

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Батяновский Э. И., д-р техн. наук, профессор, **Бондарович А. И.**,
канд. техн. наук, **Рябчиков П. В.**, ст. науч. сотр. (БНТУ).

Аннотация. В строительной практике все шире применяют бетон высокой прочности, превышающей 100 МПа. Его технология характеризуется рядом особенностей, в том числе по используемым для обеспечения высокой прочности дополнительным ингредиентам (микрокремнезем, каменная мука), а так же спецификой контроля прочности бетона разрушающим и неразрушающими методами. Эти особенности сжато отражены в материале статьи.

Особенности состава, роль компонентов и режима твердения высокопрочного бетона. Известно [1-6], что в тяжелом бетоне прочность зоны контакта (переходной зоны) между цементным камнем и заполнителем меньше прочности самого цементного камня и характеризуется большей пористостью. Добавка в бетон *микрокремнезема*, с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе, приводит к уплотнению структуры контактной переходной зоны за счет реакции с портландитом: $\text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{kCaO} \cdot \text{nSiO}_2 \cdot \text{pH}_2\text{O}$. В результате снижается ее пористость, возрастает качество (силы) сцепления цементного камня с заполнителем (и арматурой в железобетоне). Одновременно, развитие реакций между аморфным SiO_2 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ способствует повышению скорости гидролиза и гидратации C_3S и C_2S – основных минералов клинкерной части цемента. Кроме изложенного, тонкодисперсные частицы микрокремнезема могут служить «центрами кристаллизации» вокруг которых с меньшими затратами энергии, а значит – и в более высоком темпе и количестве, формируются кристаллогидратные новообразования – продукты взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой. Все это в совокупности и определяет роль микрокремнезема в формировании более плотной и прочной структуры цементного камня и бетона в целом и необходимость его использования для получения бетона повышенной прочности.

Дополнительным структурирующим компонентом цементного теста (а в затвердевшем бетоне – цементного камня) является *каменная мука*, которая вводится в состав высокопрочного бетона в виде тонкоизмельченного порошкообразного материала из прочных горных пород, в частности, молотого базальта, исходная прочность которого достигает 500 МПа. Тонкодисперсные зерна микрозаполнителя являются физической подложкой для формирования кристаллогидратных новообразований – продуктов взаимодействия цемента с водой, по аналогии с таковыми частицами микрокремнезема. Кроме этого, адсорбируя часть воды затворения и, будучи равномерно распределены в объеме цементного теста (и бетона), они стабилизируют его структуру, что особенно важно для литых и высокопластичных бетонных смесей. Удержива-

емая ими вода в дальнейшем перераспределяется и «уходит» на реакции гидратации цемента, поддерживая их развитие во времени и снижая отрицательный эффект от «аутогенной» усадки цементного камня [7]. Это особенно важно для высокопрочного бетона, характеризующегося низким водоцементным отношением и недостатком воды для развития гидратационного процесса во времени.

С учетом отсутствия в Беларуси разработки базальтовых и иных высокопрочных горных пород для бетона прочностью 120...150 МПа в качестве каменной муки апробирован и подтвердил эффективность молотый гранитный отсев ОАО «Гранит». Степень его измельчения принята равной $S_y \sim 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$ (по прибору типа «ПСХ») т.е. соответствует тонине помола стандартных цементов. Эта «каменная мука» характеризуется плотностью: $\rho_{\text{см}} \sim 2740 \text{ кг/м}^3$, насыпной плотностью: $\rho_{\text{см}}^0 \sim 1100 \text{ кг/м}^3$, водопотребностью - коэффициентом «нормальной» густоты: $K_{\text{нг}} \sim 0,22$.

Изучение влияния тонкодисперсных добавок (активной – микрокремнезем и инертной – каменная мука) на кинетику изменений прочности бетона во времени показывает, что с ростом их дозировки прочность бетона (при прочих равных условиях) возрастает. Учитывая, как положительное влияние на прочность бетона, так и технологическую сложность введения в смесь дополнительного компонента – каменной муки, ее использование (по полученным нами экспериментальным данным) целесообразно для бетонов прочностью более 120 МПа.

Для обеспечения прочности бетона проектного возраста $f_{\text{см},28} \geq 100 \text{ МПа}$ необходимы *добавки – пластификаторы* с большим водоредуцирующим эффектом, получившие название гиперпластификаторов и производимые на основе поликарбоксилатных смол. По существу появления этих веществ в качестве добавок в цементные бетоны обеспечило возможность роста его прочности более 100 МПа, получение «самоуплотняющихся» и «высокоэффективных» бетонов особоплотной структуры, непроницаемости, эксплуатационной надежности и, ожидается, долговечности.

В качестве пластификаторов для бетона прочностью $f_{\text{см},28} \leq 150 \text{ МПа}$ в наших исследованиях апробированы и подтвердили эффективность три разновидности добавок: производимые в Беларуси – «Реламикс ПК» и «Стахемент 2000», а так же «Sika ViskoCrete» фирмы «Sika». Их дозировка по сухому веществу составляла от 0,3...0,35 % до 1,0 % (1-3 % при $C_{\text{р.д}}$ 30-35 %) от массы цемента, в зависимости от того, какая требовалась подвижность бетонной смеси (вплоть до литой, т.е. $OK_{\text{факт}} \sim 23...25 \text{ см}$) и каким был необходимый период времени сохранения подвижности на заданном уровне. Влияние дозировки этих добавок на кинетику твердения (роста прочности) бетона в нормально-влажностных условиях иллюстрируют графические зависимости рисунка 1.

Экспериментально выявлено влияние на кинетику твердения и уровень прочности бетона следующих *режимов твердения бетона*. Режим 1 – Естественное твердение образцов при «стандартизированных» условиях в камере нормально-влажностного твердения (НВТ; температура $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ и относи-

тельная влажность $\geq 90\%$). Режим 2 – С кратковременным нагревом, включая предварительную выдержку после изготовления образцов 2...2,5 ч, нагрев в термостате (над водой) до температуры 40...50 °С в течение 2,5...3,0 ч, затем обогрев отключался, и образцы остывали в емкости термостата до утра (~12...14 ч), после чего одни серии испытывали в возрасте 24 ч, а другие образцы до момента испытания хранили в камере НВТ. Режим 3 – С высокотемпературным нагревом, включая предварительную выдержку после изготовления образцов 2...2,5 ч, нагрев в термостате до температуры 80...85 °С в течение 4,0...4,5 ч; обогрев отключали и образцы остывали в термостате до утра (~12 ч), часть образцов испытывали в возрасте 24 ч, остальные до момента испытания хранили в камере НВТ. Режим 4 – Твердение образцов в условиях гидроизоляции (под пленкой) в сушильном шкафу при температуре 40 °С и относительной влажности $f \sim 60\%$ до испытаний и в течение 28 суток (шкаф включался утром в 8¹⁵ и выключался в 18⁰⁰ каждый рабочий день, за исключением выходных дней).

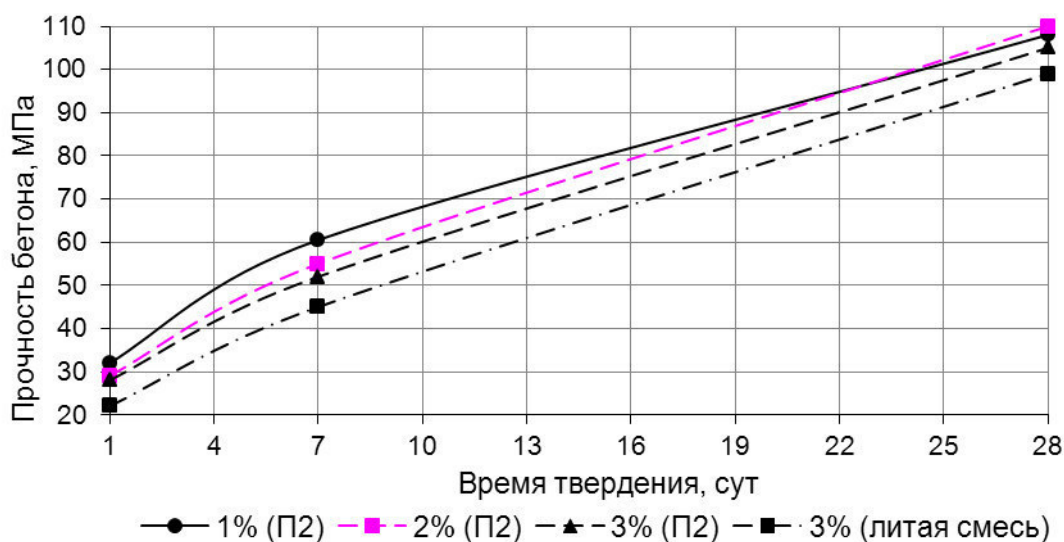


Рисунок 1 – Прочность бетона в зависимости от количества добавки пластификатора

Из результатов экспериментов, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод, что фактически любая тепловая интенсификация твердения высокопрочного бетона относительно нормальных ($t \sim 20 \pm 3$ °С) условий его твердения сопровождается повышением темпа роста прочности в начальный период (1-3 сут; до 7 сут при $t = 40$ °С), но приводит к снижению прочности в проектном возрасте.

Таблица 1 – Влияние режима твердения на прочность бетона (сжатие)

Режим твердения бетона	Характеристика режима твердения	Прочность бетона в МПа и относительная (%), в возрасте, сут.							
		1		3		7		28	
		МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%
№ 1	$t \sim 20 \pm 3$ °С; f	32	30	60	5	90	83	108	100

	>90 %				5				
№ 2	$t_H \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$	44	41	65	-	88	-	99	92
№ 3	$t_H \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$	79	73	82	-	84	-	94	87
№ 4	$t_{\text{ТВ}} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$, гидроизоляция	52	48	74		8	-	103	95

Повышение температуры твердения высокопрочного бетона сверх $40 \text{ }^\circ\text{C}$ однозначно сопровождается ее «недобором» в проектном возрасте, составляющем для $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ до 10 %, а для $t \sim (80 \dots 85) \text{ }^\circ\text{C}$ – до 15 %. Этот отрицательный эффект связан с ускоренным образованием вокруг цементных «ядер» реакционных оболочек (каевок) из новообразований (гидросиликатов кальция, алюминатов и ферритов и пр.) от реакций клинкерных минералов с водой затворения. Их «раннее» уплотнение, вследствие интенсификации процессов гидролиза и гидратации под воздействием повышенной температуры, приводит к замедлению и даже прекращению химических реакций цемента, т.к. молекулы воды с затруднением или вовсе не могут диффундировать сквозь уплотнившиеся слои кристаллогидратов к реакционноспособным поверхностям вяжущего. Это явление в особой степени относится к высокопрочным бетонам, т.к. они характеризуются низким начальным водосодержанием, т.е. малым количеством воды затворения. В результате такой бетон при повышении температуры быстро набирает прочность, но ее абсолютный уровень понижается.

Особенности разрушающего метода контроля прочности (на сжатие). Оценка данных о влиянии типоразмера образцов на показатель прочности высокопрочного бетона полученных экспериментально «при прочных равных условиях», подтверждает данные других исследователей [8–11], полученных в разное время и при различающихся условиях осуществления экспериментов. Из них следует, что оценка прочности на сжатие высокопрочного бетона не зависит от стандартизированного (ГОСТ 10180) типоразмера образцов, т.е. показатель прочности одинаков для образцов-кубов с ребром 70; 100 и 150 мм при условии соблюдения правила «прочих равных условий».

Следует отметить, что внутрисерийные коэффициенты вариации, рассчитанные по данным образцов одного типоразмера, не превышали 3,0 %, а V_m , определенные для объединенных серий из 18 образцов, составляли не более 2,5 %. Подтверждено, что характер разрушения образцов всех типоразмеров одинаков – импульсный, с близким к мгновенному при предельных нагрузках, достигающих предела прочности при сжатии бетона, что и является причиной равенства показателей прочности бетона на сжатие при испытаниях образцов разных типоразмеров.

Особенности неразрушающего контроля прочности бетона (методы ударного импульса (тип прибора «ОНИКС») и отрыва со скалыванием). Результаты испытаний методом разрушающего контроля по ГОСТ 18105–2010 и ГОСТ 10180–2012, испытанием контрольных образцов и неразруша-

ющего контроля по СТБ 2264-2012 и ГОСТ 18105–2010 методами ударного импульса и отрыва со скалыванием, приведены в виде градуировочных зависимостей на рис. 2 и 3. Их анализ показывает, что для метода ударного импульса (прибор типа «ОНИКС») оценка разрушающим и неразрушающим методами совпадает до прочности бетона ~ 60 МПа; затем показания неразрушающего метода начинают «отставать» от фактической в этих же образцах, определенной сжатием под прессом. По достижении бетоном прочности по образцам ≥ 100 МПа отставание составило $\sim (20\dots25)$ % (а в отдельных образцах – до (30) %).

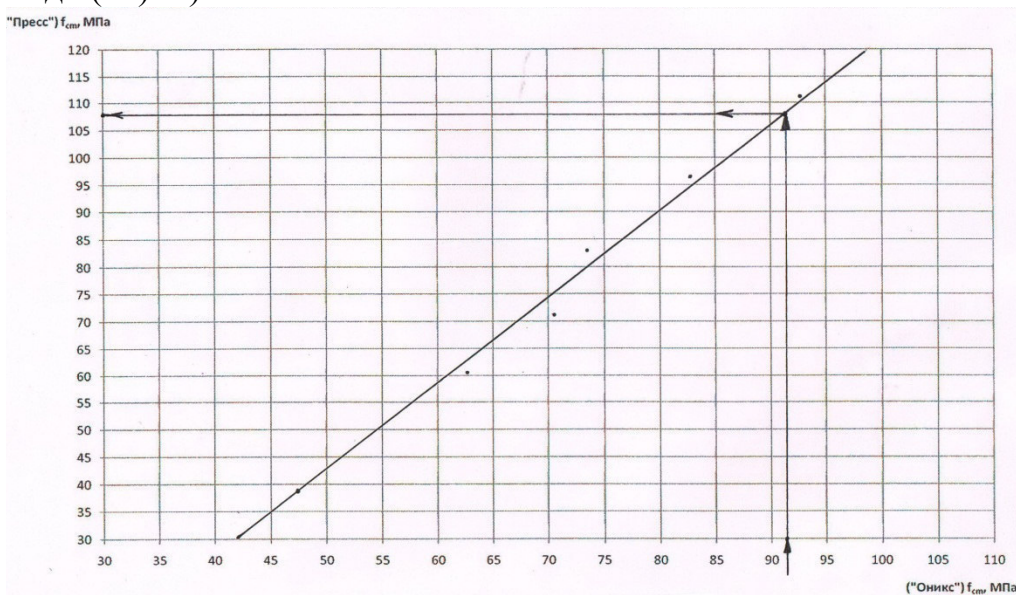


Рисунок 2 – Градуировочная зависимость (пресс-оникс) (при твердении бетона 1 и более суток)

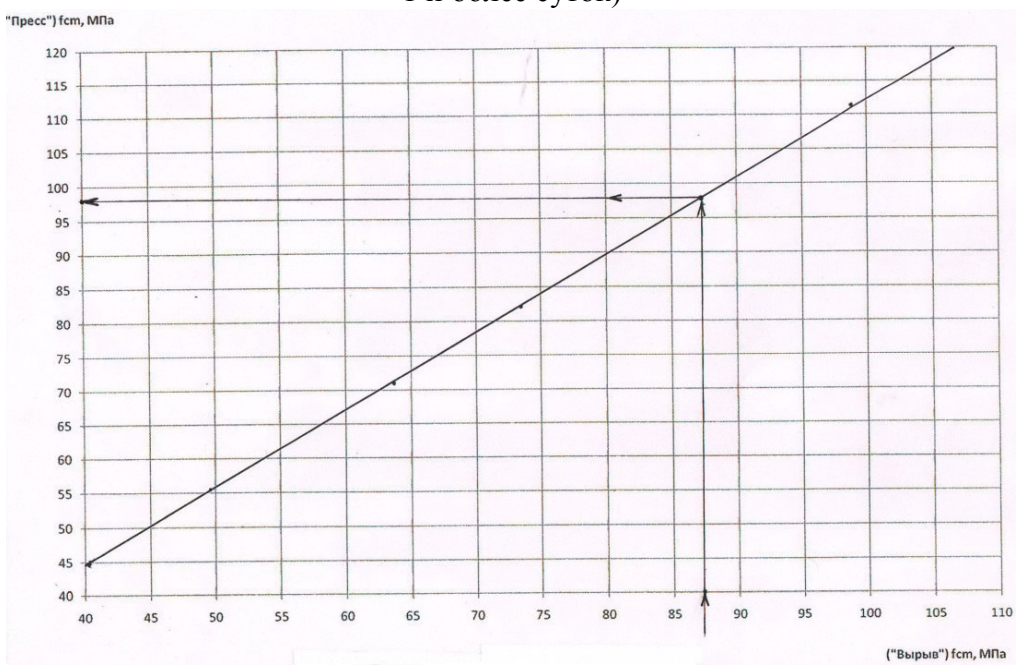


Рисунок 3 – Градуировочная зависимость (пресс-вырыв) (при твердении бетона 3 и более суток)

Оценка прочности методом отрыва со скалыванием отражает эту же тенденцию, составив к 100 МПа несколько меньшую разницу ~ (10-15) %, увеличивающуюся с дальнейшим ростом фактической прочности бетона, определенной сжатием под прессом.

Выводы. 1. Получение бетона прочностью в проектном (28 сут.) возрасте $f_{см,28} \geq 100$ МПа обеспечивается имеющимися на рынке Беларуси компонентами отечественного производства и производства Российской Федерации (в частности, микрокремнезема). 2. Особенности составов, режимов приготовления, транспортирования, укладки и твердения высокопрочного бетона исследованы, разработаны соответствующие рекомендации и накоплен опыт, позволяющий реализовывать его применение в заводских условиях производства сборных изделий и монолитном строительстве. 3. Экспериментально обоснованы особенности контроля прочности бетона как для разрушающего (по контрольным образцам), так и неразрушающего методов (ударного импульса и отрыва со скалыванием) ее оценки с использованием соответствующих градуировочных зависимостей.

БНТУ, в лице кафедры «Технология бетона и строительные материалы» и НИИЛ бетона и строительных материалов, готов к сотрудничеству по данному направлению с заинтересованными организациями и физическими лицами.

Литература. 1. Шейкин, А.Е., Чеховский, Ю.В., Бруссер, М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с. 2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с. 3. Scrivener, Karen L, Crumbie, Alison K., Pratt, P.L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete //Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2 - 4, 1987. - Pittsburgh (Pa), -1988. -p.87 – 88. 4. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste. //J. Chin. Silic. Soc., 1987, N2. - p. 114-121. 5. Detwiler Rachel J., Monteiro Paulo J.M., Wenk Hans-Rudolf, Zhong Zengqiu. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface //Cem. And Concr. Res., 1988, M5, - p.823 – 829. 6. Garboczi Edward J., Bentz Dale P. Digital Simulation of the Aggregate- Cement Paste Interfacial Zone in Concrete. //J. Mater. Res., 1991, Nsll. - p. 196 – 201. 7. Тейлор К. Химия цемента. Пер.с англ.-М.: Мир ,1986.-С.294-345. 8. Цискрели, Г.Д., Лекишвили, Г.Л. О масштабном эффекте в бетонах// Бетон и железобетон. – 1966. № 10. – С. 29-31. 9. Свиридов, Н.В., Коваленко, М.Г. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементов// Бетон и железобетон. – 1990. № 2. – С. 21.22. 10. Веретенников, В.И., Бормотин, А.А. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии // Бетон и железобетон. – 2000. - № 5. – С. 27-30. 11. Батяновский, Э.И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей: Дис. д-ра. техн. наук: БНТУ. – Минск, 2002. – 351 с.