

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 666.973

**СВОЙСТВА БЕТОНА НА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ С
ГРАНИТНЫМ ОТСЕВОМ (ПЦГ)**

СМОЛЯКОВ А.В., БАТЯНОВСКИЙ Э.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Изготовление бетона с использованием портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева, заменяющей часть активного вяжущего, не может не сказаться на структуре (пористости) цементного камня и бетона в целом. Степень этого влияния зависит от свойств и количества введенной минеральной добавки. Для понимания явлений, происходящих в цементном камне в процессе формирования его структуры (пористости) с учетом влияния под влиянием минеральной добавки, рассмотрим общие, широко известные представления о состоянии структуры и характеристиках ее пористости, сформировавшиеся в результате исследований, выполненных в прошлом века [1 - 24]. В прикладном контексте грация пор цементного камня и бетона в целом важна в отношении проникновения в бетон воды, т.к. в основном с ней переносятся агрессивные по отношению к бетону ингредиенты, которые вызывают коррозию самого материала или арматуры железобетонных конструкций, а также усиливают действие разрушающих факторов при переменном увлажнении – высушивании бетона или замораживании – оттаивании. Поэтому влияние портландцемента с

минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева на формирование капиллярной, контракционной пористости и пор новообразований (поры геля в технической литературе) может существенно изменить свойства бетона.

Капиллярные поры являются основными дефектами строения цементного камня плотно уложенного бетона, обуславливающими его проницаемость и понижающим и морозо-, водо- и коррозионную стойкость, защитную способность по отношению к стальной арматуре, водонепроницаемость и другие эксплуатационные свойства бетона. Их вероятный размер достигает $(1...50) \cdot 10^{-6}$ м (1 – 50 мкм) и на 3...4 порядка превышает размер пор новообразований геля. Капиллярные поры благоприятствуют впитыванию и миграции воды, которая находится в них в свободном состоянии и замерзает с увеличением в объеме при охлаждении до $-6 - 10^{\circ}\text{C}$.

Контракционные поры образуются вследствие уменьшения абсолютного первоначального объема системы цемент — вода. Установлено, что контракция вызывает уменьшение внешних размеров системы, сопровождается появлением в ней эффекта вакуума и способствует дополнительному поглощению. По размерам контракционные поры занимают промежуточное положение между порами новообразований (геля) и капиллярными.

Поры новообразований (геля) представляют собой промежутки между гидрокристаллами, заполненные жидкостью или воздухом при испарении воды, адсорбционно связанной в гидратных оболочках гидрокристаллов и частиц геля. Расположенные в объеме новообразований (частиц цементного геля), они имеют наименьший размер (примерно от $15 \cdot 10^{-10}$ до $40 \cdot 10^{-10}$ м, т.е. 15...40 Å), по сравнению с другими порами цементного камня. Вода в порах новообразований (геля) находится в особом состоянии и не переходит в лед при низких температурах порядка -40 и даже -70°C , что согласуется с выводами Б.В. Дерягина, Н.А. Цытовича и М.И. Сумгина о специфических свойствах тонких слоев воды.

С позиций практической значимости важно установленное (Н.Н. Федянин и другие) отсутствие расширения воды при замерзании в капиллярах радиусом менее 0,1 мкм, т.е. менее 1000 Å. А также то, что в таких капиллярах все «сечения» воды находятся в адсорбционно связанном состоянии и характеризуются упругими свойствами

ми, а значит не обладает «текучестью» и может перемещаться только при чрезвычайно большом давлении. Учитывая, что размер пор новообразований (геля) примерно на один – два порядка меньше диаметра этих капилляров, а размер контракционных пор примерно такого же порядка можно предполагать, что эти поры цементного камня ограничено проницаемы для воды и она не увеличивается в объеме при охлаждении бетона. Следовательно, для повышения морозо-, водо-, коррозионной стойкости бетона и других его эксплуатационных характеристик необходимо создание условий для формирования структуры с минимальным объемом макрокапилляров, имеющих радиус более 0,1 мкм.

Общая методика исследований. В процессе исследований выявили влияние портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева на определяемые свойства бетона с целью установления рациональной (допускаемой) области его применения при производстве (возведении) строительных конструкций.

Минеральная добавка в портландцемент вводилась в количестве 20 % от массы цемента.

Методики исследований стандартизированных свойств бетона соответствовали действующим стандартам, особенности методик отдельных экспериментов указаны в тексте.

Характеристики материалов для бетона. Вяжущее – портландцемент марки М500 Д0 (активность: $R_c \sim 53$ МПа; $K_{нг} \sim 0,285$, $\rho_{ц}^0 \sim 1080$ кг/м³, $\rho_{ц} \sim 3100$ кг/м³, $S_{уд} \sim 2950$ см²/г) ОАО Кричевцементношифер.

портландцемент марки ПЦГ 500 (активность: $R_c \sim 52$ МПа; $K_{нг} \sim 0,285$, $\rho_{ц}^0 \sim 1080$ кг/м³, $\rho_{ц} \sim 3110$ кг/м³, $S_{уд} \sim 3020$ см²/г) ОАО Кричевцементношифер.

Мелкий заполнитель – песок природный крапужинского месторождения со следующими характеристиками: $\rho_{п}^0 \sim 1560$ кг/м³; $\rho_{вп} \sim 1810$ кг/м³; $\rho_{зп} \sim 2650$ кг/м³; модуль крупности: $M_k = 2,2$.

Крупный заполнитель – щебень гранитный (микашевичский) крупностью 5-20 мм со следующими характеристиками: $\rho_{щ}^0 \sim 1420$ кг/м³; $\rho_{вщ} \sim 1640$ кг/м³; $\rho_{зщ} \sim 2700$ кг/м³; маркой по дробимости «1200».

Добавка-пластификатор 1-ой группы (суперпластификатор; СП) – «Стахемент - F Ж 35» с массовой долей сухих веществ $\sim 35\%$;

плотностью (20°C) ~1170 кг/м³; водородным показателем pH~ 8; содержанием хлоридов: < 0,1%.

Составы бетона для испытаний приведены в таблице 1. Составы № 2, 4, 6, 7, 9 характеризуются использованием портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева, суммарным весом идентичным составу 1 – контрольному. Составы № 4 и 7 приготовлены с пластифицирующей добавкой «Стахемент-ФЖ35».

Таблица 1. Составы бетона для испытаний

№ состава бетона	Расход составляющих бетона на 1 м ³ :						Осадка конуса, см	Водоцементное отношение бетона, дол. ед	
	Цемент, кг	Миндобавка		Добавка СП, % от СВ	Песок, кг	Щебень, кг			Вода, кг
		кг	% от МЦ						
1	350	-	-	-	700	1150	183	3	0,52
2	280	70	20	-	700	1150	183	3	0,65
4	280	70	20	1,0	700	1150	160	1	0,57
6**	280	70	20	-	700	1150	187	5	0,67
7**	280	70	20	1,0	700	1150	164	5	0,59

* Доля миндобавки в смешанном вяжущем – 20 % по массе;

** бетон изготовленный с использованием портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева после ≥ 90 сут. хранения.

Во всех случаях эксперименты выполнены с использованием образцов бетона в виде кубов с ребром 100 мм. Бетон уплотняли на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрирования: амплитуда (А) ~ 0,5 мм; частота колебаний (f) ~ 50 Гц.

Водостойкость и прочность бетона, твердевшего в воде. В экспериментах по выявлению влияния портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева, хранившегося в помещении лаборатории «навалом» 90 сут. и свежемолотого) на стойкость бетона в неагрессивной водной среде твердения (эксплуатации) и при переменном насыщении водой-высушивании использовали образцы-кубы с размером грани 100 мм составов по таблице 6, изготовленных вибрированием по п. 1.

В таблице 2 приведены данные определения кинетики изменения массы образцов (3 образца в серии) бетона в насыщенном водой состоянии в процессе водного твердения в течение 60 сут., в табли-

це 3 – данные об изменении прочности бетона за этот период водного твердения.

Таблица 2. Изменение массы образцов

№ п/п	Характеристики бетона:			Масса образцов бетона в возрасте, сут.:						
	Ц, кг	Миндобавка		Добавка СП, % от СВ	1*	3	7	14	28	60
		кг	%							
1	350	-	-	-	238 0	242 4	243 9	244 1	244 2	244 4
2	280	70	-	-	236 0	239 5	241 8	242 2	242 4	242 5
3	280	70		1,0	237 0	240 4	242 1	242 9	243 0	243 3

* после распалубки

Таблица 3. Прочность бетона при твердении в воде

№ п/п	Характеристики бетона:			Прочность бетона, МПа, в возрасте, сут.:					
	Ц, кг	Миндобавка		Добавка СП, % от СВ	3	7	14	28	60
		кг	%						
1	350	-	-	-	16,5	23	29,5	33	36
2	280	70	20	-	12,5	20,5	25,8	28,5	32
3	280	70	20	1,0	14,2	23,5	27,2	32	35
4*	280	70	20	-	15,8	23,4	29,5	32,6	34,8

* на свежемолотом портландцементе с минеральной добавкой

Анализ данных таблиц 2 и 3 показывает следующее.

Изменения массы образцов в процессе твердения в благоприятной водной неагрессивной среде коррелируются с изменениями прочности бетона всех исследованных составов при общей тенденции: более интенсивного увеличения ее в первые 3-7 сут. твердения и последующего замедления темпов роста. Однако и к 60 сут. твердения бетон прирастал массу за счет «подсоса» воды.

Это явление связано с развитием процесса гидратации цемента и отражает его кинетику во времени. В частности, формирование пористости цементного камня в исследованный период времени. Как известно процесс становления структуры цементного камня в бетоне сопровождается образованием пор в его объеме, как следствие перераспределения начального количества жидкой фазы. В водных условиях твердения отсутствует эффект ее испарения. Поэтому из-

менение количества жидкости в объеме цементного теста, трансформирующегося в цементный камень, связано с гидратацией цемента и связыванием жидкости химическими реакциями с ионами клинкерных минералов, в результате которых формируются новообразования в виде гидрокристаллов силиката кальция, алюминатов, ферритов и др. В объеме новообразований формируется собственная пористость (поры «геля»), появление которой предопределено спонтанностью процесса появления и роста гидрокристаллов и их случайными взаиморасположением и взаимными контактами.

Одновременно миграция, воды в связи с отмеченным процессом, вызывает образование контракционных пор в «межзерновых» пространствах обводненных (сольватированных) цементных зерен. Уход жидкости из этих пространств (наиболее активен в первые 3-7 сут. твердения бетона) создает в объеме твердеющего цемента (цементного камня) разрежение, т.е. вызывает явление вакуума в этих объемах и в объеме цементного камня в целом. Возникающий градиент давления самоликвидируется за счет подсоса воды извне, что проявляется в росте массы образцов бетона, твердеющего в воде.

Этот эффект усиливается вследствие появления в твердеющем цементном камне системы капиллярных пор на месте «уходящей» на реакции гидратации цемента жидкости сольватных оболочек, первоначально образовавшихся на поверхности частиц твердой фазы: флокул (зерен) цемента, заполнителей, пыли и минеральной добавки, введенной в бетон.

Оценка влияния портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева показывает, что изменение массы образцов отвечает ранее изложенным закономерностям.

Анализ изменений прочности бетона образцов водного твердения, т.е. наиболее благоприятных условий для цементного бетона, показывает, что использование портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева, хранившегося 90 сут. снижает ее к проектному возрасту (28 сут.).

В случае использования свежемолотого портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева отсева в количестве 20 % от массы цемента (составы № 4*) прочность бетона оказалась практически равной (отклонения не превышают погрешности при испытаниях) прочности образцов без миндобавки.

Водостойкость и прочность бетона при циклическом насыщении-высушивании. Водостойкость бетона на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева (срок хранения – 60 сут и свежемолотого на портландцементе с минеральной добавкой исследовали по изменению прочности бетона в процессе испытаний.

Режим одного цикла (один раз в сутки) составлял высушивание образцов при температуре в сушильном шкафу $t \sim 70^{\circ}\text{C}$ в течение 7-8 ч и последующее насыщение в водопроводной воде при $t \sim 15^{\circ}\text{C}$ (в ванне погружением воды не менее, чем на 50 мм под уровнем воды) в течение 16-17 ч.

Образцы бетона (кубы с ребром 100 мм) после изготовления пропаривали по режиму: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры за 3 ч до $t \sim 70^{\circ}\text{C}$: изотермический прогрев – 6 ч; остывание в камере 10 ч и после распалубки – 3 ч, после чего их подвергали испытаниям.

Прочность бетона определяли в водонасыщенном состоянии через каждые 5 циклов испытаний.

Данные о кинетике изменений прочности бетона в процессе испытаний приведены в таблице 4, а в таблице 5 приведены результаты параллельного определения изменения массы образцов после водонасыщения в процессе испытаний, которые отражают кинетику изменений количества поглощаемой (высушиваемой) бетоном воды в пределах одного цикла. По существу эти данные характеризуют процесс изменений капиллярной пористости бетона в ходе испытаний под действием разрушающих структуру бетона факторов: миграции жидкости, деформаций от перепада температур при высушивании (твозд. $\sim 70^{\circ}\text{C}$) – насыщении ($t \text{ H}_2\text{O} \sim 15^{\circ}\text{C}$), усиленного тем, что образцы не охлаждали после сушки [12], а помещали в относительно холодную воду сразу, полностью погружая их (т.е. создавая объемно-напряженное состояние из-за «термического удара»).

Одновременно с деструктивными «накладывается» действие благоприятного фактора: продолжение процесса гидратации цемента под совокупным действием повышенной температуры и влаги, поглощаемой порами при периодическом водонасыщении. Действие этих взаимно исключаящих факторов очевидно отражается

данными таблиц 4 и 5. Так прочность образцов бетона на ПЦ М500 Д0 возрастает до 10-15 циклов насыщения-высушивания, а затем кратковременно стабилизируется и начинает снижаться.

Изготовление бетона с использованием портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева в целом не изменяет означенную тенденцию, но процесс снижения прочности образцов бетона ускоряется.

Таблица 4. Прочность бетона при циклическом насыщении-высушивании

№	Характеристики бетона:				Прочность бетона, МПа, после количества циклов:						
	Ц, кг	Миндобавка		Добавка СП, % от СВ	0	5	10	15	20	25	30
		кг	%								
1	350	-	-	-	24,7	26	28	28	26	24	22
2	280	70	20	-	22	22,8	22,5	22	21	21	17
3	280	70	20	1,0	25,5	25	25,0	25	24	24	23
4*	280	70	20	-	24,5	24,8	27	27	25	24	21

* на свежемолотом портландцементе с минеральной добавкой

Таблица 5. Изменение количества воды при насыщении-высушивании образцов

№	Характеристики бетона:				Количество поглощаемой-воды (г) после числа циклов						
	Ц, кг	Миндобавка		Добавка СП, % от СВ	0	5	10	15	20	25	30
		кг	%								
1	350	-	-	-	32,5	35	37,5	39	41	42	46
2	280	70	20	-	40	42	42	43	43	44	48
3	280	70	20	1,0	35	35	35	37	39	41	45
4*	280	70	20	-	42	42	42	42	43	44	46

* на свежемолотом портландцементе с минеральной добавкой

При этом влияние «лежалого» (> 90 сут хранения) и свежемолотой на портландцементе с минеральной добавкой с существенно различается. Если сравнить данные, относящиеся к составам № 3 и № 4*, которые характеризуются равным расходом цемента (280 кг) и миндобавки (70 кг или 25 % от массы цемента в смешанном вя-

жушем), становится очевидной эффективность использования добавки свежемолотого гранитного отсева.

Данные, относящиеся к составу № 3 (бетон приготовлен с пластифицирующей добавкой при снижении расхода воды на 12-15 % относительно состава № 3), в котором равное с составом № 2 содержание цемента (280кг) и миндобавки (70 кг) подтверждают эффективность использования пластификатора в бетоне на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева.

Отмеченные тенденции изменения прочности бетона на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева корреспондируются с изменениями количества воды, «поглощаемой» образцами в процессе циклического насыщения-высушивания. Как уже отмечалось в настоящем разделе эти данные характеризуют увеличение объема открытой (сообщающейся) капиллярной пористости цементного камня и бетона в целом.

При этом на начальном этапе (до 5-10 циклов для бетона на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева) прирост количества воды, поглощаемой порами, отражает углубление процесса гидратации цемента, проявляющегося в росте прочности бетона. В дальнейшем рост количества поглощаемой воды характеризует увеличение объема макрокапиллярной пористости бетона под влиянием деструктивных факторов циклических испытаний.

Необходимо отметить, что рост пористости бетона связан и с воздействием знакопеременных деформаций при нагреве и резком жидкостном охлаждении, особенно по поверхности (в наружных слоях) бетонных образцов. Накапливающиеся дефекты структуры катализируют рост водопоглощения и снижения прочности бетона. При этом очевиден этот отрицательный эффект с увеличением количества вводимой минеральной добавки.

Обобщая изложенные экспериментальные данные можно сделать следующие выводы о влиянии портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева на водостойкость бетона.

В условиях эксплуатации в воде или грунтах (подводные и подземные части зданий и сооружений) изготовление бетона на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного

отсева допустимо, т.к. при этом обеспечивается стабильный рост прочности бетона.

Снижение прочности бетона в проектном возрасте при использовании «лежалого» (> 90 сут в экспериментах) портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева составило 13,6 %.

В случае применения свежемолотого портландцемента с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева снижение прочности бетона в проектном возрасте не наблюдалось, что подтверждает гипотезу о взаимодействии вещества добавки с продуктами гидролиза цемента с образованием дополнительного количества новых фаз, способствующих уплотнению структуры бетона. Очевидно, что в свежемолотом гранитном отсеке присутствуют тонкодисперсные фракции, являющиеся катализатором процесса формирования кристаллогидратов в твердеющем цементном камне и, возможно, они проявляют свойства химически активного вещества.

Одинаковые тенденции в процессе сорбции воды твердеющим цементным камнем (бетоном в целом) без и в присутствии минеральной добавки, установленные по изменению массы образцов, свидетельствуют о стабильности структуры и идентичности закономерностей ее формирования при условиях твердения в неагрессивной и благоприятной среде.

В условиях испытаний эксплуатации при попеременном увлажнении-высушивании изготовление бетона на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева снижает его устойчивость, что проявляется в более высоком темпе снижения прочности бетона.

В процессе циклического увлажнения-высушивания растет водопоглощение бетона, как отражение роста открытой (сообщающейся) макрокапиллярной пористости, что может сопровождаться снижением морозостойкости бетона на портландцементе с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э.И. Гранитный отсев 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. –с.73-79.;

3. Мощанский Н.А. Плотность и стойкость бетонов. – М.: Госстройиздат, 1961.

4. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965.

5. Юнг В.Н., Бут Ю.М., Журавлев В.Ф., Окоороков С.Д. Технология вяжущих веществ. – М.: Промстройиздат, 1952.

6. Цытович Н.А., Сумгин М.И. Основания механики мерзлых грунтов. – М.: Изд. АН СССР, 1937.

7. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Госиздат, 1968.

8. Дубинин М.М. Пористая структура и свойства материалов. RILEM – JURAS. Международный симпозиум. Прага, 1973.

9. Дерягин Б.В. Упругие свойства тонких слоев воды. Ж-л физической химии, т.3, вып. 1, 1932.

10. Федякин Н.Н. О температурном расширении воды в микрокапиллярах. Доклады АН СССР, т. 138, № 6, 1961.

11. Иванов Ф.М. Коррозионные процессы и стойкость бетона в агрессивных средах. –Автореф. дис. на соиск. ученой степени доктора технич. наук, 1969.

12. Ступаченко П.П. Структурная пористость и ее связь со свойствами цементных, силикатных и гипсовых материалов. Тр. Дальневосточного политехнического ин-та им. В.В. Куйбышева. Т.63, вып. 1. Владивосток, 1964.

13. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стрйиздат, 1980. – 536 с.

14. Лещинский М.Ю. Испытание бетона: Справ. Пособие. – М.: Стройиздат, 1980. – с. 286-289.

15. Дементьев Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона. – Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат, 1955- 120 с.

16. Попов Н.Д., Невский В.А. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей

среды. Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева. Сб. № 15. – М., 1957.- С. 73-90.

17. Шестоперов С.В. и др. Цементный бетон в дорожном строительстве. – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.

18. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. – М.: - Л.: Госэнергоиздат. 1953. – 330 с.

19. Конопленко А.И. К вопросу теории морозостойкости бетона. В сб. тр. Ростовского инженерно-строит института. Вып. XII. – Ростов –на-Дону, 1958.

20. Мощанский Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. – М.: Госстандарт, 1962. – 235 с.

21. Collins A. The destruction of concrete by frost, Institute of Civil Engineers 1944 nov.p.5412.

22. Powers T. A working hypotesis for further studies of frost resistance of concrete. J. Am. Coner. Inst., 1945, № 4, v. 16.

23. Powers T., HelmuthR. Theory of volume changes in hardened portland – cemnt paste during freezing/ Proceedings Hig way Research Board, 1953, v. 32.