

УДК 666.972.69

**Алексей Владимирович
СМОЛЯКОВ,**
инженер НИИЛ бетона
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

Александр Алексеевич ДРОЗД,
кандидат технических наук,
заведующий сектором НИИЛ
бетона и строительных
материалов
Белорусского национального
технического университета

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА С ДОБАВКОЙ В ВИДЕ МОЛОТОГО ГРАНИТНОГО ОТСЕВА

TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CONCRETE MIXES AND STRENGTH OF CONCRETE WITH GRANITE SCREENING

В статье рассматривается возможность эффективного использования гранитного отсева РУПП "Гранит", образующегося в виде побочного продукта при дроблении исходной горной породы, в качестве минеральной добавки в цементные бетоны.

The possibility of using the granite screening as a mineral addition in cement concrete and mortar is considered in the article. The granite screening is produced as a by-product during the process of rock crushing at the RUPP "Granit".

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих публикациях [1, 2] были приведены данные исследований основных физико-технических свойств гранитного отсева РУПП "Гранит" (г. Микашевичи Брестской области), кинетики его помола и свойств продукта помола, а также влияния полученной минеральной добавки на физико-технические свойства цемента: нормальную плотность, сроки схватывания, равномерность изменения объема, прочность (активность) при водном твердении и пропаривании (при дозировке молотого отсева в пределах 0 %–50 % от массы цемента (МЦ)) и на прочность цементно-песчаного раствора, приготовленного на вяжущем с содержанием минеральной добавки до 30 % от МЦ.

С целью определения рационального количества добавки, вводимой в бетон, и области ее применения, авторами были проведены экспериментальные исследования влияния минеральной добавки из гранитного отсева на технологические свойства бетонных смесей и прочность бетона. Результаты этих исследований приводятся далее в статье.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Общая методика исследований

В процессе исследований авторы выявили влияние количественного содержания минеральной добавки — продукта помола гранитного отсева — на формовочные свойства жестких и пластичных смесей, изменение их во времени, водоотделение и расслоение бетонных смесей, а также зависимость прочности бетона на сжатие и растяжение (методом раскалывания образцов) от количества вводимой добавки. Во всех случаях применялась минеральная добавка, измельченная до тонкос-

ти помола цемента (примерно до $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ по прибору типа "ПСХ-4"). Эта тонина помола добавки принята как наиболее рациональная [2], то есть обеспечивающая положительный эффект роста прочности цементного камня при дозировке ее до 30 % от МЦ и относительно небольших затратах времени на помол отсева (время помола $t \approx 0,5 \text{ ч}$).

Минеральную добавку в бетон вводили в количестве от 0 % до 30 % от МЦ, отслеживая затем закономерности изменения определяемых свойств в зависимости от доли добавки в смешанном вяжущем (СВ): "портландцемент + минеральная добавка". Для исключения возможного влияния на чистоту эксперимента минеральных добавок, вводимых в вяжущее при помоле клинкера, опыты выполнялись на чисто клинкерном цементе Д0 (кроме исследований прочности бетона).

Методики определения стандартизированных свойств бетонных смесей и бетона соответствовали положениям действующих технических нормативных правовых актов (ТНПА), на которые приведены ссылки в соответствующих разделах, где также указаны особенности конкретных методик отдельных экспериментов.

Характеристика материалов для бетона

Вяжущее — портландцемент ПРУП "Кричевцементношифер" марок М500 Д0: активность $R_c \sim 51 \text{ МПа}$, $K_{нр} \sim 0,285$, $\rho_c^0 \sim 1080 \text{ кг/м}^3$, $\rho_c \sim 3100 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд} \sim 2950 \text{ см}^2/\text{г}$ и М500 Д20: $R_c \sim 48 \text{ МПа}$, $K_{нр} \sim 0,29$, $\rho_c^0 \sim 1040 \text{ кг/м}^3$, $\rho_c \sim 3080 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд} \sim 3020 \text{ см}^2/\text{г}$.

Минеральная добавка — продукт помола гранитного отсева: $K_{нр} \sim 0,18$, $\rho^0 \sim 950 \text{ кг/м}^3$, $\rho^B \sim 1210 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Мелкий заполнитель — песок природный месторождения "Крапужино" Логойского района: $\rho_n^0 \sim 1560 \text{ кг/м}^3$, $\rho_n^B \sim 1810 \text{ кг/м}^3$, $\rho_n^3 \sim 2650 \text{ кг/м}^3$, модуль крупности $M_k = 2,2$.

Крупный заполнитель — щебень гранитный месторождения "Микашевичи" крупностью 5–20 мм:

Таблица 1

Номер состава бетона	Расход составляющих бетона на 1 м ³							Осадка конуса, см	Марка по подвижности
	Цемент, кг	Минеральная добавка		Добавка СП, % от СВ	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, кг		
		кг	% от МЦ						
1	300	–	–	–	700	1250	150	1–2	П1
2	270	30	10	–	700	1250	150	2–3	П1
3	240	60	20	–	700	1250	150	3	П1
4	210	90	30	–	700	1250	142	2	П1
5*	400	–	–	1,0	680	1150	180	15	П3
6*	360	40	10	1,0	680	1150	170	11	П3
7*	320	80	20	1,0	680	1150	170	12	П3
8*	280	120	30	1,0	680	1150	170	11	П3
9*	500	–	–	1,5	680	1050	200	22	П5
10*	450	50	10	1,5	680	1050	200	23	П5
11*	400	100	20	1,5	680	1050	200	23	П5
12*	350	150	30	1,5	680	1050	200	24	П5

* Бетон с добавкой СП.

$\rho_{щ}^0 \sim 1420 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{щ}^B \sim 1640 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{щ}^3 \sim 2700 \text{ кг/м}^3$, марка по дробимости 1200.

Добавка-пластификатор 1-й группы – суперпластификатор (СП) "Стахемент-Ф Ж 35": массовая доля сухих веществ ~35 %, плотность (при температуре 20 °С) ~1170 кг/м³, водородный показатель pH ~ 8, содержание хлоридов менее 0,1 %.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Закономерности изменения технологических свойств бетонных смесей различной консистенции (подвижных, жестких), приготовленных с введением в бетон минеральной добавки в дозировке 0 %–30 % от МЦ, исследовали по методикам, приведенным в [3].

Сохраняемость формовочных свойств пластичных смесей

Влияние дозировки минеральной добавки на сохраняемость формовочных свойств бетонных смесей во времени оценивали испытанием проб с интервалом в 15 мин между отдельными определениями осадки конуса (ОК). Для исследований использовали три базовых состава бетона (таблица 1), характеризовавшихся подвижностью бетонной смеси, соответствовавшей маркам П1 (ОК ~ (1–4) см), П3 (ОК ~ (10–15) см) и П5 (ОК ≥ 21 см) по [4] и приготовленной на портландцементе М500 Д0.

При замене части портландцемента на минеральную добавку, вводимую в количестве 10 %, 20 % и 30 % от МЦ, в отдельных случаях корректировали (снижали) расход воды, оставляя неизменной подвижность бетонной смеси, соответствовавшую ее начальному значению для бетона без минеральной добавки и определенную сразу по окончании приготовления смеси. Для получения смесей марок П3 и П5 в бетон вводили добавку-суперпластификатор в дозировке 1,0 % и 1,5 %, соответственно, от массы СВ "портландцемент + минеральная добавка". Приготавливали бетонную смесь в бетоносмесителе принудительного действия. Температура воздуха в помещении лаборатории состав-

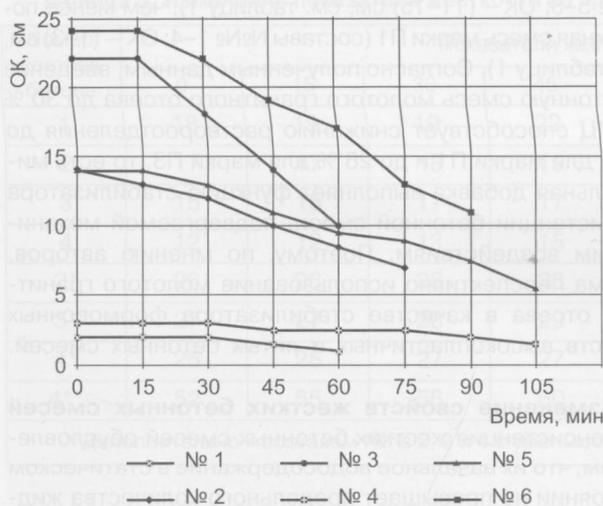
ляла 20 °С, а бетонной смеси – (17–18) °С. Между интервалами измерения ОК смесь укрывали полиэтиленовой пленкой.

Из данных экспериментов, приведенных в таблице 2 и, выборочно, на рис. 1, следует, что введение в бетон тонкоизмельченной минеральной добавки молотого гранитного отсева в количестве 10 %–30 % от МЦ не снижает "живучести" или сохраняемости формовочных свойств пластичных бетонных смесей по всему проверенному и фактически используемому в строительстве диапазону, то есть от марки П1 до марки П5. Более того, проявляется общая тенденция к замедлению снижения ОК бетонных смесей с минеральной добавкой в ходе эксперимента; при этом с ростом количества вводимой минеральной добавки с 10 % до 30 % от МЦ данная тенденция сохраняется.

Физическая сущность отмеченного явления заключается в том, что тонкоизмельченная минеральная добавка, обладая значительным потенциалом поверхности, адсорбирует достаточно большое количество воды затворения и способна удерживать ее длительный

Таблица 2. Кинетика изменения подвижности бетонной смеси

Номер состава бетона	Осадка конуса, см, через время, мин							
	0	15	30	45	60	75	90	105
1	2	2	2	1,5	1,0	–	–	–
2	2	2	2	2	1,5	1,0	–	–
3	3	3	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	–
4	3	3	3	2,5	2,5	2,5	2,0	1,5
5	14	13	12	10	8,5	7,0	–	–
6	11	11	9	8	7	5,5	–	–
7	12	11	11	10,5	9,5	7,5	5,5	–
8	14	14	13	10	9,5	9	7,5	5,5
9	22	22	18	14	10	–	–	–
10	23	23	20	16	13,5	10,0	–	–
11	23	23	20	17	15	11,5	–	–
12	24	24	22	19	17	13	11	–



Графики №№ 1, 2, 3 — смесь без добавки (марок П1, П3 и П5);
графики №№ 4, 5, 6 — смесь с 30 % минеральной добавки
(марок П1, П3 и П5)

Рис. 1. Тенденция изменения подвижности смеси

период времени. При этом в отличие от цемента минеральная добавка инертна и не вступает в реакцию с водой, то есть не связывает ее физико-химически образующимися продуктами гидратации [5–9]. Таким образом, в смешанном вяжущем (то есть "цемент + минеральная добавка") меньшее (чем для чисто клинкерного цемента) количество жидкости затворения переходит в начальный период из свободного в физико-химически связанное состояние, так как процесс этого перехода адсорбированной зернами минеральной добавки воды растягивается во времени. В результате замедляется темп коагуляционного структурообразования цементного теста на смешанном вяжущем (и значительно с увеличением дозировки минеральной добавки), что отражается в соответствующем замедлении снижения показателя ОК смесей во времени. Следует отметить, что это явление коррелирует с приведенными в статье [2] данными об увеличении сроков схватывания цемента при введении минеральной добавки из молотого гранитного отсева.

Водоотделение пластичных бетонных смесей

Водоотделение бетонных смесей — это проявление передозировки воды в сравнении с тем ее количеством, которое может быть удержано частицами твердой фазы в бетоне за счет потенциала их поверхности в совокупности

Таблица 3

Номер состава бетона	Количество минеральной добавки, % от МЦ	Масса сосуда со смесью, г	Объем уплотненной бетонной смеси V_{bc} , см ³	Масса отделившейся воды, г	Показатель водоотделения по [3], %	Снижение водоотделения, %
1	0	2585	950	32	3,37	0
1*	5	2580	950	31,3	3,29	2,4
2	10	2570	950	30,2	3,18	5,6
2*	15	2570	950	29,6	3,12	9,3
3	20	2565	950	27,5	2,89	14,2
3*	25	2550	950	26,0	2,73	19,0
4	30	2550	950	25,1	2,64	21,7

* Дополнительно к составам бетона, приведенным в таблице 1.

с дополнительно проявляющимся потенциалом твердофазных продуктов гидратации цемента. Наличие потенциала поверхности у твердофазных частиц связано с некомпенсированностью связей наружного слоя молекул (ионов) их вещества, так как они испытывают неодинаковое притяжение со стороны соседних молекул (ионов) собственно данного вещества и контактирующей с ним окружающей среды. Из-за этой разницы по наружному контуру частиц возникает некомпенсированный заряд, благодаря которому у поверхности твердой фазы (включая образующиеся в реагирующем цементном тесте кристаллогидраты) адсорбируется слой молекул воды.

В результате проявления сил гравитационного притяжения (седиментации), а также эффекта контракции цементного теста (стяжения, уменьшения объема при гидратации цемента) из объема бетона мигрирует свободная (не связанная) вода и накапливается на поверхности образца или изделия. Следует констатировать, что (при прочих равных условиях) чем значительнее водоотделение бетона, тем больше его пористость и тем хуже физико-технические характеристики.

Изменение водоотделения бетонных смесей (методика [3]) под влиянием минеральной добавки, вводимой в бетон в количестве 0 %–30 % от МЦ, исследовалось на смесях составов №№ 1–4 (см. таблицу 1). Подвижность на "верхней" границе марки П1 принята потому, что бетон такой подвижности в строительной практике преимущественно приготавливают без химических добавок-пластификаторов, которые способствуют снижению начального водосодержания бетона и изменяют условия водоотделения (снижают его). Из результатов экспериментов, представленных в таблице 3, следует, что введение в бетон незначительного количества минеральной добавки в виде продукта помола гранитного отсева понижает водоотделение пластичной бетонной смеси. Это согласуется с данными других исследований [6, 10], относящихся к иным тонкоизмельченным веществам (зола-унос, молотый шлак, песчаник и др.).

Анализируя полученные данные, а также общепризнанные результаты многочисленных исследований закономерностей начального периода взаимодействия цемента с водой в цементном тесте [5, 11–15], авторы объясняют основную причину снижения водоотделения бетона в присутствии минеральной добавки следующими положениями.

Водоотделение пластичного цементного теста связано с развитием процессов гидратации цемента в первые 1–3 часа взаимодействия с водой и проявлением эффекта контракции (сжатия) объема системы

"цемент — вода", который сопровождается сближением частиц твердой фазы и отжатием части воды затворения. Введение в эту систему инертного к химическому взаимодействию с водой тонкодисперсного вещества, во-первых, снижает количество реагирующего с водой вяжущего и, соответственно, уменьшает физический объем проявляющейся контракции; во-вторых, сольватированные частицы минеральной добавки относительно равномерно распределяются в цементном тесте и занимают некоторый его объем (тем больше, чем больше введено добавки), который слабо или вовсе не изменяется в начальный период и препятствует изменению объема системы в целом. Усилий, возникающих в объеме бетона от контракции клинкерной части вяжущего и силы тяжести, недостаточно для отжатия воды из сольватных оболочек частиц минеральной добавки. В результате, в несколько меньшей мере проявляется эффект контракции цементного теста, приготовленного на смешанном вяжущем, а из объема бетона отделяется меньшее количество свободной воды.

Раствороотделение пластичных бетонных смесей

Данное явления характеризует подверженность расслоению бетонных смесей под динамическими воздействиями, возникающими при ее укладке и уплотнении или транспортировании. Раствороотделение определяется при проявлении расслоения смеси под воздействием динамических импульсов в процессе вибрирования на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами (амплитуда $A \sim (0,50 \pm 0,05)$ мм; частота $f \sim (2900 \pm 100)$ колебаний в минуту).

Экспериментальные исследования по определению раствороотделения и его зависимости от наличия и дозировки в бетон минеральной добавки (продукта помола гранитного отсева) выполняли в соответствии с методикой [3] на составах бетона №№ 1–8 (см. таблицу 1), так как бетонные смеси с ОК до 15 см наиболее широко применяются при бетонировании. Результаты исследований, представленные в таблице 4, коррелируют с ранее полученными результатами, отражающими снижение водоотделения бетонных смесей в присутствии добавки молотого гранитного отсева, так как эти явления взаимосвязаны. В целом очевидна тенденция снижения раствороотделения бетонных смесей, содержащих минеральную добавку молотого гранитного отсева. Очевидна также роль начальной пластичности смеси, то есть под воздействием вибрирования скорее расслаивается более подвижная смесь марки ПЗ (составы

№№ 5–8; ОК ~ (11–15) см, см. таблицу 1), чем менее подвижная смесь марки П1 (составы №№ 1–4; ОК ~ (1–3) см, см. таблицу 1). Согласно полученным данным, введение в бетонную смесь молотого гранитного отсева до 30 % от МЦ способствует снижению раствороотделения до 15 % для марки П1 и до 26 % для марки ПЗ, то есть минеральная добавка выполняет функцию стабилизатора консистенции бетонной смеси, подвергаемой механическим воздействиям. Поэтому, по мнению авторов, весьма перспективно использование молотого гранитного отсева в качестве стабилизатора формовочных свойств высокопластичных и литых бетонных смесей.

Изменение свойств жестких бетонных смесей

Консистенция жестких бетонных смесей обусловлена тем, что их начальное водосодержание в статическом состоянии не превышает предельного количества жидкости, которое может быть связано физически за счет электростатического потенциала поверхности твердой фазы (цемента, заполнителей пылевидных фракций, минеральных добавок (при наличии)), содержащейся в составе бетона. Под динамическим воздействием (например, вибрация) часть физически связанной воды (диффузных слоев сольватных оболочек) переходит в свободное состояние, что обуславливает тиксотропное (обратимое, временное) разжижение цементного теста в бетоне, обеспечивая необходимые условия для формования изделий. В исследованиях влияния минеральной добавки на закономерности изменения показателя жесткости и формуемости жестких смесей использовали бетон составов №№ 1–4 по таблице 1, подбирая расход воды таким образом, чтобы показатель жесткости соответствовал значению $Ж \sim (12–30)$ с и $Ж > 40$ с, то есть характеризовался марками Ж2, Ж3 и СЖ1 по [4]. Такой выбор обусловлен тем, что наиболее вероятной областью применения минеральной добавки будут бетоны для изделий массового применения, например, плит пустотного настила и других, при изготовлении которых используют смеси указанных марок.

Изменение показателя жесткости

В проводимых авторами экспериментальных исследованиях показатель жесткости бетонных смесей и его изменение во времени определяли по методике [3] с помощью прибора Красного в формах "ФК-100" при вибрировании смеси на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами.

Результаты исследований, приведенные в таблице 5, и выборочные данные рис. 2 отражают общую тенден-

Таблица 4. Раствороотделение бетонных смесей

Номер состава бетона	Содержание минеральной добавки, % от МЦ	Масса бетонной смеси, г		Масса щебня, г		Масса раствора, г		Показатель раствороотделения P_p , %	Снижение раствороотделения, %
		в верхней части	в нижней части	в верхней части	в нижней части	в верхней части	в нижней части		
1	–	5922	6028	2803	3047	3119	2981	2,3	–
2	10	5920	6007	2815	3031	3105	2976	2,1	9
3	20	5952	5998	2852	3040	3100	2968	2,1	9
4	30	5965	5990	2866	2999	3099	2991	1,95	15
5	–	5882	5944	2711	3069	3173	2875	4,9	–
6	10	5895	5960	2749	3083	3146	2887	4,29	12
7	20	5908	5992	2777	3086	3131	2906	3,92	20
8	30	5922	5977	2806	3080	3116	2897	3,6	26

Таблица 5. Изменение показателя жесткости во времени

Номер состава бетона	Показатели жесткости Ж, с, через период времени, мин									
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
1	18	19	19	22	24	28	33	–	–	–
2	17	17	18	19	18	22	25	30	–	–
3	15	15	17	17	18	19	21	24	28	35
4	12	12	13	15	16	16	19	20	22	26
2*	26	26	28	28	30	33	37	40	–	–
3*	27	27	28	29	29	31	34	36	40	–
4*	25	25	27	27	28	30	33	35	38	42
4**	52	55	56	60	63	65	68	70	–	–

* Дополнительно к составам №№ 2, 3 и 4 с уменьшением начального водосодержания.



Рис. 2. Тенденция изменения показателя жесткости

цию: введение в бетонную смесь минеральной добавки молотого гранитного отсева способствует как снижению показателя жесткости (последовательно составы №№ 1, 2, 3 и 4, при прочих равных условиях), так и поддержанию формуемости бетонной смеси во времени. То есть, в присутствии минеральной добавки жесткие смеси сохраняют формуемость, близкую к начальной, более продолжительный период. Такое свойство смеси приобретают благодаря тому, что минеральная добавка удерживает (за счет потенциала своей поверхности) значительное количество воды, не вступая с ней в химическое взаимодействие. Это ее отличие от цемента обеспечивает сохранение в объеме цементного теста жидкости, часть которой переходит в свободное состояние при вибрировании. С увеличением дозировки минеральной добавки этот резервный объем жидкости возрастает, что способствует проявлению эффекта тиксотропии более продолжительный период времени. С позиций сохраняемости свойств бетонной смеси такой эффект положителен; одновременно его следует учитывать и как нежелательный фактор в процессе назначения предварительной выдержки бетона при тепловой обработке изделий.

Изменение плотности жесткой смеси

При выполнении экспериментов определяли изменение во времени средней плотности бетонной смеси составов № 1 (без добавки) и № 4 с показателем жесткости, соответствующим марке Ж2, и составов № 4*

и № 4** марок Ж3 и СЖ1. Определение плотности в основном проводилось по методике [3], то есть смесь укладывали и уплотняли по [16] в мерном цилиндре (V = 1 л) на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами, но в течение времени, которое соответствовало начальному показателю жесткости, и с периодичностью, согласно данным, приведенным в таблице 6:

Из результатов эксперимента следует, что наличие в составе бетонной смеси минеральной добавки молотого гранитного отсева в количестве до 30 % от МЦ незначительно, но способствовало снижению начального значения средней плотности бетонной смеси (составы № 1 и № 4). Очевидно, это связано с разницей плотностей цементного клинкера ($\rho_{цк} \sim 3100 \text{ кг/м}^3$) и гранита ($\rho_r \sim (2800-2900) \text{ кг/м}^3$ при плотности зерен $\rho_{цз} \sim 2700 \text{ кг/м}^3$).

Одновременно, благодаря выявленному ранее эффекту продолжительного сохранения формовочных свойств бетонной смеси во времени при наличии в ее составе минеральной добавки, в соответственно меньшей степени снижается средняя плотность смеси на смешанном вяжущем при ее виброуплотнении с течением времени. Как уже отмечалось, под воздействием вибрации возбуждаются колебательные движения сольватированных частиц твердой фазы, включая и зерна минеральной добавки, что сопровождается переходом части жидкости (диффузных слоев их сольватных оболочек) в свободное состояние и проявлением эффекта тиксотропного разжижения цементного теста, который для смешанного вяжущего сохраняется более длительный период времени, чем для чисто клинкерного цемента и особенно с увеличением количества добавки.

Таблица 6. Изменение средней плотности бетонной смеси

Номер состава бетона	Показатель жесткости смеси Ж, с	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м^3 , через период времени, мин					
		0	15	30	60	90	120
1	19	2410	2410	2400	2390	2380	2350
4	11	2400	2400	2400	2400	2400	2390
4*	26	2415	2410	2400	2400	2380	2380
4**	52	2440	2440	2430	2425	2415	2390

* Дополнительно к составу № 4 с уменьшением начального водосодержания.

ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА С МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ

Методика исследований основывается на оценке результатов экспериментов по выявлению закономерностей изменения прочности бетона при варьировании дозировки добавки (0 %–30 % от МЦ), изменений условий твердения образцов (пропаривание и нормально-влажные), расхода цемента (в диапазоне 210–500 кг на 1 м³ бетона), а также величины водоцементного отношения (0,4–0,7) и соответствующих изменений консистенции (подвижности) бетонной смеси.

Прочность образцов пропаренного бетона

В таблице 7 и на рис. 3 частично приведены данные о прочности бетона (с минеральной добавкой и без нее) и тенденции ее изменения, соответственно. На прочность исследовались образцы-кубы с ребром 100 мм, изготовленные из бетонных смесей составов, приведенных в таблице 1, и пропаренных в лабораторной ямной камере по режиму: предварительная выдержка — 2 ч; подъем температуры до (80–85) °С — 3 ч; изотермическая выдержка — 6 ч; остывание вместе с камерой 10–12 ч. После распалубки и до испытаний образцов бетона проходило 2–3 ч, то есть весь цикл "изготовления образцов — испытания" составлял примерно 24 ч. При определении прочности бетона на сжатие в каждой серии было по шесть образцов; прочность на одноосное растяжение определялась по методике раскалывания кубических образцов (серия — 3 шт.) путем их сжатия между "ножами" с полусферическими режущими кромками диаметром 5 мм [17, 18], расположенными в вертикальной плоскости раскола по геометрическому центру образцов. В остальном испытания и обработку их результатов выполняли по [16].

Результаты экспериментов подтверждают возможность использования молотого гранитного отсева в качестве минеральной добавки в бетон с позиций обеспечения его прочности. При этом наиболее эффективен (установлен рост прочности до 15 %) свежемолотый материал (срок хранения до 7 сут) в дозировке до 15 %–20 % от МЦ. Снижение прочности на сжатие образцов бетона с равной дозировкой добавки после ее хранения (60 сут) до 5 % компенсируется (при соответствующем учете) значительной экономией цемента. Если в этом случае использовать пластифицирующие добавки при соответствующем снижении начального водосодержания, прочность бетона на цементе с содержанием 15 %–20 % минеральной добавки соответствует ее значениям для бетона на чисто клинкерном вяжущем (№№ 3**, 7** и 11** в сравнении с №№ 3, 7 и 11).

Введение в цемент с минеральными добавками дополнительного количества аналогичных по функциональным свойствам минеральных веществ нецелесообразно, так как приводит к существенному снижению прочности бетона (см. раздел "в" в таблице 7).

Анализ закономерностей изменений прочности бетона на сжатие и растяжение при введении свежемолотого отсева подтверждает гипотезу [2] о наличии в этом случае эффекта активизации процессов гидратации и структурообразования в твердеющем цементном камне за счет ультрадисперсной части зерен кремнезема в минеральной добавке. Одновременно подтверждается предположение о том, что снижение прочности бе-

тона, как конгломератного материала, связано не только с понижением активности цемента при введении более 20 % от МЦ минеральной добавки (или долго хранившейся и снизившей активность (потенциал) поверхности), но и за счет ухудшения качества сцепления поверхности заполнителей с цементным камнем в бетоне. Этот вывод подтверждает сравнение изменений прочности бетона на сжатие и растяжение. Так, во всех случаях (см. таблицу 7) рост прочности бетона на растяжение менее значителен, а снижение — резче, чем соответствующие изменения прочности образцов-аналогов на сжатие. Данное явление закономерно отражает большую зависимость прочности бетона на растяжение от качества сцепления цементного камня с поверхностью зерен заполнителей, в сравнении с его прочностью на сжатие.

Необходимо отметить структурирующую роль тонкодисперсного и прочного вещества молотого отсева в цементном камне, что подтверждается сравнением данных по прочности на сжатие образцов, например №№ 1, 2 и 3 раздела "б". Несмотря на снижение активности поверхности "лежалой" добавки и рост (с 0,500 до 0,625) водоцементного отношения, прочность бетона на сжатие снизилась не более чем на 5 % для ее дозировки в 20 % от МЦ.

Полученные закономерности влияния минеральной добавки из молотого гранитного отсева на прочность образцов пропаренного бетона полностью подтвердились при испытании образцов бетона нормально-влажного твердения (таблица 8). При этом установлено, что относительный прирост прочности бетона за счет применения свежемолотой добавки значительнее для пропаренных образцов и несколько ниже для бетона, твердевшего в нормально-влажных условиях. То есть, активационное воздействие высокодисперсных

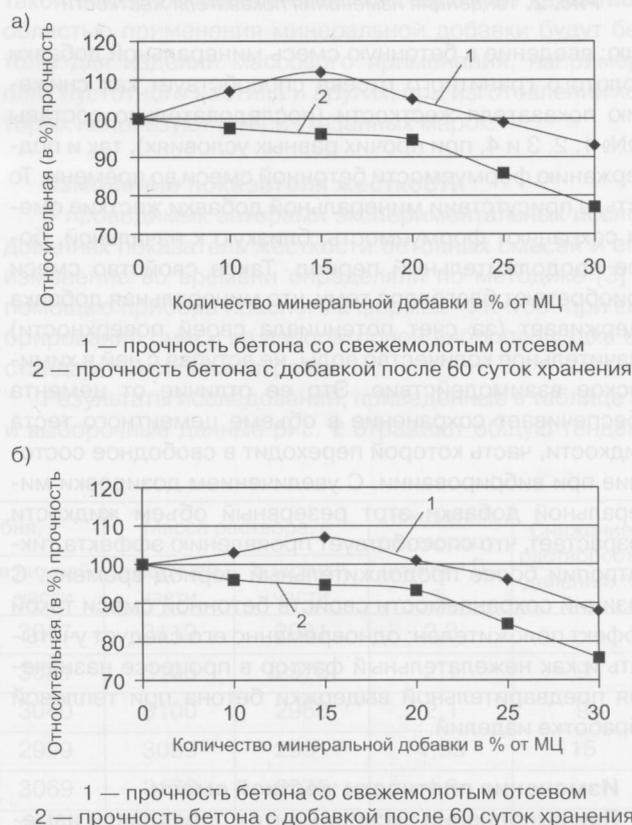


Рис. 3. Тенденция изменения прочности бетона:
а — на сжатие;
б — на растяжение

Таблица 7. Прочность образцов пропаренного бетона

Номер состава бетона по таблице 1	Расход на 1 м ³ бетона					(В/Ц) ₆	Прочность бетона			
	цемента, кг	минеральной добавки		воды, кг	СП, % от СВ		на сжатие		на растяжение	
		кг	% от МЦ				В МПа	В % от бетона без минеральной добавки	В МПа	В % от бетона без минеральной добавки
а) Цемент М500 Д0 и свежемолотый отсев										
1	300	–	–	150	–	0,50	28,0	100	3,36	100
2	270	30	10	150	–	0,56	30,0	107	3,46	103
2*	255	45	15	145	–	0,57	31,4	112	3,59	107
3	240	60	20	145	–	0,60	28,6	105	3,39	101
3*	225	75	25	140	–	0,62	27,2	99	3,23	96
4	210	90	30	140	–	0,67	26,0	93	2,96	88
5	400	–	–	180	1,0	0,45	35,5	100	4,1	100
6	360	40	10	170	1,0	0,47	39,0	110	4,22	103
6*	340	60	15	170	1,0	0,50	41,2	116	4,47	109
7	320	80	20	170	1,0	0,53	39,9	108	4,18	102
7*	300	100	25	165	1,0	0,55	35,6	102	4,02	98
8	280	120	30	165	1,0	0,59	33,7	95	3,61	88
9	500	–	–	200	1,5	0,40	48,5	100	5,40	100
11	400	100	20	190	1,5	0,48	53,3	110	5,67	105
б) Цемент М500 Д0 и отсев после 60 суток хранения										
1	300	–	–	150	–	0,50	26,8	100	3,16	100
2	270	30	10	150	–	0,56	26,1	97,5	2,95	96
3	240	60	20	150	–	0,625	25,3	94,5	3,01	93,3
4	210	90	30	150	–	0,71	20,6	77,0	2,40	75,8
5	400	–	–	180	1,0	0,45	34,4	100	3,82	100
6	360	40	10	180	1,0	0,50	32,7	96,0	3,67	96
7	320	80	20	180	1,0	0,56	32,0	93,8	3,50	91,5
8	280	120	30	180	1,0	0,64	23,7	69,5	2,55	66,6
9	500	–	–	200	1,5	0,40	46,6	100	5,19	100
11	400	100	20	200	1,5	0,50	44,13	95,1	4,85	93,5
3**	240	60	20	125	1,0	0,50	27,5	103	3,14	99,5
7**	320	80	20	145	1,0	0,45	36,8	108	3,86	101,0
11**	400	100	20	160	1,5	0,40	48,8	105	5,31	102,3
в) Цемент М500 Д20 и отсев после 60 суток хранения										
1	300	–	–	150	–	0,5	26,0	100	3,01	100
2	270	30	10	150	–	0,56	23,5	90,5	2,58	85,9
3	240	60	20	150	–	0,625	20,8	80,2	2,32	77,3
4	210	90	30	150	–	0,71	18,0	69,3	2,02	66,6
9	500	–	–	200	1,5	0,4	43,1	100	4,80	100
11	400	100	20	200	1,5	0,5	36,6	85,0	3,98	82,9

* Составы бетона дополнительно к таблице 1.

** Составы бетона с 20 % минеральной добавки и сниженным водосодержанием: до ОК₃ ~ (1–2) см; ОК₇ ~ (5–6) см; ОК₁₁ ~ (12–14) см, вместо 4, 14 и 23 соответственно.

Примечание — Подвижность смесей одинаковых составов (разделов "а, б, в") была равнозначной.

Таблица 8. Прочность образцов бетона нормально-влажностного твердения

Номер состава бетона по таблице 1	Расход на 1 м ³ бетона					(В/Ц) ₆	Прочность бетона на сжатие				
	цемента, кг	минеральной добавки		воды, кг	СП, % от СВ		В МПа в возрасте, сут			В % от бетона без добавки в 28-суточном возрасте	
		кг	% от МЦ				3	7	28		
а) Цемент М500 Д0 и свежемолотый отсев											
5	400	–	–	180	1,0	0,45	23,5	35,0	44,5	100	
5*	400	–	–	180	1,0	0,45	32,9	43,8	47,6	107	
6	360	40	10	180	1,0	0,5	25,0	36,8	46,7	105	
7	320	80	20	180	1,0	0,56	25,0	35,5	45,4	102	
8	280	120	30	180	1,0	0,64	22,2	33,0	41,8	94	
6**	360	–	–	180	1,0	0,5	21,0	31,8	40,5	91	
7**	320	–	–	180	1,0	0,56	17,0	27,5	36,9	82,9	
8**	280	–	–	180	1,0	0,64	14,2	22,2	31,3	70,3	
б) Цемент М500 Д0 и отсев после 60 суток хранения											
5	400	–	–	180	1,0	0,45	23,5	35,0	44,5	100	
6	360	40	10	180	1,0	0,5	21,0	31,1	43,0	96,6	
7	320	80	20	180	1,0	0,56	20,5	30,0	41,7	93,7	
8	280	120	30	180	1,0	0,64	16,4	23,5	33,8	76,0	

* Дополнительно введено 0,75 % от МЦ сульфата натрия.

** Сохранено равенство водоцементного отношения и содержания цемента с составами №№ 6, 7 и 8.

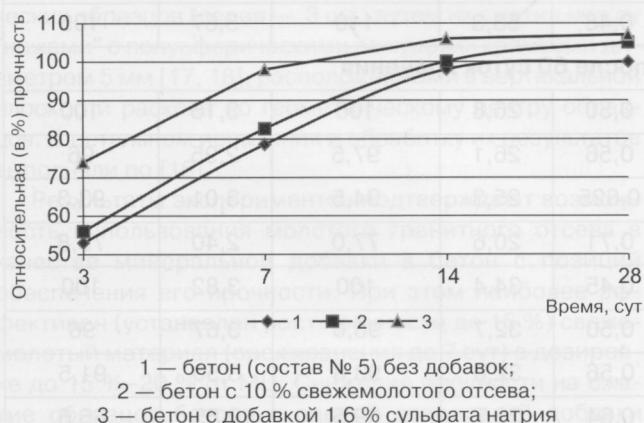


Рис. 4. Тенденция кинетики прочности бетона

частиц молотого отсева в большей степени реализуется при повышенной температуре твердения цементного камня и бетона.

Вместе с тем, сопоставление данных разделов "а" и "б" (см. таблицу 8), относящихся к составам №№ 6, 7 и 8 и №№ 6**, 7** и 8**, характеризующихся наличием или отсутствием минеральной добавки при прочих равных условиях, показывает преимущество в прочности бетона с молотым отсевом. Благоприятное воздействие молотого отсева на становление кристаллогидратной структуры цементного камня отражается в кинетике роста прочности бетона нормально-влажностного твердения. Одновременно при интенсификации твердения за счет применения химических добавок-ускорителей, например, сульфата натрия, рост прочности бетона не столь значителен (рис. 4).

Это свидетельствует о своеобразии механизма структурирующего воздействия тонкодисперсной твердой фазы молотого гранита, не вступающей в химические реакции [2] с продуктами гидролиза и гидратации

цемента, и отличающегося от механизма действия химических добавок-ускорителей твердения [11, 13, 15, 19]. Для оценки данного явления необходимо осуществление специальных комплексных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты выполненных исследований, можно сделать следующие выводы.

- 1 Основываясь на критерии прочности бетона, следует считать верхним рациональным пределом введение в его состав до 20 % от массы цемента минеральной добавки в виде молотого (до $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$) гранитного отсева. Соответственно рационален вариант изготовления цемента с данной минеральной добавкой в количестве 15%–20 % от клинкерной части вяжущего.
- 2 Введение в состав бетона в указанных пределах молотого гранитного отсева не ухудшает формовочных и других технологических свойств бетонных смесей практически всех применяемых в строительной отрасли консистенций, способствуя их стабилизации во времени.
- 3 Нецелесообразно дополнительное введение минеральной добавки в виде молотого отсева в бетон, приготовленный на цементе, содержащем минеральные добавки, кроме как с целью значительного снижения активности (соответственно, экзотермии) вяжущего.
- 4 Наиболее эффективно использование свежемолотого гранитного отсева (до 7 сут), особенно в сочетании с эффектом снижения водоцементного отношения бетона за счет одновременного применения пластифицирующих добавок; допускается применение минеральной добавки после 60–90 сут хранения в воздушно-сухих условиях.
- 5 Необходима оценка влияния минеральной добавки из молотого гранитного отсева на эксплуатационные свойства бетона с целью установления области и ограничений к ее применению в строительных конструкциях различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батяновский, Э.И. Гранитный отсеб РУПП "Гранит" — направления использования и свойства / Э.И. Батяновский; А.В. Смоляков, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника. — 2008. — № 5(20). — С. 7–15.
2. 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.
3. Смеси бетонные. Методы испытаний: СТБ 1545-2005. — Введ. 01.07.2005.
4. Смеси бетонные. Технические условия: СТБ 1036-96. — Введ. 01.07.1997.
5. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. — М.: Стройиздат, 1981. — С. 208–225.
6. Судаков, В.Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях / В.Б. Судаков. — М.: Энергия, 1976. — 241 с.
7. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. — М.: Стройиздат, 1979. — С. 198–203.
8. Бикбау, М.Я. Атомная структура и механизм полиморфных превращений трехкальциевого силиката / М.Я. Бикбау // Цемент и его применение. — 2006. — № 4 — С. 71–76.
9. Бикбау, М.Я. Нанотехнологии в производстве цемента / М.Я. Бикбау. — М.: ОАО "Московский институт материаловедения и эффективных технологий", 2008. — С. 607–622.
10. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. — М.: Изд-во Ассоциации высших учебных заведений, 2002. — 500 с.
11. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. // Изд. 2-е перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1989. — 188 с.
12. Рояк, С.М. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. — М.: Стройиздат, 1983. — С. 48–88.
13. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер с англ. / Х. Тейлор. — М.: Мир, 1996. — 560 с.
14. Ахвердов, И.Н. Теоретические основы бетоноведения: уч. пособие / И.Н. Ахвердов. — Минск: Высшая школа, 1991. — С. 14–74.
15. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. — М.: Стройиздат, 1990. — С. 6–31, 142–193.
16. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. — Введ. 01.01.1991.
17. Ахвердов, И.Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И.Н. Ахвердов, С.М. Ицкович // Бетон и железобетон. — 1961. — № 1. — С. 19–23.
18. Ахвердов, И.Н. Теоретические основы бетоноведения: уч. пособие / И.Н. Ахвердов. — Минск: Высшая школа, 1991. — С. 139–151.
19. Батяновский, Э.И. О механизме действия добавок — ускорителей твердения бетона // Вестник БрГТУ — Строительство и архитектура. Приложение 4.2. — 2005. — С. 11–15.

Статья поступила в редакцию 01.04.2009.