают при контракционной усадке. Таким образом, имея представление о характере влияния добавок (в частности, СП и ГП) на состав гидратных фаз, можно косвенно прогнозировать характер изменения усадочных деформаций. В отдельных случаях процессы перекристаллизации приводят к сбросам прочности бетона в период длительного твердения и появлению так называемого пилообразного характера изменения прочности бетона во времени. Исследования, выполненные в данной работе, показали, что повышенные расходы цемента в БНП, в состав которых входят каменная мука и пески различного фракционного состава, не приводят к увеличению показателей усадки выше таковых показателей для традиционных бетонов. Однако прочность БНП при расходах цемента $620...680 \text{ кг/м}^3$ находится в пределах $100...110 \text{ МПа}$, что значительно выше, чем при аналогичных расходах цемента в обычных бетонах.

В целом достаточно трудно оценить характер влияния повышенного содержания цемента, уровня микродispersности и водосодержания смеси и других факторов на суммарные показатели усадки бетона. Для этого необходимы более детальные исследования микроструктуры и продуктов гидратации модифицированных бетонов с целью изучения механизмов действия добавок (особенно органических) и микронаполнителей различного кристаллического строения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bornemann R., Fenling E.* Ultrahochfester Beton-Entwicklung und Verhalten // Leipziger Massivbauseminar. 2000. Bd. 10. S. 1—15.
2. *Schmidt M., Bornemann R.* Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton // Proc. 14. Jbausil. 2000. Bd. 1. S. 1083—1091.
3. *Grübe P., Lemmer C., Rühl M.* Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden Beton. S. 243—249.
4. *Kleingelhöfer P.* Neue Betonverflüssiger auf Basis Polycarboxilat // Proc. 13. Jbasil Weimar 1997. Bd. 1. S. 491—495.
5. *Калашников В. И.* Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов : дис. ... д-ра техн. наук в форме науч. докл. Воронеж, 1996. 89 с.
6. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В. И. Калашников, М. Н. Мороз, О. В. Тараканов, Д. В. Калашников, О. В. Суздальцев // Строительные материалы. 2014. № 9. С. 70.
7. *Калашников В. И.* Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активированных бетонов нового поколения // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2016. № 12(988). С. 48—52.
8. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В. И. Соломатов и др. Киев : Будивельник, 1991. 144 с.
9. *Аганин С. П.* Бетоны низкой водопотребности с модифицированным кварцевым наполнителем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М, 1996. 17 с.
10. *Фадель И. М.* Интенсивная раздельная технология бетона, наполненного базальтом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М, 1993. 22 с.
11. *Калашников В. И.* Терминология науки о бетоне нового поколения // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 103—106.
12. The Influence of plasticizer on the composition of cement stone hydration products / O. V. Tarakanov, E. A. Belyakova, V. I. Kalashnikov, O. V. Grintsova, N. I. Makridin // International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science (ISMEMS 2016). Advances in Engineering Research. Vol. 93. Pp. 186—191. DOI: 10.2991/ISMEMS-16.2016.33.
13. *Tarakanov O. V., Belyakova E. A., Yurova V. S.* Complex organomineral additives with hardening accelerator // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 929—935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.929.
14. *Калашников В. И.* Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4—6.
15. *Дворкин Л. И., Дворкин О. Л.* Строительные минеральные вяжущие материалы. М. : Инфра-Инженерия, 2011. 554 с.
16. *Тараканов О. В., Белякова Е. А.* Повышение эффективности применения комплексных противоморозных добавок в технологии зимнего бетонирования // Вестн. отд-ния строит. наук РААСН : сб. науч. тр. 2012. Вып. 16. С. 146—151.
17. *Ананьев С. В.* Состав, топологическая структура и реотехнологические свойства реологических матриц для производства бетонов нового поколения : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Пенза, 2011. 148 с.
18. *Валиев Д. М.* Пропариваемые песчаные бетоны нового поколения на реакционно-порошковой связке : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Пенза, 2013. 167 с.
19. *Володин В. М.* Порошково-активированный высокопрочный песчаный бетон и фибробетон с низким удельным расходом цемента на единицу прочности : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Пенза, 2012. 160 с.
20. *Тараканов О. В.* Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та архитектуры и стр-ва, 2005. 564 с.

© Тараканов О. В., Акчурин Т. К., Белякова Е. А., 2022

Поступила в редакцию
в январе 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Тараканов О. В., Акчурин Т. К., Белякова Е. А. Применение модифицированных бетонов нового поколения в строительстве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 163—174.

Об авторах:

Тараканов Олег Вячеславович — д-р техн. наук, проф., Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Российская Федерация, 440028, г. Пенза, ул. Титова, 28; tarov60@mail.ru

Акчурин Талгат Кадимович — канд. техн. наук, проф., зав. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; Scopus ID: 57190967539; info@vgasu.ru

Белякова Елена Александровна — канд. техн. наук, доц. каф. кадастра недвижимости и права, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Российская Федерация, 440028, г. Пенза, ул. Титова, 28; var_lena@mail.ru

Oleg V. Tarakanov^a, Talgat K. Akchurin^b, Elena A. Belyakova^a

^a **Penza State University of Architecture and Construction**

^b **Volgograd State Technical University**

THE USE OF MODIFIED CONCRETE OF A NEW GENERATION IN CONSTRUCTION

The demand and economic feasibility of using high-strength concrete in construction is shown. The main aspects of obtaining high-strength concretes of a new generation based on superplasticizers and finely ground dense and strong rocks and possible processes of hydration of plasticized cement systems are analyzed. The values of water absorption and shrinkage of powder-activated, sandy and crushed stone concretes of a new generation have been studied. Possible mechanisms of influence of hydrated phases of cement stone on concrete shrinkage parameters are analyzed.

Key words: new generation concretes, high-strength concretes, special structures, high-rise buildings, economic feasibility, polyfunctionality of concretes, superplasticizers, stone flour, ground sand, water reduction, reaction-powder concrete, sandy concrete, hydration processes, mechanism of action of additives, particle surface charge, microstructure, water absorption, shrinkage.

For citation:

Tarakanov O. V., Akchurin T. K., Belyakova E. A. [The use of modified concrete of a new generation in construction]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2022, iss. 1, pp. 163—174.

About authors:

Oleg V. Tarakanov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Penza State University of Architecture and Construction. 28, Titova st., Penza, 440028, Russian Federation; tarov60@mail.ru

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; Scopus ID: 57190967539; info@vgasu.ru

Elena A. Belyakova — Candidate of Engineering Sciences, Penza State University of Architecture and Construction. 28, Titova st., Penza, 440028, Russian Federation; var_lena@mail.ru