

Батяновский Эдуард Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Бондарович Александр Иванович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской и испытательной лаборатории, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Рябчиков Павел Владимирович, научный сотрудник научно-исследовательской и испытательной лаборатории, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Eduard Batyanovskiy, DSc in Engineering Science, professor, head of the department, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

Aleksandr Bondarovich, PhD in Engineering Science, senior researcher at research and test laboratory, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

Pavel Ryabchikov, researcher at research and test laboratory, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

FEATURES OF CONTROL OF DURABILITY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

АННОТАЦИЯ

В материале статьи отражены особенности технологии и контроля прочности на сжатие (разрушающим и неразрушающим методами) бетона прочностью 100...150 МПа, для которого авторами в БНТУ были разработаны составы и исследованы основные физико-технические свойства и характеристики по соответствующему заданию Минстройархитектуры РБ.

Приведены результаты экспериментального обоснования режимов твердения, а также роли и необходимости применения

в бетоне прочностью 100...120 МПа минеральной добавки микрокремнезема (МК), а с повышением ее уровня сверх 120 МПа и дополнительно структурирующего ингредиента – каменной муки (КМ), в качестве которого использовали молотую (до $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$) гранитоидную породу (гранитный отсев РУПП «Гранит»). Данными экспериментов, выполненных по стандартным и оригинальным методикам, показано, во-первых, что масштабный фактор, учитывающий своеобразие испытаний образцов разного типоразмера «рядового» по прочности бетона, не может распространяться на бетоны прочностью $\geq 100 \text{ МПа}$ (в этом случае масштабный фактор равен 1,0); во-вторых, показано, что неразрушающий контроль прочности высокопрочного бетона следует осуществлять с обязательным предварительным построением фактических градуировочных зависимостей, так как показатель прочности, установленный на аутентичных образцах различными методами, существенно различается между собой и на 15...30 % ниже фактической прочности бетона, определенной разрушающим методом – испытанием образцов-аналогов на сжатие. Установлено, что с изменением пластичности бетонной смеси в пределах осадки конуса марок П1...П5 (при прочих равных условиях, за исключением – для марки П5 расход добавки-гиперпластификатора $\sim 1\%$ от массы цемента по сухому веществу) модуль упругости бетона снижается (на 2...3 %) при равенстве прочности образцов на сжатие. Этот эффект очевидно связан с замещением молекулами пластификатора некоторого количества гидратной воды в межплоскостных пространствах структуры кристаллогидратных новообразований и роста ее деформативности.

ABSTRACT

The article reflects the material characteristics and control technology of the compressive strength (destructive and non-destructive methods) concrete strength of 100 ... 150 MPa, for which the authors in the BNTU have developed compositions and studied the basic physical and technical characteristics and the characteristics of the respective instructions of the Ministry of Architecture of Belarus.

The results of experimental studies curing modes, as well as the role and the need for the concrete strength of 100 ... 120 MPa mineral supplements fume (MC), and with an increase in its level in excess of 120 MPa, and further structuring ingredient—a stone flour (CM), as is used hammers (S_{sp} to $\sim 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) granitoid rocks (granite screenings RUPP «Granite»). Data from experiments carried out on standard and original methods, shown, firstly, that the scale factor, which takes into account the test originality of specimens of different sizes «Private» on the strength of concrete, can not be applied to concrete strength $\geq 100 \text{ MPa}$ (in this case, the scale factor is equal to 1,0); secondly, it is shown that the non-destructive testing the strength of high-strength concrete to be performed with necessary pre-building the actual calibration curves, as component strength mounted on authentic samples by various methods differ significantly among themselves and 15 ... 30% lower than the actual strength of the concrete, defined destructive method—testing samples of analog compression.

It was found that a change in the plasticity of the concrete mix within the slump marks P1 ... P5 (other things being equal, with the exception of—for the brand P5 an additive-hyper softener consumption $\sim 1\%$ by weight of cement on a dry basis) of concrete modulus of elasticity decreases (2 ... 3%) with equal compressive strengths of samples. This effect is obviously associated with the replacement of the plasticizer molecules a certain amount of water of hydration in interplanar spaces crystal hydrate structure of tumors and the growth of its deformability.

Ключевые слова: высокопрочный бетон; твердение; прочность; контроль; масштабный фактор; разрушающий, неразрушающий методы.

Keywords: high-strength concrete; hardening; strength; control; the scale factor; destructive, non-destructive methods.

ВВЕДЕНИЕ

Все более широкое применение в мировой строительной практике конструкционного бетона прочностью 100 МПа и более поставило на повестку дня задачу по разработке технологии

получения такого бетона для нужд строительной отрасли Беларуси, с использованием отечественных материалов и технологических возможностей ее производственных предприятий и строительных организаций.

Поставленная задача была решена как с позиций научно-исследовательской и экспериментальной разработки, так и обоснована путем производственной апробации в варианте изготовления сборных железобетонных изделий (завод ЖБМК ОАО «Дорстройиндустрия», г. Фаниполь; ОАО «Завод СЖБ-Борисов», г. Борисов) а также в монолитном строительстве (объекты ОАО «Минскпромстрой», г. Минск; ОАО «Стройтрест № 12», г. Могилев). Важнейшие результаты экспериментального обоснования технологии высокопрочного бетона отражены в материале настоящей статьи. Одновременно следует отметить проблемность расширения внедрения этой технологии по причине малой востребованности в отечественном строительстве бетона такого уровня прочности.

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА, РОЛЬ КОМПОНЕНТОВ И РЕЖИМА ТВЕРДЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Известно [1–5,11], что прочность зоны контакта (переходной зоны) между цементным камнем и заполнителем меньше прочности самого цементного камня. Зона контакта характеризуется большей пористостью, образующейся вследствие большего количества свободной воды около зерен заполнителя, меньшей плотностью «упаковки» частиц цемента и продуктов гидратации у поверхности заполнителей. В этом пространстве скапливается большее количество портландита и формируются крупные кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ориентированные параллельно поверхности заполнителя или арматуры. Кристаллы портландита обладают меньшей прочностью, чем гидратированные силикаты кальция «CSH» разной основности, и, с учетом большей пористости, контактная переходная зона является слабым местом в тяжелом бетоне. Добавка в бетон микрокремнезема приводит к уплотнению структуры контактной переходной зоны за счет реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$: $\text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{kCaO} \cdot \text{nSiO}_2 \cdot$

pH_2O . 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, формируются кристаллогидратные новообразования – продукты взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой. Являясь своеобразной «подложкой», мельчайшие частицы микрокремнезема катализируют процесс формирования кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что отражается в ускоренном росте и уровне прочности бетона.

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.

В соответствии с требованиями СТБ EN197–1–2015 в исследованиях использован микрокремнезем с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании не более 4,0 %; удельная поверхность (по методу БЭТ) $\sim 15,0 \text{ м}^2/\text{г}$ (при использовании приборов типа «ПСХ» $S_{\text{уд}}^{\text{МК}} \sim 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$ или $30\,000 \text{ см}^2/\text{г}$).

В качестве дополнительного структурирующего компонента цементного теста (а в затвердевшем бетоне – цементного камня) в состав высокопрочного бетона вводится каменная мука в виде тонкоизмельченного порошкообразного материала из прочных горных пород. В частности, молотого базальта, исходная прочность которого достигает 500 МПа.

Роль данного компонента в высокопрочном бетоне неоднозначна. С одной стороны, он инертен и не вступает в реакции химического взаимодействия с продуктами гидратации клинкерных минералов, а с другой – обеспечивает повышение качественных характеристик бетона. В частности, тонкодисперсные зерна микронаполнителя являются физической подложкой для

формирования кристаллогидратных новообразований – продуктов взаимодействия цемента с водой, по аналогии с таковыми частями 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. Удерживаемая 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 [9]. 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 РУПП «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: $K_{\text{нт}} \sim 0,22...0,24$.

Влияние тонкодисперсных добавок (активной – микрокремнезем и инертной – каменная мука) на кинетику изменений прочности бетона во времени отражают данные таблицы 1.

Очевидно, 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 целесообразно для бетонов прочностью более 120 МПа.

Таблица 1

**Влияние количества микрокремнезема и каменной муки
на прочность бетона нормально-влажностного твердения
(при прочих равных условиях)**

Режим тверде- ния бетона*	Расход тонкодисперс- ных компонентов		Прочность бетона (МПа,%) в возрасте, сут.			
	% от МЦ	по массе, кг	1		28	
			МПа	%	МПа	%
№ 1 (НВУ)	0	0	22	25	88	100
	10+10	50+50	26	29	94	107
	15+15	75+75	32	36	108	123
№ 1 (НВУ)	30+30	150+150	34	38	115	130
№ 2 (t ≤ 500С)	0	0	44	50	83	94
	5+15	75+75	52	59	99	112
	30+30	150+150	59	67	106	120

*смотри далее

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

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

бетона) иллюстрируют данные таблицы 2 и графические зависимости рисунка 1.

Таблица 2

Влияние количества химдобавки на прочность бетона

Режим твердения бетона*	Расход раствора добавки, % от МЦ	Консистен- ция бетонной смеси, ОК, см	Прочность бетона (МПа, %) в возрасте, сут.			
			1		28 (НВТ)	
			МПа	%	МПа	%
№ 1 (НВУ)	1	5...81	32	30	108	100
	2	6...82	29	27	110	102
	3	> 21	22	20	99	92
		6...83	28	26	105	97
№ 2 ($t \leq 500^{\circ}\text{C}$)	1	5...81	38	35	99	92
	2	6...82	34	31	104	96
	3	> 21	27	25	96	89
		6...83	34	31	101	94

Примечание: 1, 2 и 3 – снижение водосодержания на 15%, 22% и 28% соответственно, при сохранении «равноподвижности» смеси.

*смотри далее

Влияние режима твердения на прочность бетона. Экспериментально оценивалось влияние на кинетику твердения и уровень прочности бетона следующих режимов этого процесса.

Режим 1 – Естественное твердение образцов при стандартизированных нормально-влажностных условиях в камере нормально-влажностного твердения (НВУ; температура $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ и относительная 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 $40...50^{\circ}\text{C}$ в течение 2,5...3,0 ч, затем обогрев отключался, и образцы остывали в емкости термостата до утра ($\sim 12...14$ 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°C 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.

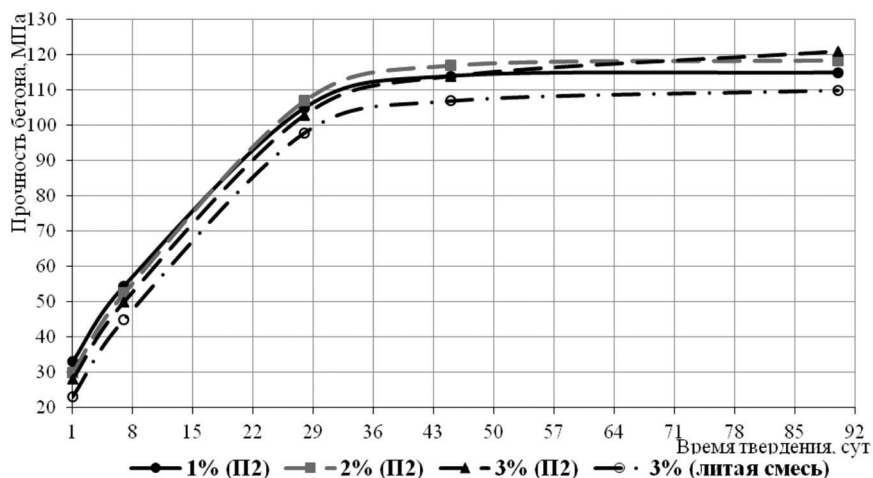


Рисунок 1. Тенденция изменения прочности высокопрочного бетона в зависимости от количества добавки пластификатора (твердение в НВТ)

Режим 4 – Твердение образцов в условиях гидроизоляции (под пленкой) в сушильном шкафу при температуре 40°C 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).

Из результатов экспериментов, приведенных в таблице 3, можно сделать следующие выводы. 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 в проектном возрасте.

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	$t \sim 20 \pm 3^\circ\text{C}$; $\phi > 90\%$	32	30	60	55	90	83	108	100
№ 2	$t_{\text{н}} \leq 50^\circ\text{C}$	44	41	65	–	88	–	99	92
№ 3	$t_{\text{н}} \leq 85^\circ\text{C}$	79	73	82	–	84	–	94	87
№ 4	$t_{\text{тв}} \sim 40^\circ\text{C}$, гидроизоляция	52	48	74	–	8	–	103	95

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%. 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 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)

Масштабный коэффициент перехода к базовому размеру (150 мм). Для оценки влияния типоразмеров образцов (влияние которых по ГОСТ 10180 для «рядового» бетона учитывается поправочными масштабными коэффициентами) на показатель прочности высокопрочного бетона (таблица 4) были изготовлены серии образцов-кубов с ребром: 70; 100 и 150 мм, на основе состава, характеризующегося номинальной прочностью 100...110 МПа при расходе цемента ПЦ 500-Д0 (ОАО «БЦЗ»), соответствовавшим ~ 500 кг на 1 м³ бетона, из смеси марки ПЗ (то есть средней по диапазону консистенций) по подвижности. Бетон уплотняли кратковременным вибрированием со стандартными параметрами: $A \sim 0,5$ мм; $f \sim 50$ Гц. Для исключения влияния изменений влажности среды серии образцов (3 серии каждого типа размера по 6 шт. в серии) после распалубки (через 24 ч) твердели в воде ($t \sim 15$ °C).

Испытания образцов в проектном возрасте (28 сут.) осуществили на прессах соответствующей мощности (исходя из предполагаемой прочности и в зависимости от площади сечения образцов и разрушающей нагрузки). Проведение испытаний соответствовало положениям ГОСТ 10180; обработка результатов несколько отличалась (среднее в серии рассчитано по всем 6 образцам, т.к. их величины были близкими). Полученные данные о прочности бетона на сжатие, приведенные в таблице 4, подтверждают данные других исследователей [6–8,10], полученные 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». Это делает возможным испытывать образцы меньше базового (150 мм) размера, т.к. для испытания последних требуются прессы с усилием до 5000 кН, которыми оснащены далеко не все испытательные лаборатории предприятий (организаций) отрасли.

Таблица 4

**Показатель прочности бетона в зависимости
от типоразмеров образцов**

Типоразмер образцов, мм	Номер серии из 6 образцов	Наибольшее усилие (диапазон) прессы, кН	Разрушающая нагрузка, среднее в серии), кН	Прочность бетона, МПа	Относительная прочность бетона, %	Коэффициент перехода, α , доли ед.
70×70×70	1	1250	522	104*	–	
	2		506	101	–	
	3		514	104	–	
	среднее	–	–	103	101	1,0
100×100×100	1	1250	1001	100	–	
	2		506	103	–	
	3		514	103	–	
	среднее	–	–	102	100	1,0
150×150×150	1	5000	2228	99	–	
	2		2363	105	–	1,0
	3		2295	102		
	среднее	–		102	100	1,0

*Среднее значение по 6 образцам

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 (характеризовавшихся практически равной средней плотностью (состоянием структуры), одинаковыми условиями формования и твердения), составляли не более 2,5%. В процессе испытаний 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.

Это делает возможным оценку прочности высокопрочного бетона на сжатие, например, на образцах-кубах с ребром 70 и 100 мм без понижающего масштабного коэффициента, а также осуществление испытаний на прессах с усилием 1250 кН, которыми в основном оснащены лаборатории строительной отрасли Беларуси.

ОСОБЕННОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА (МЕТОДЫ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА (ТИП ПРИБОРА «ОНИКС») И ОТРЫВА СО СКАЛЫВАНИЕМ)

Для построения экспериментальных градуировочных зависимостей в диапазоне 50...130 МПа под указанные методы оценки прочности бетона были заформованы: опытный образец-блок ($l \times b \times h = 1200 \times 600 \times 600$, мм) для контроля прочности методом отрыва со скалыванием; блоки стен подвала (3 шт.); плита ж/б дорожного настила (1 шт.); образцы-кубы для контроля прочности разрушающим и неразрушающими методами с целью построения градуировочных зависимостей, представленных на рисунке 2.

Формование бетона изделий осуществляли с кратковременным вибрированием на виброплощадке полигона завода СЖБК ОАО «Минспромстрой»; формование образцов-кубов – штыкованием, при последующем кратковременном вибрировании после укладки ($OK_{\text{факт.}} \sim 22...23$ см).

Условия твердения бетона:

- опытный образец-блок и контрольные образцы-кубы (100x100x100 мм) твердели под полиэтиленовой пленкой на полигоне завода (площадке формования) в естественных погодных условиях периода с 20.07.2015 г. по 23.09.2015 г.;
- образцы-кубы типоразмеров: 150, 100 и 70 мм, для оценки масштабного коэффициента, после распалубки (всех образцов бетона через 22–23 ч после формования и твердения под пленкой) – в нормально-влажностных условиях (по ГОСТ 18105–2010; ГОСТ 10180–2012; СТБ 2264–2012; ГОСТ 31914–2012).

Температурный режим твердения бетона в естественных условиях (полигона завода) характеризовался перепадами «ночной-дневной» температур в ориентировочном диапазоне от 8...10 °С

(ночью) до 23 °С (днем) первые две недели (14 сут.) и до 15–30 °С в период с 5 по 13.08.2015 г., далее – 12...24 °С до 17.08.2015 г. (28 суточного возраста бетона). В более поздние сроки температура воздуха соответствовала от 10 °С до 20 °С (ночь-день) в среднем.

Состав бетона расчетной прочностью $f_{cm,28} \sim 105...110$ МПа для построения градуировочных зависимостей приведен в таблице 5.

Необходимо отметить, что расход цемента в экспериментальном составе бетона завышен (относительно 480...500 кг на 1 м³ бетона) по причине использования щебня худшего качества, чем рекомендуемый (кубовидный или традиционный 1-й группы) и песка (сеяный вместо рекомендуемого мытого), которыми на момент проведения экспериментов располагало предприятие.

Результаты испытаний методом разрушающего контроля по ГОСТ 18105–2010 и ГОСТ 10180–2012, испытанием контрольных образцов и неразрушающего контроля по СТБ 2264–2012 и ГОСТ 18105–2010 методами ударного импульса и отрыва со скалыванием, приведенные в виде градуировочных зависимостей на рис. 2, показывают, 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 на прессе. По достижении бетоном прочности по образцам ≥ 100 МПа отставание в среднем составило до 20 % (а в отдельных образцах – до 25...30 %).

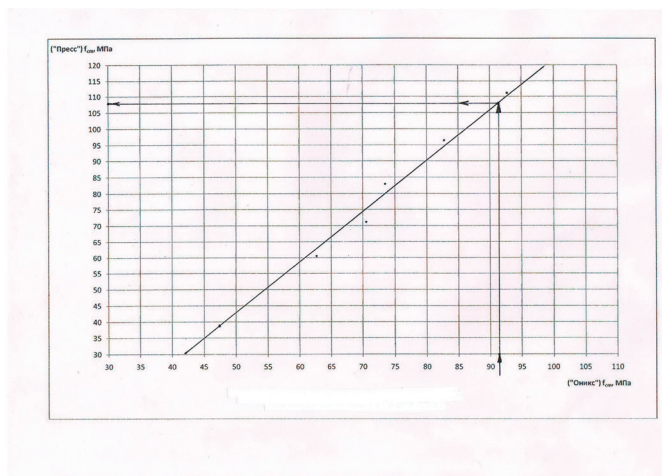
Таблица 5

Состав бетона	Расход составляющих в кг на 1 м ³ бетонной смеси:						(В/Ц) б, доли ед.	ОК, см	ρ_{cm} кг/ м ³
	Цемент	Песок	Щебень	Микро- кремнезем	Вода (всего)	Добавка, кг, (%)			
Номинальный: На щебне фр.5...20 мм	550	650	1120 фр. 5–20 мм	55	145	11 (0,6% с. в.)	0,24	16– 20	2530
Фактический:	560	670	1120	55	157	11	0,26	22	2570*

* Свежеотформованной бетонной смеси по мерному цилиндру ($V = 1$ л)

Оценка прочности методом отрыва со скалыванием отражает эту же тенденцию, составив к 100 МПа несколько меньшую разницу $\sim 10\ldots 15\%$, увеличивающуюся с дальнейшим ростом фактической прочности бетона, определенной сжатием на прессе.

а)



б)

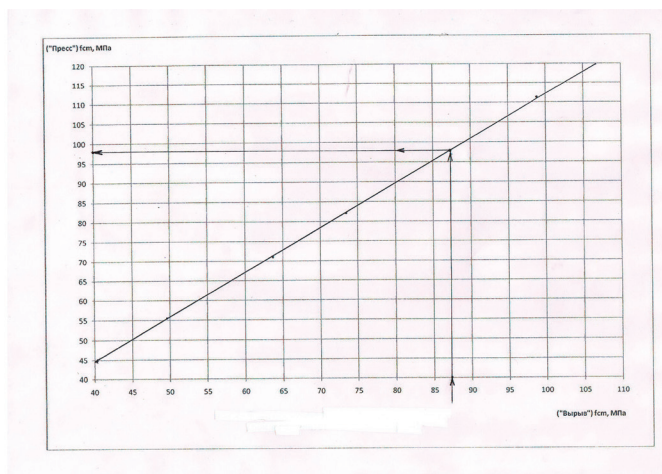


Рисунок 2. а) Градуировочная зависимость (пресс-оникс)
 (при твердении бетона 1 и более суток);
 б) Градуировочная зависимость (пресс-вырыв)
 (при твердении бетона 3 и более суток)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение бетона прочностью в проектном (28 сут.) возрасте $f_{\text{см.28}} \geq 100$ МПа обеспечивается имеющимися на рынке Беларуси компонентами отечественного производства и производства Российской Федерации (в частности, микрокремнеземом).

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.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Detwiler, Rachel J. Texture of calcium hydroxide near the cement paste-aggregate interface / Rachel J. Detwiler [et al.] // Cem. And Concr. Res.– 1988.– № 5.– P. 823–829.
2. Garboczi, Edward J. Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete / Edward J. Garboczi, Dale P. Bentz // J. Mater. Res.– 1991.– № 11.– P. 196–201.
3. Scrivener, Karen L. A Study of the interfacial region between cement paste and aggregate in concrete/ Karen L. Scrivener, Alison K. Crumby, P. L. Pratt // Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Pittsburgh, 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/ Jia Wang // J. Chin. Silic. Soc.– 1987.– № 2.– P. 114–121.
5. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов.– М.: Стройиздат, 1981.– 464 с.

6. Батяновский, Э.И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей: дис. докт. технич. наук: 05.23.05; 05.23.08 / Э.И. Батяновский.–Минск, 2002.– 351 с.
7. Веретенников, В. И. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии / В.И. Веретенников, А.А. Бормотин // Бетон и железобетон.– 2000.– № 5.–С. 27–30.
8. Свиридов, Н.В. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементях / Н.В. Свиридов, М.Г. Коваленко // Бетон и железобетон.– 1990.– № 2.–С. 21–22.
9. Тейлор, Х. Химия цемента (пер.с англ.) / Х. Тейлор.–М.: Мир,1986.–С. 294–345.
10. Цискарели, Г. Д. О масштабном эффекте в бетонах / Г.Д. Цискарели, Г.Л. Лекишвили // Бетон и железобетон.– 1966.– № 10.–С. 29–31.
11. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементного бетона / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер.–М.: Стройиздат, 1979.– 344 с.

REFERENCES

1. Detwiler R.J. [at al.]. (1988). Texture of calcium hydroxide near the cement paste-aggregate interface. *Cem. And Concr. Res.* 1988. No. 5. pp. 823–829.
2. Garboczi E. J., Bentz D. P. (1991). Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete. *J. Mater. Res.* 1991. No. 11. pp. 196–201.
3. Scrivener K. L., Crumbie A. K., Pratt P. L. (1988). A Study of the interfacial region between cement paste and aggregate in concrete. *Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Pittsburgh, Dec. 2–4, 1987. Pittsburgh (Pa).* 1988. pp.87–88.
4. Wang J. (1987). Investigation of structure and properties of the interfacial zone between lime aggregate and cement paste. *J. Chin. Silic. Soc.* 1987. No. 2. pp. 114–121.

5. Akhverdov I. N. *Osnovy fiziki betona* [Fundamentals of physics of concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 464 p. (rus)
6. Batyanovskiy E. I. *Osnovy tekhnologii izgotovleniya betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy i konstruksiy s primeneniem sukhikh betonnykh smesey* [Fundamentals of manufacturing techniques of concrete and concrete goods and designs with use of dry concrete mixes]: dis.dokt.tekhnits. nauk:05.23.05; 05.23.08 / E. I. Batyanovskiy. Minsk, 2002. 351 p. (rus)
7. Veretennikov V. I. *Beton i zhelezobeton*. 2000. No.5. pp. 27–30. (rus)
8. Sviridov N. V., Kovalenko M. G. *Beton i zhelezobeton*. 1990. No.2. pp. 21–22. (rus)
9. Teylor Kh. *Khimiya tsementa* [Cement chemistry]. Moscow: Mir, 1986. pp. 294–345. (rus)
10. Tsiskareli G. D., Lekishvili G. L. *Beton i zhelezobeton*. 1966. No. 10. pp. 29–31. (rus)
11. Sheykin, A. E., Chekhovskiy Yu. V., Brusser M. I. *Struktura i svoystva tsementnogo betona* [Structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 344 p. (rus)

Статья поступила в редколлегию 22.11.2016.