

13. Проектирование полов: Пособие П11-03 к СНиП 2.03.13-88 Полы. – Введ. 01.01.2004. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2004. – 128 с.

14. Рекомендации по расчету и конструированию сталефибробетонных промышленных полов: P5.03.073.10. – РУП «Институт БелНИИС», 2010.

15. Beckett, D. Comparative Tests on Plain, Fabric Reinforced and Steel Fibre Concrete Reinforced Industrial Ground Slabs / D. Beckett – //Concrete. – 1990. – V.24, No.3. – P.43–45.

16. Falkner, H. Comparative Investigation of Plain and Steel Fibre Reinforced Industrial Ground Slabs / H. Falkner, M. Teutsch. – 1993. – IBMB Report. – No.102. – 80 p.

17. Beckett, D. Corner and Edge Loading on Concrete Reinforced Industrial Ground Floors Reinforced with Steel Fibres / D. Beckett – //Concrete. – 1999. – V.33, No.3. – P.22–24.

18. Chen, S. Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete Ground Slabs. /S. Chen. //Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures&Buildings. – 2004. – V.157, SB2. – P.157–163.

19. Sorelli, L. Steel Fiber Slabs on Ground: A Structural Matter / L. Sorelli, A. Meda, G. Plizzari. //ACI Structural Journal. – 2006. – V.103, No.4. – P.551–558

20. British Concrete Society, Concrete Industrial Ground Floors: A Guide to Design and Construction. – British Concrete Society. – Technical Report No. 34. – 2003. – 140 pp.

21. Рекомендации по проектированию и технологии возведения бесшовных сталефибробетонных полов по системе «PRIMEKSS-СИББИОФАРМ-БЕЛ»: P5.03.127-2014. – РУП «Институт БелНИИС», 2014.

УДК 621.762; 691.002(032)

Рябчиков П.В., Якимович В.Д., Батяновский Э.И.

СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью (опасной с позиций устойчивости несущих строительных конструкций при эксплуатации) высокопрочных бетонов (фактически при $f_c \geq 70$ МПа) является их возрастающая хрупкость. Она проявляется в снижении пластических деформаций в бетоне под нагрузкой. В результате высокопрочный бетон при предельных нагрузках разрушается практически мгновенно, что представляет серьезную угрозу безопасной эксплуатации зданий (сооружений) в чрезвычайных ситуациях (при превышении расчетных нагрузок; появлении непредусмотренного расчетом эксцентриситета в сжатых элементах (колонны, опоры и т.д.), пожарах и др.).

В этой связи одной из важнейших задач развития и совершенствования технологии высокопрочного бетона, наряду с обеспечением прочности на сжатие, является повышение его «деформативности» и прочности на растяжение. Введение в высокопрочный бетон (точнее, в цементный камень, как составляющей бетона) волокнообразных углеродных наноматериалов (УНМ) может способствовать росту его прочности на растяжение за счет эффекта «наноармирования» кристаллогидратной структуры и, тем самым, в какой-то мере позволит решить проблему повышения деформативности бетона.

АПРОБИРОВАННЫЕ СОСТАВЫ БЕТОНА

Разработанные с учетом зарубежного опыта и свойств (качества) отечественных материалов составы бетона и оцененные экспериментально (при прочности ≥ 100 МПа на образцах-кубах с ребром 70 мм) приведены в таблице 1. Вопрос соответствия испытаний высокопрочного бетона на образцах разных типоразмеров является одной из задач настоящих исследований. В данном конкретном

случае типоразмер в 70 мм принят по условию испытаний образцов бетона на прессе с усилием до 1250 кН (125 ТС), которыми оснащены лаборатории строительных организаций и предприятий сборного бетона и железобетона.

Таблица 1 – Составы тяжелого высокопрочного бетона

№п/п	Расход компонентов, кг:								Хим. добавка, % от МЦ	(В/Ц) ₀	Расчетная прочность, МПа, в 28 сут.	
	Цемент	Песок	Обычный щебень		Кубовидный щебень		Мука каменная	МК				В
			5...10	10...20	2...4	4...6						
1	480	650	430	720	–	–	–	–	168	0,6	0,35	60
2	440	390	–	–	300	1170	–	–	160	0,6	0,36	60
3	500	600	490	730	–	–	–	–	150	0,8	0,30	80
4	480	400	–	–	330	1120	–	–	144	0,8	0,29	80
5	500 ¹	570	–	–	350	760	75	75	150	1,0	0,26	100
6	550 ¹	490	1110	–	–	–	83	83	165	1,0	0,26	100
7	520 ¹	480 ²	–	–	350	780	104	104	150	1,5	0,24	120
8	550	450	1100	–	–	–	110	110	160	1,5	0,24	120
9	600 ¹	450 ²	–	–	300	610	180	180	172	2,0	0,22	140
10	650 ¹	420	840	–	–	–	195	195	186	2,0	0,22	140

1) при наличии микрокремнезема водоцементное отношение соответствует: (В/Ц)₀ = В : (Ц+МК);
2) песок с размером зерна 1,25 мм

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА И ВРЕМЕНИ ТВЕРДЕНИЯ (ДО 90 СУТ.) НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

Эксперименты выполнены на бетоне состава № 5 таблицы 1, характеризующемся номинальной проектной прочностью $f_{c,28} \geq 100$ МПа. При расходе цемента марки М500 (класс – СЕМ I 42,5 R), равном 500 кг на 1 м³ бетона.

Режимы твердения образцов соответствовали № 1 (НВТ), № 2 ($t_{\text{т}}$ до 50⁰С), №3 ($t_{\text{тв}} \sim 40^{\circ}\text{C}$), №4 твердение образцов в условиях гидроизоляции (под пленкой) в сушильном шкафу при температуре 40⁰С и относительной влажности $f \sim 60\%$ до испытаний. Образцы, твердевшие по режимам № 2 и № 3, до испытаний в возрасте 7, 14, 28, 45 и 90 сут. хранились в камере нормально-влажностного твердения (НВТ).

Результаты экспериментов приведены на рисунке 1. Из них можно сделать следующие выводы.

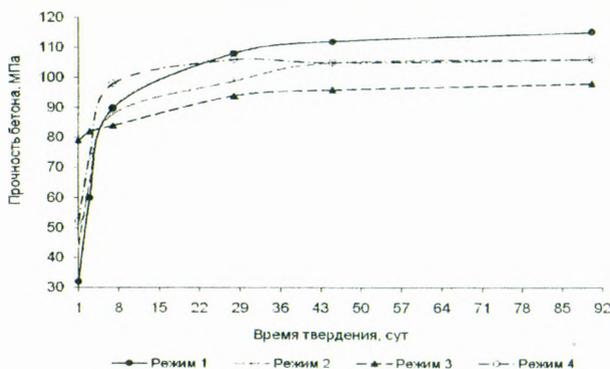


Рисунок 1 – Изменение прочности высокопрочного бетона от режима твердения

Фактически любая тепловая интенсификация твердения высокопрочного бетона относительно нормальных ($t \sim 20 \pm 3^\circ\text{C}$) условий его твердения сопровождается повышением темпа роста прочности в начальный период (1...3 сут.; до 7 сут. при $t = 40^\circ\text{C}$), но приводит к снижению прочности как в проектном, так и в более "зрелом" возрасте (45 и 90 сут.).

Твердение высокопрочного бетона при постоянной повышенной температуре среды ($\sim 40^\circ\text{C}$) неоднозначно влияет на кинетику роста его прочности. В частности, в начальный период твердения (до 7 сут.) прочность (образцы были гидроизолированы, т.е. испарение из бетона воды исключено) твердевшего при 40°C бетона была выше ее значений для образцов нормально-влажностных условий твердения. Однако к 14...18 сут. твердения значения прочности в означенных случаях сравнялись, а к проектному и более позднему возрасту (45...90 сут.) прочность образцов, твердевших при 40°C (режим № 4), оказалась ниже прочности образцов-аналогов, но твердевших при более благоприятных нормально-влажностных условиях (режим № 1).

Следует отметить, что при $t \sim 40^\circ\text{C}$ бетон достиг практически проектной прочности к 7 сут. твердения. Одновременно можно сделать вывод о необходимости ухода (гидроизоляции) за бетоном в этом случае не менее, чем в течение 7 сут.

Так как в противном случае (особенно при испарении воды затворения) бетон не достигнет расчетной проектной прочности.

Повышение температуры твердения высокопрочного бетона сверх 40°C однозначно сопровождается ее "недобором" в проектном возрасте, составляющем для $t = 50^\circ\text{C}$ до 10 %, а для $t \sim (80...85)^\circ\text{C}$ – до 15 %. Эта тенденция сохраняется к 45 и 90 сут. твердения бетона.

Этот отрицательный эффект связан с ускоренным образованием вокруг цементных "ядер" реакционных оболочек (каемок) 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 гидратов к реакционно-способным 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.

ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА В ВОЗРАСТЕ ДО 90 СУТОК

В настоящих экспериментах (рисунок 2) варьировали, при прочих равных условиях, содержание в составе бетона количество микрокремнезема (МК) и каменной муки (КМ) – (молотого гранитного отсева) при постоянном расходе цемента (500 кг, исходный состав бетона № 5, таблица 1).

Количество МК и КМ изменяли от 0 до 30 % от массы цемента и вводили в бетон в соотношении: МК:КМ=1:1.

Во всех случаях при корректировке водосодержания бетона сохраняли примерно равную консистенцию бетонной смеси (ОК $\sim 6...8$ см).

Режимы твердения бетона были приняты № 1 (ИВТ) и № 2 (нагрев до 50°C) с целью ускорения твердения бетона.

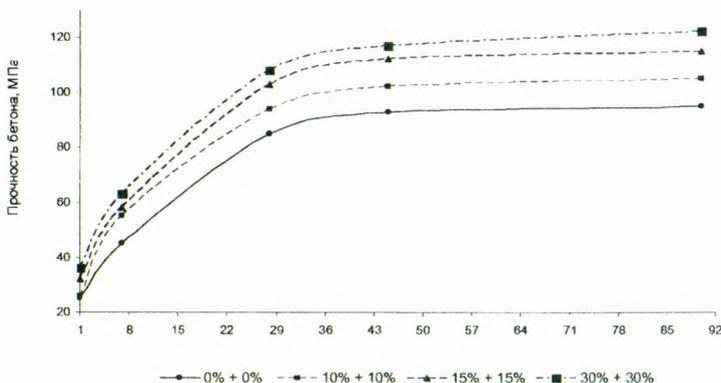


Рисунок 2 – Изменение прочности высокопрочного бетона от количества микрокремнезема и каменной муки (твердение в НВТ)

Относительная прочность бетона определена и отражена (в %) от прочности бетона без микрокремнезема и молотого отсева в проектном возрасте, т.е. к $f_{c,28} \sim 88$ МПа, принятой за 100 %.

Данные, приведенные на рисунке 2, свидетельствуют и подтверждают выводы предыдущего раздела о влиянии повышенной температуры на прочность бетона.

Очевидна роль микронаполнителей в виде микрокремнезема и молотого гранитного отсева. Так, с ростом их дозировки прочность бетона (при прочих равных условиях) возрастает. При этом более значительно в первые сутки твердения с начальным подогревом бетона.

В дальнейшем (до 90 сут твердения) эффективность этих добавок в бетоне сохраняется в виде устойчивой тенденции роста его прочности.

Учитывая полученные экспериментальные данные и опыт зарубежных исследований, увеличение дозировки МК и КМ до максимума (т.е. до 30 % от МЦ) целесообразно для бетонов прочностью более 120 МПа; для принятого за базовый состав – бетон прочностью в 100...110 МПа, рациональной следует считать содержание МК и КМ в количестве до 15 % от массы цемента.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ПЛАСТИФИКАТОРА НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА В ВОЗРАСТЕ ДО 90 СУТОК

В этих экспериментах оценивалось возможное влияние вещества добавки пластификатора в дозировке 1...3 % по жидкому веществу (концентрация раствора $\sim 30...35$ %), что соответствовало ее дозировке в $\sim 0,3...1,0$ % по сухому веществу относительно массы цемента.

Цель эксперимента заключалась в определении рациональных дозировок добавки в бетон по критерию изменения его прочности при одновременном изменении консистенции бетонной смеси. С ростом дозировки раствора добавки от 1 % от 3 % (0,3...1,0 по сух. вещ.). Консистенция бетонной смеси изменяется от марок П2 - П3 до П5 (т.е. до консистенции литой смеси).

Состав бетона для исследований – № 5 по таблице 1 (Ц ~ 500 кг; МК ~ 15 %; КМ ~ 15 %).

Результаты экспериментов приведены на рисунке 3, и из него следует, что для проектного возраста бетона оптимальная дозировка добавки-пластификатора соответствует 1...2 % при дозировании ее в виде раствора (0,3...0,6 %) по сухому веществу. Данные о прочности бетона к 45...90 сут. твердения свидетельствуют об изменении ситуации. В частности, образцы бетонов составов с дозировкой пластификатора в 3 % (1 % по сухому веществу) от массы вяжущего (совместно: цемент+микрокремнезем) к 45 сут. твердения в большей степени "нарастили" прочность и к 90 сут. – превысили ее значения относительно прочности образцов с (1...2) % добавки-пластификатора. Очевидно, к этому времени твердения бетона в благоприятных условиях самоликвидировалось "адсорбционно-тормозящее" действие молекул ПАВ добавки и, наоборот, проявился фактор снижения (за счет ее введения в большем количестве) водосодержания бетона. Результатирующим следствием является рост плотности цементного камня и бетона в целом, что отразилось в росте прочности последнего к возрасту 90 сут.

Следует отметить, что в этом случае не изменяли расход цемента, МК и КМ. С увеличением количества микронаполнителя не исключен рост оптимума в расходе добавки уже к проектному возрасту (28 сут.).

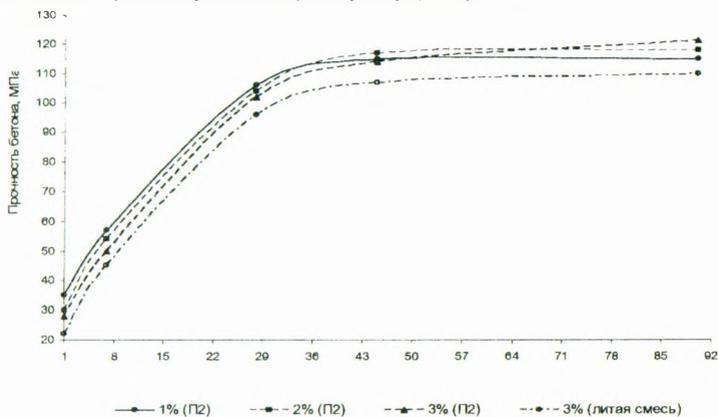


Рисунок 3 – Изменение прочности высокопрочного бетона от количества добавки пластификатора (твердение в НВТ)

ВЛИЯНИЕ УНМ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА В ВОЗРАСТЕ ДО 90 СУТОК

Эксперименты по данному направлению находятся в стадии постоянного выполнения. На основании результатов экспериментов, изложенных в предыдущем разделе, приняты к использованию в качестве основных видов УНМ разновидности: "суспензия" и "осадок".

Здесь приводятся данные, относящиеся к составу бетона № 5 по таблице 1 ($f_{c,28} \geq 100$ МПа), принятому в качестве базового для выполнения всех серий экспериментов настоящего раздела. Исследования составов бетона повышенной прочности ($f_{c,28} \sim 120...140$ МПа) могут базироваться на данных, полученных при выполнении экспериментов данного раздела.

На рисунке 4 приведены экспериментальные данные о влиянии УНМ в дозировке 0,05 % от массы цемента на прочность образцов бетона, твердевшего в

нормально-влажностных условиях и с кратковременным нагревом, из которых следует, что введение УНМ в целом способствовало повышению прочности бетона. Для бетона состава № 5 ($f_{c,28}$ МПа) зафиксирован рост прочности в проектном возрасте на 10...15%. При этом прочность бетона в первые 24 ч увеличилась на 25...30%. К 90 сут. твердения эта тенденция в целом сохранилась: увеличение прочности бетона за счет введения УНМ составило $\sim(10\pm 2)\%$.

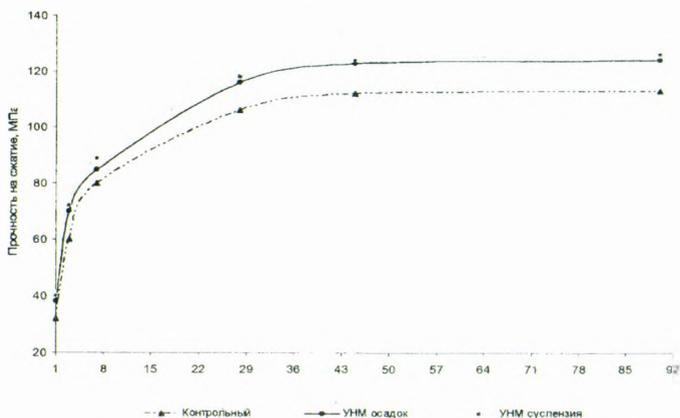


Рисунок 4 – Изменение прочности высокопрочного бетона от вида УНМ (твердение в НВТ)

В таблице 2 приведен ы основные характеристики мелкозернистого и высокопрочного бетонов (на примере бетонов с базовой прочностью ~ 100 МПа), модифицированные углеродными нановеществами.

Таблица 2 – Характеристики бетонов с УНМ

Характеристика бетона	Размерность	Величина в проектном возрасте		Повышение показателя, %
		Без УНМ	С УНМ	
Мелкозернистый бетон				
Прочность на сжатие	МПа	55...74	67...82	11...21
Прочность на осевое растяжение (раскалывание)	МПа	1,45...1,67	1,54...2,17	6...30
Прочность на растяжение при изгибе	МПа	9,1...11,9	9,9...13,9	9...17
Водопоглощение	%	3,9...4,0	3,6...3,7	-(7...8)
Высокопрочный бетон				
Прочность на сжатие	МПа	80...100	88...115	10...15
Модуль упругости	МПа $\times 10^3$	45...47	46...49	2...4
Водопоглощение	%	2,0...2,8	1,9...2,7	-(3,5...5,0)
Солестойкость после 10 циклов в насыщенных растворах:				
NaCl – Δm	%	2,5...2,6	2,3...2,5	-(4...8)
NaCl – f_{cm}	МПа	75...83	91...104	21...25
в растворе				
Na ₂ SO ₄ – Δm	%	2,5...2,7	2,3...2,5	-(7...8)
Na ₂ SO ₄ – f_{cm}	МПа	74...79	89...102	20...29
Водонепроницаемость	марка	W16...W18	W18...W20	I марка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты комплексных экспериментально-теоретических исследований показали, что воздействие углеродных наноматериалов на процессы взаимодействия цемента с водой, твердения, формирования структуры и прочностных свойств цементного бетона имеет физическую природу и не изменяет морфологию кристаллогидратных новообразований затвердевшего цемента.

Результаты механических испытаний бетона на сжатие, растяжение при изгибе и осевое растяжение (путем раскалывания образцов) (в данной статье не приведены) показали, что в последнем случае прирост прочности бетона (на примере мелкозернистого) более значителен, что подтверждает теоретическую предпосылку о «наноармировании» кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне за счет «встраивания» в неё волокнообразных УНМ, способствующих восприятию растягивающих усилий, возникающих в раскалываемых образцах.

Общая оценка свойств бетона с УНМ подтверждает его перспективность к применению в бетонах дорожных, аэродромных покрытий, а также при изготовлении сборных изделий и в варианте монолитного строительства несущих конструкций, сооружений транспортных коммуникаций.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112-098.
2. Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия: СТБ 1321-2002.
3. Цемент Ч.1. Состав, спецификации и критерии соответствия общих цементов: СТБ EN 197-1-2007.
4. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736-93.
5. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267-93.
6. Портландцемент. Шлакопортландцемент. Технические условия: ГОСТ 10178-85.
7. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90.
8. Тейлор, Х. Химия цемента; пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – С. 296-325.
9. Батяновский Э.И. Нанотехнологии и углеродные наноматериалы в строительном материаловедении / Э.И. Батяновский, П.В. Рябчиков, В.Д. Якимович // Строительная наука и техника. – 2009. – №3(24). – С.22-29.
10. Батяновский, Э.И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / Э.И. Батяновский, А.В. Крауклис, П.П. Самцов, П.В. Рябчиков, Пав.П. Самцов // Строительная наука и техника. – 2010. – №1-2(28-29). – С. 3-10.
11. Свиридов, Н.В. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементах // Бетон и железобетон. – 1990. – № 2. – С. 21-22.

УДК 624.012.36

Санникова О. Г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В АРМАТУРЕ НА СТАДИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ СПОСОБЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Введение

Несмотря на усложнение технологического процесса при изготовлении предварительно напряженных конструкций, достигаемые преимущества последних, такие как сокращение материалоемкости и снижение веса конструкции, увеличение трещиностойкости, жесткости, выносливости при действии многократно