

Алексей Владимирович СМОЛЯКОВ,
 младший научный сотрудник НИИЛ
 бетонов и строительных материалов
 Белорусского национального
 технического университета

Павел Леонидович ФЕДОРОВИЧ,
 инженер НИИЛ
 бетонов и строительных материалов
 Белорусского национального
 технического университета

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ,
 доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедрой
 "Технология бетона
 и строительные материалы"
 Белорусского национального
 технического университета

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАНИТНОГО ОТСЕВА В БЕТОНАХ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PRINCIPLES
 OF THE TECHNOLOGY FOR TOTAL USE
 OF GRANITE SCREENINGS IN CONCRETE

В статье приведены данные результатов исследований применения переработанного гранитного отсева в качестве минеральной добавки в бетон (цемент) и в качестве укрупняющей фракции мелкого заполнителя с целью улучшения его гранулометрического состава. Показана возможность и эффективность полного использования отсева РУПП "Гранит" Брестской области.

This article presents the study results on using processed granite screenings as a mineral additive to concrete (cement) and as the larger particles of fine aggregate in order to improve its grading. The possibility and efficiency of total use of screenings obtained at RUPP "Granit", Brest region, has been shown.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований, выполненных в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ), показали возможность 100 %-ного использования отходов камнедробления, образующихся на РУПП "Гранит" Брестской области Беларуси при производстве крупного заполнителя для бетона. Известно, что прямое применение гранитного отсева в бетонных растворах практически невозможно, так как сопровождается резким ухудшением физико-механических и эксплуатационных свойств этих материалов. Данное явление связано с повышенным содержанием в отсеве тонкодисперсных фракций (менее 0,16 мм), достигающим более 40 % от его веса, массовым наличием микротрещин и их повышенной удельной поверхностью, явно выраженной лещадностью зерен этих фракций. В совокупности названные факторы обуславливают невозможность прямого эффективного использования гранитного отсева в цементных бетонах и растворах.

Вместе с тем, после переработки гранитного отсева [1–5], в частности отсева его на две фракции по размеру зерна ~0,5 мм и помола мелкой фракции, получают качественные продукты в виде минеральной добавки в бетон или в цемент (при совместном помоле с клинкером) и отсеянных крупных фракций (~0,5–5,0 мм). Последние можно использовать для обогащения природных мелкозернистых песков и тем самым решить проблему, характерную для многих регионов Беларуси (особенно ее юго-восточных областей), заключающуюся в отсутствии местного качественного мелкого заполнителя для бетона. Улучшение гранулометрии мелкого песка за счет введения крупных фракций гранитного отсева обеспечивает рост плотности и прочности бетона, а на этой основе — повышение его физико-технических характеристик и снижение на 5 %–15 % расхода цемента.

В статье частично приведены результаты исследований закономерностей влияния минеральной добавки в цемент в виде молотого гранитного отсева на свойства бе-

тона и данные о возможности обогащения мелкозернистого природного песка его крупными фракциями.

ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА НА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ С МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ

Общая методика исследований

В процессе исследований было выявлено влияние количественного содержания минеральной добавки (продукта помола гранитного отсева) в портландцементе на физико-технические свойства бетона: среднюю плотность, кинетику роста прочности в различных условиях твердения (стандартных нормально-влажностных, пропаривание), значения прочности бетона классов С12/15–С32/40 в проектном возрасте (диапазон прочности бетона 20–52 МПа, практически используемый для общестроительного производства). Кроме того, были определены базовые составы бетона, соответствующие применяемому на внедрявших разработку предприятиях (ОАО "Завод СЖБ", г. Борисов; ОАО "Завод СЖБ № 1", г. Минск; ОАО "Завод СЖБ", г. Барановичи).

Во всех случаях применялись заполнители стандартного качества и портландцемент с минеральной добавкой, измельченный до тонкости помола $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ($300 \text{ м}^2/\text{кг}$) по прибору типа ПСХ-4. Эта тонина помола цемента принята как базовая для вяжущих промышленного изготовления. Кроме того, она наиболее рациональна для добавки гранитного отсева, как обеспечивающая положительный эффект роста прочности цементного камня при дозировке ее до 20 %–30 % от массы цемента [2, 3].

Совместный помол портландцементного клинкера (производства ПРУП "Кричевцементношифер"), гипсового камня и гранитного отсева осуществляли в лабораторной шаровой мельнице с различной дозировкой гранитного отсева (0 %; 10 %; 20 % и 30 % от массы клинкера). На полученных цементах изготавливали образцы бетона стандартизированного (ГОСТ 30459 [6]) состава при прочих равных условиях для оценки влияния количества

добавки на его прочность. По завершении этих экспериментов остальные исследования осуществили на полученных помолот ПЦ-Д0 и ПЦ-Д20 (активностью, соответствовавшей М500) и, для сравнения, на цементе заводского производства (ПРУП "Кричевцементношифер") марки ПЦ-М500-Д0 (составы бетона приведены далее).

В разделе статьи о прочности бетона, приготовленного на мелкозернистом (тонком) песке и после его обогащения крупными (более 0,63 мм) фракциями гранитного отсева, данные получены на указанном далее стандартизированном составе бетона. Во всех случаях эксперименты выполнялись с использованием образцов бетона в виде кубов с ребром 100 мм (с учетом поправочного масштабного коэффициента $\alpha = 0,95$). Бетон уплотняли на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрирования: амплитуда $A \sim 0,5$ мм, частота колебаний $f \sim 50$ Гц. Методики выполнения отдельных экспериментов приведены в соответствующих разделах статьи.

Прочность бетона стандартизированного состава на вяжущем с различным содержанием минеральной добавки (отсева)

На начальном этапе исследований прочностных свойств тяжелого конструкционного бетона различных составов и классов (далее — бетона), приготовленного на портландцементе, содержащем минеральную добавку в виде молотого (совместно с клинкером и гипсом) гранитного отсева, было выявлено влияние количества миндобавки на прочность бетона стандартизированного (ГОСТ 30459 [6]) состава при прочих равных условиях. Целью этих исследований являлось определение оптимума и возможного допустимого количества вводимой миндобавки с позиций изменения (снижения) прочности бетона.

Стандартизированный состав бетона характеризовался содержанием (расходами) материалов: цемента (Ц ~ 350 кг); гранитного щебня фракций 5–20 мм (Щ ~ 1150 кг); природного песка (П ~ 700 кг); воды (В ~ 175 кг) при исходном водоцементном отношении В/Ц $\sim 0,5$. Следует отметить, что наличие минеральной добавки в виде молотого гранитного отсева в количестве более 15 % от массы цемента способствовало незначительному, но определенному по прибору Вика снижению показателя нормальной густоты [1] вяжущего. Это связано с тем, что молотый гранитный отсев ($S_{уд} \sim 3000$ см²/г) характеризуется нормальной густотой 18 %–20 %, что ниже данного показателя для клинкерного портландцемента. С учетом этого обстоятельства,

прочность бетона определялась как при постоянном общем водоцементном отношении (В/Ц = 0,5), так и для варианта со снижением начального водосодержания (водоцементного отношения) бетона при сохранении равноподвижности бетонной смеси. Оценку подвижности (осадки конуса) бетонной смеси осуществляли по СТБ 1545 [7].

Методика проведения экспериментов включала приготовление бетонных смесей, определение осадки конуса, изготовление образцов-кубов с ребром 100 мм, твердение бетона в двух вариантах: при нормально-влажностных условиях (температура $t \sim (20 \pm 3)$ °С, относительная влажность $\phi \geq 90$ %) и при пропаривании по режиму: предварительная выдержка — 2 ч; подъем температуры до (80–85) °С — 3 ч; изотермическая выдержка — 6 ч; остывание образцов в камере — 4 ч; остывание образцов после распалубки — 4 ч. Испытания пропаренных образцов бетона проводили не позже 24 ч от момента их изготовления в соответствии с ГОСТ 10180 [8] и ГОСТ 18105 [9]. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице 1. Каждое значение прочности бетона — это среднее (едиичное) значение серии из шести образцов. Внутрисерийный коэффициент вариации его величины составил $V_m \sim (6-8)$ % при допускаемой его величине $V_m \leq 13,5$ %, принимаемой для тяжелого бетона по ГОСТ 18105 [9].

Анализ данных таблицы 1 свидетельствует о следующем. Введение в цемент минеральной добавки в виде молотого гранитного отсева в количестве до 20 % от массы клинкерной (с соответствующей ее свойствам дозировкой гипсового камня) части портландцемента допустимо (применительно к "усредненному" стандартизированному составу бетона) с позиций обеспечения его прочности. Этот вывод подтверждается практической сопоставимостью результатов, относящихся к образцам бетона из равноподвижных бетонных смесей (см. таблицу 1, № 1 и № 5), и снижением в пределах 5 % прочности бетона проектного возраста на ПЦ-Д20 без корректировки воды затворения (№ 4). В последнем случае подвижность смеси составляла ОК $\sim (5-6)$ см, то есть перешла в марку П2 из марки П1 (ОК $\sim (2-3)$ см) для исходного состава № 1, приготовленного на чисто-клинкерном цементе.

Увеличение дозировки миндобавки сверх 20 % от массы цемента (МЦ) очевидно приводит к снижению проектной прочности бетона, при прочих равных условиях. Этот отрицательный эффект связан, по мнению авторов, со следующими факторами. Во-первых, введение сверх оптимального количества инертного по своей

Таблица 1. Прочность на сжатие бетона стандартизированного состава

№ пп	Характеристика вяжущего			Характеристика бетонной смеси				Прочность бетона на сжатие			
	Количество клинкерной составляющей на 1 м ³ бетона, кг	Количество миндобавки в цементе		Расход воды на 1 м ³ бетона, л (кг)	Осадка конуса (ОК), см	Водоцементное отношение бетона		После пропаривания		Нормально-влажностное твердение 28 сут	
		кг	%			Общее	К клинкерной составляющей	МПа	%	МПа	%
1	350	—	—	175	2–3	0,5	0,5	32	74	43	100
2	315	35	10	175	3–4	0,5	0,56	34	77	44	102
3	315	35	10	170	2–3	0,49	0,54	38	81	47	109
4	280	70	20	175	5	0,5	0,62	31	75	41	95
5	280	70	20	167	2–3	0,48	0,6	33	76	43	100
6	255	105	30	175	5–6	0,5	0,71	27	76	36	84
7	255	105	30	163	2–3	0,47	0,64	30	75	40	93

сути минерального наполнителя способствует снижению активности вяжущего.

Во-вторых, в большей мере проявляется эффект понижения качества сцепления цементного камня, содержащего чрезмерное количество инертного вещества, с заполнителями в бетоне [2]. Известно [10–13], что качественные характеристики цементного камня (плотность, пористость, проницаемость) в зоне контакта с заполнителями из плотных горных пород значительно уступают таковым в его объеме. Замена активных, формирующих во взаимодействии с водой новообразования, частиц вяжущего на инертные частицы гранитоида в этих объемах цементного камня не может не сказаться на качестве сцепления в системе "заполнитель — цементный камень".

В-третьих, возрастает величина истинного (по отношению к клинкерной части цемента) водоцементного отношения бетона, то есть растет его пористость, что в совокупности приводит к превышению воздействия отрицательных факторов над положительно действующими на цементный камень и обеспечивающими рост его прочности. В результате при дозировке добавки более 20 % от МЦ прочность бетона существенно снижается.

Вместе с тем, следует отметить рост прочности образцов бетона (как нормально-влажностного твердения, так и пропаренных) в проектном возрасте (28 сут) при дозировке миндобавки 10 %–15 % от МЦ, а во-вторых, небольшое увеличение относительной прочности пропаренного бетона. Последнее, по мнению авторов, связано с общеизвестной тенденцией большей эффективности цементов с миндобавками при твердении в среде с повышенной температурой.

Дальнейшие исследования прочности бетона были осуществлены с учетом реализации производственной апробации цемента с миндобавкой из молотого гранитного отсева на внедряющих предприятиях.

Кинетика твердения бетона на цементе с минеральной добавкой

В процессе исследований отслеживали кинетику твердения, то есть изменение прочности бетона во времени при твердении образцов в стандартных нормально-влажностных условиях и после пропаривания: непосредственно по окончании тепловой обработки, остывания (4 ч) образцов и после дозревания бетона в камере

нормально-влажностного твердения до стандартного возраста (28 сут).

Целью исследований было определение влияния минеральной добавки в составе цемента на темп роста прочности бетона различных составов, консистенции смеси и уровня проектной прочности. Во всех приведенных в разделе экспериментальных данных результаты получены на практически одновременно подготовленных вяжущих: чистоклинкерном цементе и цементе, содержащем 10 %–20 % минеральной добавки.

Для получения подвижных бетонных смесей с осадкой конуса $OK \geq 10$ см (марок ПЗ и П5) в бетон вводили химическую добавку-суперпластификатор "Стахемент-Ф Ж35" (Ст.-Ф Ж35; жидкость 35 %-ной концентрации), характеризующуюся кроме пластифицирующего эффекта наличием ускоряющего компонента. Его присутствие частично компенсирует замедление темпа роста прочности бетона пластифицирующими (органические поверхностно-активные вещества (ПАВ)) компонентами в нормально-влажностных условиях твердения. Характеристики составов бетона приведены в таблице 2.

Твердение бетона при стандартных нормально-влажностных условиях

В таблице 3 представлены результаты экспериментов определения прочности бетона на сжатие в возрасте 1, 3, 7 и 28 сут. Приведенные результаты — данные единичных испытаний серий образцов бетона в количестве 3–6 шт. с обработкой по ГОСТ 10180 [8]. Расчетный внутрисерийный коэффициент вариации прочности $V_m \sim (7–8) \%$, для оценки результатов был применен $V_m = 13,5 \%$. Данные таблицы 3 практически подтверждают выводы, сделанные на основе экспериментов с образцами бетона стандартизированного состава (см. ранее изложенное).

Основным результатом этих экспериментов является подтверждение возможности введения до 20 % молотого гранитного отсева в цемент без существенного снижения прочности бетона классов С12/15–С32/40 (прочностью на сжатие $f_c \sim (20–50)$ МПа).

Практически во всех случаях (при использовании жестких и пластичных бетонных смесей марок П1; ПЗ и П5) образцы бетона, приготовленного на цементе с содержанием до 20 % добавки, обеспечили требуемую

Таблица 2. Характеристики составов бетона

№ пп	Класс бетона	Марка цемента	Расход материала на 1 м ³ бетона, кг				Добавка СП, в % от МЦ по сухому веществу	(В/Ц) ₀	Формуемость бетонной смеси	
			Цемент	Щебень	Песок	Вода			Ж, с	ОК, см
А. Жесткие смеси										
1	С12/15	М400	275	1100	970	105	—	0,38	5–10	—
2	С12/15	М500	250	1100	1000	105	—	0,42	5–10	—
3	С20/25	М400	395	1100	840	160	—	0,40	5–10	—
4	С20/25	М500	350	1100	880	145	—	0,41	5–10	—
5	С32/40	М500	510	1160	620	150	0,6	0,30	5–10	—
Б. Пластичные смеси										
6	С12/15	М400	300	950	1130	142	—	0,50	—	1–4
7	С12/15	М500	300	950	1180	128	—	0,51	—	1–4
8	С20/25	М400	375	1150	750	160	0,6	0,45	—	10–15
9	С20/25	М500	350	1150	800	146	0,6	0,45	—	10–15
10	С32/40	М500	550	1000	600	247	0,8	0,45	—	21–24

Таблица 3. Кинетика роста прочности бетона в нормально-влажностных условиях

№ пп	Номер состава бетона по таблице 2	Класс бетона	Расход цемента на 1 м ³ , кг	Содержание миндобавки в цементе, %	Прочность бетона в МПа и % от проектной в возрасте, сут							
					1		3		7		28	
					МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%
А. Жесткие смеси												
1	2	C12/15	250	—	6,7	31,3	14,0	65,0	17,8	83,0	21,5	
2	2	C12/15	250	10	7,0	31,9	14,6	66,6	18,7	85,1	22,0	
3	2	C12/15	250	20	6,3	30,6	13,6	66,3	17,2	84,0	20,5	
4	4	C20/25	350	—	11,0	33,3	21,4	64,4	26,6	80,0	33,2	
5	4	C20/25	350	10	11,7	35,0	21,8	65,1	27,8	83,1	33,5	
6	4	C20/25	350	20	10,9	34,3	20,7	65,0	25,6	80,3	31,9	
7	5	C32/40	510	—	16,4	30,8	36,1	67,7	45,9	86,1	53,3	
8	5	C32/40	510	10	17,0	31,5	37,3	69,0	47,0	87,0	54,0	
9	5	C32/40	510	20	15,9	30,0	36,2	68,5	45,0	85,0	52,9	
Б. Пластичные смеси												
10	7	C12/15	300	—	5,1	24,6	12,7	61,0	15,6	75,1	20,8	
11	7	C12/15	300	10	6,2	27,0	14,7	63,9	17,5	76,0	23,0	
12	7	C12/15	300	20	4,9	24,5	12,5	62,5	15,0	75,0	20,0	
13	9	C20/25	385	—	8,6	25,7	21,2	63,2	26,0	77,5	33,6	
14	9	C20/25	385	10	8,7	25,9	21,4	64,0	25,8	77,0	33,5	
15	9	C20/25	385	20	7,8	23,7	20,3	62,0	25,1	75,0	32,8	
16	10	C32/40	550	—	13,2	25,2	33,6	64,0	41,4	78,9	52,5	
17	10	C32/40	550	10	13,9	26,4	34,6	65,5	42,5	82,5	52,8	
18	10	C32/40	550	20	12,4	24,0	33,5	65,0	39,6	77,0	51,5	

прочность, соответствующую заявленному классу при коэффициенте ее вариации $V_m = 13,5\%$. В случае использования расчетного внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона $V_m \sim 8\%$, уровень требуемой прочности бетона несколько превышает ее минимально необходимые значения.

Следует отметить примерно равный темп роста прочности бетона на цементе с минеральной добавкой в дозировке до 20 % от массы цемента в сравнении с образцами бетона на цементе без добавки (в пределах исследованного отрезка времени). Проявляющаяся тенденция понижения этого параметра с введением 20 % добавки в 1–3 сут нормально-влажностного твердения к проектному возрасту (28 сут) сохраняется, но не превышает 2 %–4 %.

Прочность бетона при пропаривании

Оценку изменений прочности образцов бетона в зависимости от наличия и количества в цементе минеральной добавки в виде молотого гранитного отсева осуществляли после их пропаривания в лабораторной (ямной) камере, а также после последующей выдержки серий образцов до проектного 28-суточного возраста в камере нормально-влажностного твердения.

Целью исследований являлось не только выявление закономерностей влияния вещества миндобавки на темп роста прочности бетона в условиях прогрева $t \sim (80–85)^\circ\text{C}$, но и возможное ее влияние на изменения прочности бетона в дальнейшем (при благоприятных условиях твердения). Полученные экспериментальные данные на образцах пропаренного бетона (таблица 4, рис. 1) практически подтверждают результаты исследований, изложенные в предыдущем разделе, и согласуются с экспериментальными данными, относящимися к прочности образцов бетона нормально-влажностного твердения аналогичных составов и классов.

Результаты экспериментов приведены для образцов после 3–4-часового остывания; прочность горячих образцов была ниже в среднем на $\sim(5–7)\%$.

Важнейшим выводом является подтверждение возможности введения в цемент 20 % добавки молотого гранитного отсева без снижения проектной прочности пропаренного бетона и без снижения прочности непосредственно после пропаривания, что важно для производства сборных (особенно преднапряженных) железобетонных изделий и конструкций. Следует отметить несколько более высокий уровень относительной прочности образцов пропаренного бетона из жестких бетонных смесей сразу после прогрева (75 %–82 %) в сравнении с бетоном из пластичных смесей (72 %–79 %), несмотря на то, что составы № 14–№ 18 получены с применением добавки СП и при небольшом снижении исходного водоцементного отношения бетона (подбиралось по заявленной осадке конуса).

Кроме этого, сравнение данных таблиц 3 и 4 показывает, что пропаренный бетон (при прочих равных условиях) незначительно, но не добирает (примерно до 3 %–5 %) прочности к проектному возрасту в сопоставлении с данными для образцов нормально-влажностного твердения. Фактически эти результаты подтверждают известное в технологии бетона явление, и здесь нет зависимости, связанной с наличием или отсутствием в цементе минеральной добавки.

ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА НА ОБОГАЩЕННОМ МЕЛКОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

Значение рациональной гранулометрии заполнителей в обеспечении физико-технических свойств бетона общеизвестно [14–16]. Вместе с тем, строительной отрасли Беларуси вынужденно и массово применяются мелкие и тонкие пески, характеризующиеся модулем крупности M_k менее 1,5 и даже менее 1,0. Эффективность

Таблица 4. Прочность бетона пропаренных образцов

№ пп	Номер состава бетона по таблице 2	Класс бетона	Расход цемента на 1 м ³ , кг	Наличие и содержание миндобавки в цементе, %	Прочность бетона:		
					После пропаривания		После 28 сут дозревания
					МПа	% от 28 сут	
А. Жесткие смеси							
1	2	C12/15	250	—	15,6	75,5	20,7
2	2	C12/15	250	10	16,2	77,0	21,1
3	2	C12/15	250	20	15,1	76,0	19,9
4	4	C20/25	350	—	25,3	79,4	31,9
5	4	C20/25	350	10	25,6	80,0	32,0
6	4	C20/25	350	20	25,1	81,0	31,0
7	5	C32/40	510	—	40,8	78,8	51,8
8	5	C32/40	510	10	43,5	82,0	53,0
9	5	C32/40	510	20	40,9	80,0	51,1
Б. Пластичные смеси							
10	7	C12/15	300	—	14,4	71,9	20,0
11	7	C12/15	300	10	14,6	73,0	20,0
12	7	C12/15	300	20	14,1	72,0	19,6
13	9	C20/25	350	—	24,0	73,5	32,6
14	9	C20/25	350	10	24,3	74,0	32,9
15	9	C20/25	350	20	23,3	74,0	31,5
16	10	C32/40	550	—	39,5	76,0	52,0
17	10	C32/40	550	10	41,4	77,7	53,3
18	10	C32/40	550	20	40,2	79,0	50,9

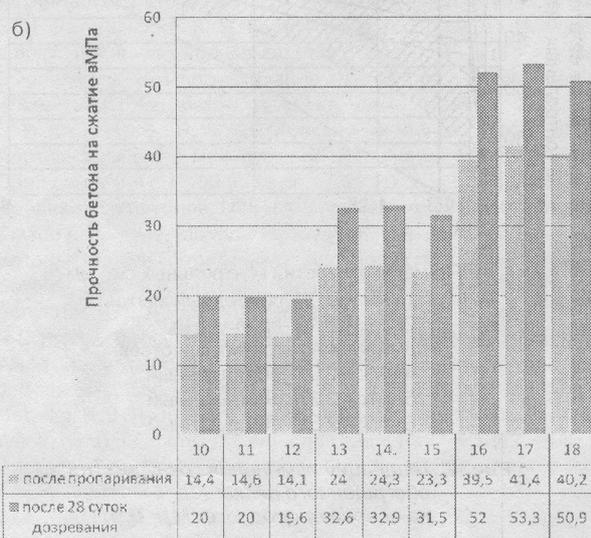
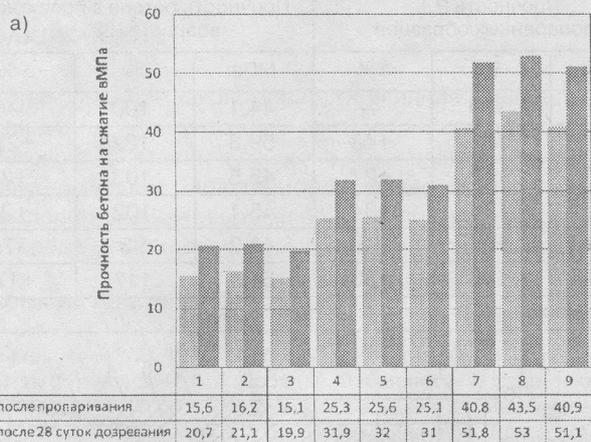


Рис. 1. Прочность бетона пропаренных образцов:
а — для жестких смесей;
б — для пластичных смесей

обогащения мелкозернистых песков иллюстрируется данными таблиц 5 и 6 и рис. 2 и 3.

Данные таблицы 5 получены для стандартизованного состава бетона, твердевшего в нормально-влажных условиях, из равноподвижных бетонных смесей (при прочих равных условиях), отличающегося гранулометрическим составом (см. рис. 2) мелкого заполнителя. Тенденция изменения прочности на сжатие пропаренного бетона в зависимости от M_k песка показана на рис. 3. Из результатов экспериментов очевидна взаимосвязь прочности с гранулометрическим составом многофракционного песка: чем рациональнее зерновой состав с позиций обеспечения минимальной пустотности и удельной поверхности заполнителя, тем выше количественная характеристика бетона (в данном конкретном случае — прочность на сжатие).

В приросте прочности бетона существенную роль играет также качество поверхности (шероховатости) крупных фракций отсева, способствующее росту сил сцепления цементного камня в бетоне с зернами песка. Так, прочность бетона на заполнителе, обогащенном крупными фракциями отсева, уже при модуле крупности $M_k \geq 2,2$ практически сравнялась с прочностью пропаренных образцов на высококачественном (мытом) природном песке с $M_k = 3,2$ и оказалась сопоставимой с ней к проектному возрасту при нормально-влажных условиях твердения. Сравнение прочности образцов бетона на обогащенном песке с исходным (тонким, очень мелким, средним) показывает (см. таблицу 5) устойчивость эффекта ее роста за счет повышения качества обогащенного заполнителя.

Оценку возможности экономии цемента следует осуществлять для конкретных пользователей разработкой применительно к конкретным условиям изготовления сборных изделий либо производства бетонных работ при устройстве (возведении) монолитных конструкций.

Таблица 5. Прочность бетона проектного возраста

№ пп	Вид мелкого заполнителя	Прочность образцов бетона, МПа				Прочность бетона	
		1	2	3	4	МПа	%
1	Природный:						
1.1	тонкий ($M_k = 0,91$)	39,2	46,1	45,6	40,7	44,1	100
1.2	крупный мытый ($M_k \sim 3,20$)	55,7	53,2	58,8	46,1	56,0	127
2	Обогащенный:						
2.1	$M_k = 2,00$	41,3	54,6	53,4	51,5	53,2	121
2.2	$M_k = 2,27$	50,7	55,1	52,3	53,2	53,5	121
2.3	$M_k = 2,50$	49,9	48,9	55,6	55,8	53,8	122
3	Природный ОАО "Завод СЖБ"	33,9	30,4	43,7	34,9	37,5	100
4	Обогащенный:						
4.1	$M_k = 2,50$	49,6	39,0	40,4	50,4	46,7	125
4.2	$M_k = 3,00$	48,5	41,3	42,8	50,4	47,2	126
4.3	$M_k = 3,25$	51,5	49,4	38,7	45,1	48,7	130
5	Природный очень мелкий ($M_k = 1,50$)	48,2	46,6	49,6	46,8	48,2	100
	Обогащенный:						
5.1	$M_k = 2,01$	48,9	48,9	51,5	37,5	49,8	103
5.2	$M_k = 2,47$	50,4	52,3	50,4	49,1	51,0	106
5.3	$M_k = 2,97$	56,5	43,7	53,4	59,1	56,3	117
6	Природный средний ($M_k = 2,02$)	50,2	51,5	48,1	49,6	50,4	100
	Обогащенный:						
6.1	$M_k = 2,50$	50,4	47,7	54,3	55,0	53,2	105
6.2	$M_k = 2,73$	52,1	49,9	54,0	55,5	53,9	107
6.3	$M_k = 3,00$	56,8	53,4	52,0	53,4	54,5	108
6.4	$M_k = 3,26$	56,1	58,2	58,7	58,9	58,6	116

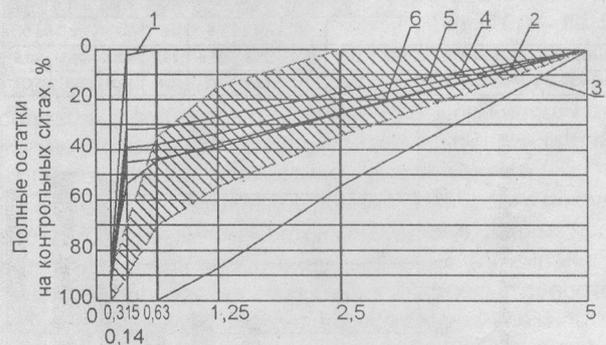
Таблица 6. Прочность бетона при снижении расхода цемента

№ пп	M_k песка, доли ед.	Расход цемента на 1 м ³ бетона, кг	Снижение расхода цемента		Прочность (f_c) пропаренных образцов			Прочность бетона в проектном возрасте (28 сут)		
			кг	%	МПа	%	Δ %	МПа	%	Δ %
1	0,91	350	—	—	22,7	100	—	44,1	100	—
2	2,5	350	—	—	33,7	148	+48	59,8	122	+22
3	2,5	315	351	10	29,0	127	+27	45,5	103	+3
4	2,5	280	701	20	30,4	134	+34	45,1	102	+2
5	2,5	245	105	30	23,4	103	+3	41,2	93	-7
6	2,5	245*	105	30	30,1	133	+33	51,5	117	+17

* Бетон из равноподвижной смеси П1 с пластифицирующей добавкой.

В частности, как с учетом качества исходного мелкого заполнителя для бетона, так и режимов приготовления, транспортирования, укладки-уплотнения и твердения бетона, а также предъявляемых к нему требований (механических и эксплуатационных).

В настоящих исследованиях оценка возможной экономии цемента базируется на сравнении прочности образцов бетона стандартизированного состава на исходном песке (при $C = 350$ кг на 1 м³ бетона), приготовленного с уменьшением расхода цемента (при соблюдении прочих равных условий) при использовании обогащенного песка. На основании данных таблицы 6 можно сделать вывод, что прирост прочности пропаренного бетона на обогащенном песке относительно прочности образцов на тонком песке составил более 30 %, а в проектном возрасте — более 20 %. Это означает, что при сохранении равной прочности на обогащенном крупными фракциями гранитного отсева песке экономия цемента может составить не менее 10 %–15 % от его расхода на тонком песке. Кроме этого, следует отметить, что прочность образцов бетона на обогащенном песке с $M_k = (2,0–2,5)$ соответствует прочности бетона на крупном (мытом) песке стандартного качества с $M_k = 3,2$, а с повышением M_k до 3,0–3,25 и превышает ее.



Размеры отверстий контрольных сит, мм

- 1 - $M_k = 0,91$ - природный мелкий
- 2 - $M_k = 3,19$ - природный
- 3 - $M_k = 4,41$ - гранитный отсев
- 4 - $M_k = 2,01$ - обогащенный
- 5 - $M_k = 2,27$ - обогащенный
- 6 - $M_k = 2,51$ - обогащенный

Рис. 2. Тенденция изменения гранулометрии обогащенного песка на основе природного ($M_k = 0,91$)

Приведенные данные свидетельствуют о возможности повышения качества бетона при одновременной экономии цемента путем обогащения мелкозернистых

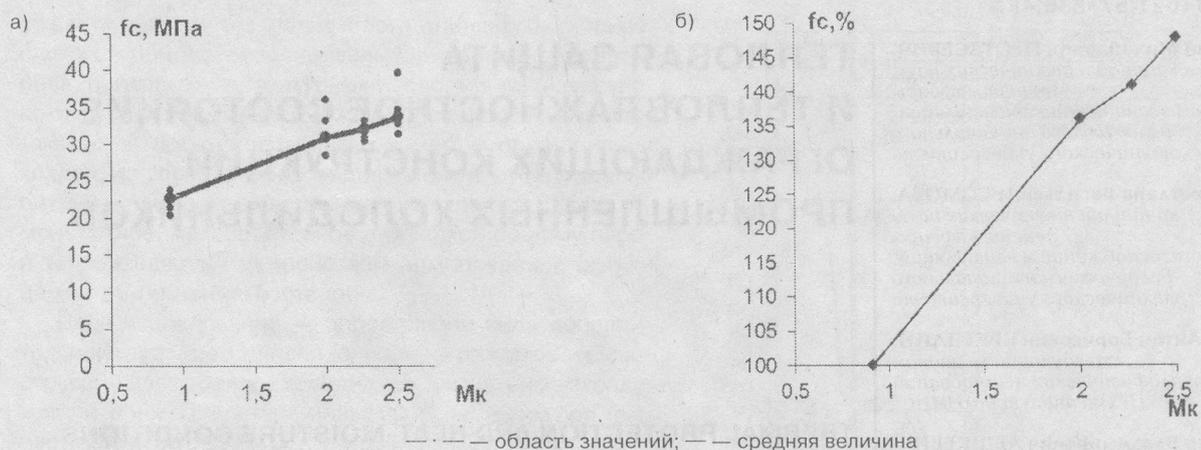


Рис. 3. Тенденция изменения прочности пропаренного бетона в зависимости от модуля крупности песка (исходный $M_k = 0,91$)

песков крупными (в исследованиях — более 0,63 мм) фракциями гранитного отсева, при сопутствующем экономическом эффекте.

Реализация разработки в части использования гранитного отсева при изготовлении цемента на ПРУП "Кричевцементношифер" подтверждена выпуском и использованием строительной отраслью в 2010–2011 гг. 17,6 тыс. т портландцемента с миндобавкой гранитного отсева (ПЦГ-400) и производством на его основе разнообразных строительных конструкций, включая преднапряженные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Установленные закономерности влияния минеральной добавки в портландцемент (бетон) на прочность бетона в сочетании с данными об их влиянии на эксплуатационные характеристики и свойства бетона (водопоглощение, водонепроницаемость, стойкость в среде хлоридов и сульфатов, морозостойкость

и защитную способность по отношению к стальной арматуре [2, 3]) свидетельствуют о возможности использования такого цемента в бетонах (растворах) общестроительного назначения без ограничений, в соответствии с общими правилами применения вяжущего с миндобавками.

- 2 Использование крупных фракций гранитного отсева для обогащения природных мелкозернистых песков позволяет решить проблему повышения качества бетона и снижения расхода цемента для целого ряда районов Беларуси, не располагающих местными запасами качественного мелкого заполнителя для бетона.
- 3 Требуется организация переработки гранитного отсева на РУПП "Гранит" с разделением этого отхода производства на две фракции: размерами 0,5–5,0 мм — для обогащения мелкозернистых песков и менее 0,5 мм — для применения в качестве минеральной добавки цементными заводами, что обеспечит решение проблемы его рационального использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батяновский, Э. И. Свойства цемента и цементного камня с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева / Э. И. Батяновский, А. А. Дрозд, А. В. Смоляков // Строительная наука и техника. — 2009. — № 1(22). — С. 73–79.
2. Смоляков, А. В. Технологические свойства бетонных смесей и прочность бетона с добавкой в виде молотого гранитного отсева / А. В. Смоляков, Э. И. Батяновский, А. А. Дрозд // Строительная наука и техника. — 2009. — № 2(23). — С. 49–57.
3. Батяновский, Э. И. Долговечность железобетона с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева / Э. И. Батяновский, А. В. Смоляков, А. А. Дрозд, В. И. Мацкевич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы (Гродно, 2010). — С. 288–291.
4. Смоляков, А. В. Использование гранитного отсева в цементе и конструкционном бетоне. Проблемы современного бетона и железобетона: матер. III Межд. симп. (Минск, 9–11 ноября 2011 г.). В 2 т. Т. 2. Технология бетона / А. В. Смоляков, П. И. Федорович, Э. И. Батяновский. — Минск, 2011. — С. 438–451.
5. Портландцемент с минеральной добавкой из молотого гранитного отсева (опытная партия): ТУ BY 100649721.116-2010. — Срок действия с 17.09.2010 до 17.09.2012.
6. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459-96. — Введ. 01.01.1998.
7. Смеси бетонные. Методы испытаний: СТБ 1545-2005. — Введ. 01.07.2005.
8. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. — Введ. 01.01.1991.
9. Бетоны. Правила контроля прочности: ГОСТ 18105-86. — Введ. 01.01.1987.
10. Scrivener, K. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete / K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, P. L. Pratt // Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987. — Pittsburgh (Pa). — 1988. — P.87, 88.
11. 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.
12. Detwiler, R. J. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface / R. J. Detwiler, P. J. M. Monteiro, Hans-Rudolf Wenk, Zengqiu Zhong // Cem. and Concr. Res. — 1988. — № 5. — P. 823–829.
13. Garboczi, E. J. Digital Simulation of the Aggregate-Cement Paste Interfacial Zone in Concrete / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // J. Mater. Res. — 1991. — P. 196–201.
14. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон. — М.: Стройиздат, 1961. — 106 с.
15. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона. — М.: Стройиздат, 1981. — С. 208–225.
16. Ицкович, С. М. Технология заполнителей бетона / С. М. Ицкович, Л. Д. Чумаков, Ю. М. Баженов. — М.: Высшая школа, 1991. — 272 с.