

Романенко И. И., канд. техн. наук, доц.,
Пинт Э. М., канд. техн. наук, проф.,
Романенко М. И., студент

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ДЕФОРМАЦИИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИВОДЯЩИЕ К ОБРАЗОВАНИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН

rom1959@yandex.ru

Установлено, что введение в состав шлакощелочного вяжущего $S_{y0}=1800 \text{ см}^2/\text{г}$ тонкодисперсных отходов производств, например гранитной пыли с удельной поверхностью $S_{y0}=4100 \text{ см}^2/\text{г}$ снижает внутренние усадочные напряжения приводящие к образованию поверхностных трещин. Композиционное вяжущее приготовленное на основе молотых доменных шлаков, гранитной пыли и портландцемента позволяет снизить вероятность образования усадочных трещин как в начальный момент набора прочности так и в возрасте 90 суток.

Ключевые слова молотый граншлак; гранитная пыль; удельная поверхность; усадка; трещинообразование; испарение влаги; прочность на сжатие.

Начало двадцать первого века ознаменовались значительными достижениями в технологии бетона. В эти годы получили широкое распространение новые эффективные вяжущие, гиперпластификаторы - модификаторы вяжущих и бетонов, технологические приемы в производстве бетонов.

Особой задачей является создание бетонов с максимальным использованием техногенного сырья и продуктов переработки при сохранении высоких эксплуатационных свойств композиционных материалов. Забота о сохранении природных ресурсов и окружающей среды, экономном использовании энергии стимулирует эту деятельность. Этой тематике посвящены работы Баженова Ю.М., Комохова П.Г., Калашникова В.И., Хозина В.Г., Рахимова Р.З., Тараканова О.В. [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Однако с достижением высоких показателей прочности бетонов, их технологичности и экономичности не решается в полной мере вопрос по снижению трещинообразования в цементном камне в возрасте 10–90 суток, когда прочность бетона на сжатие достигает $200\text{--}300 \text{ кг/см}^2$. Причина склонности бетонов к трещинообразованию заключается как во внутренних, так и во внешних процессах. На наш взгляд в причинах разрушения целостности цементного камня за счет образования поверхностных трещин лежит усадка и тонкость помола вяжущего.

Усадка цементного теста наступает с момента затворения вяжущего водным раствором и зависит она от продолжительности схватывания, интенсивности испарения поверхностной влаги, интенсивности снижения влажности образца в результате гидратации. Это так называемая первичная причина вызывающая усадку. Вторичная усадка зависит от содержания в бетоне алюминатов, щелочей, тонкости помола вяжущего.

Н.А. Мощанский [7], З.Н. Цилосани [8], А.Е. Шейкин [9], Г.Л. Калосук [10] по разному

склонны рассматривать процессы приводящие к деформации цементного камня в бетоне при твердении и вызывающие образование поверхностных трещин. Единого мнения нет.

В своей работе [11] О. Врано считает, что наибольшее влияние на усадку оказывает наличие в бетоне микропор диаметром 0,01–15 мкм. В которых наблюдается рост капиллярного давления. Увеличение содержания в мелком заполнителе пылевидных фракций (крупностью $\leq 0,063 \text{ мм}$) приводит к увеличению содержания капиллярных микропор.

Усадка при высыхании интенсивно происходит впервые 10–12 ч, причем, чем больше срок предварительной выдержки перед высыханием, тем ниже усадка. С. Гото [12] установил, что усадка цементного камня при $V/C=0,3$ и относительной влажности 35, 50 и 70 % через 20 ч составляет соответственно 0,33, 0,25 и 0,09 %. Из чего следует, что движущей силой усадки являются капиллярные силы и силы, возникающие при удалении межслоевой воды из гидросиликатов кальция.

Если псевдоразжижать цементный гель в конечной стадии формирования коагуляционной структуры, как считает И. Н. Ахвердов, то деформации контракционного происхождения в цементном камне не возникают вновь, так как основная часть усадочных деформаций проявляется в стадии коагуляционного структурообразования цементного геля [13].

Основной целью наших исследований явилось изучение процессов твердения и кинетики набора прочности композиционных материалов-бетонов на основе техногенных отходов производств и мелких некондиционных песков. При этом решаются следующие задачи: - получение мало затратных и дешевых бетонов, но в тоже время отвечающих всем требованиям, по долговечности предъявляемым к конструкциям из этих бетонов.

Применение техногенных отходов позволит выпускать гидравлическое вяжущее со специальными свойствами, которое может заменить портландцемент для низкомарочных растворов и бетонов. Речь не идет о полной замене портландцемента, а только о расширении номенклатуры выпускаемых вяжущих.

Наличие гранитной пыли объемом 35–45 т/сут. с удельной поверхностью 2000–4400 см²/г и молотых доменных граншлаков новолитецкого металлургического комбината (НМК) с удельной поверхностью 1700–1830 см²/г способствовали разработке вяжущего для получения бетонов прочностью 10,0–90,0 МПа. Первая задача которую решили - это гарантированное получение бетонов прочностью 300 кг/см².

Для проведения исследований использовали следующие материалы: портландцемент М500 Д0 «Мордовцемент», дисперсная гранитная пыль «Павловского» карьера, молотый граншлак НМК, песок овражный с модулем крупности $M_{кр}=1,2$ Пензенской области, щебень гранитный фракции 5–10 мм прочностью 1000–1200 кг/см² «Павловского» карьера, жидкое стекло с силикатным модулем 1,65. В качестве пластификатора применяли гиперпластификатор «Одолит-К» в количестве 0,8 % от минеральной составляющей вяжущего вещества.

Вяжущее готовили в шаровой лабораторной мельнице. Ингредиенты в заданной пропорции смешивались в мельнице. Время механической активации композиционного вяжущего составляло 40 минут. Варьировалось содержание граншлака, гранитной пыли и портландцемента. В табл. 1 приведены составы композиционного вяжущего используемых для исследований свойств тяжелых бетонов.

Из полученных составов вяжущих изготавливались бетоны одного состава. Формовались кубики размером 100×100×100 мм по 6 образцов на одно испытание. Образцы твердели в нормальных условиях при температуре 20 °С и влажности 90 %. Испытания проводили в возрасте 3, 14, 28 и 90 суток. Составы бетонной смеси и результаты испытаний бетонов на сжатие представлены в табл.2. Причем, условия твердения бетонов помимо камеры нормального твердения моделировали в условиях полного погружения в ванну при температуре воды 20 °С, твердение в ванной, когда образцы бетона изолированы от взаимодействия с водой полиэтиленовой пленкой, твердение на воздухе при температуре 20 °С и влажности 64 % и твердение после извлечения образцов бетона из форм после ТВО на воздухе при движении воздушного потока со скоростью 0,7 м/с.

Таблица 1

Составы композиционного вяжущего

№ пп	Ингредиенты	№ состава, %										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Молотый граншлак $S_{уд}=1800 \text{ см}^2/\text{г}$	100	80	70	50	30	20	10	10	-	-	-
2	Портландцемент $S_{уд}=3450 \text{ см}^2/\text{г}$	-	-	20	30	50	50	60	70	80	100	-
3	Гранитная пыль $S_{уд}=4100 \text{ см}^2/\text{г}$	-	20	10	20	20	30	30	20	20	-	-
4	Молотый граншлак $S_{уд}=3500 \text{ см}^2/\text{г}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100

Из полученных данных (табл. 2) видно, что наибольшую прочность получили составы № 1, 2. В качестве вяжущего применяли шлакощелочное. Прочность на сжатие состава № 2 превышает прочность состава № 10 (контрольный состав) приготовленного на портландцементе на 62,1 %. В тоже время на поверхности бетонных образцов состава № 1 через 18 суток твердения в камере нормального твердения образуется мельчайшая сеть микротрещин (рис. 1). Располагаются они на поверхности, контактирующей с воздухом. Через 3 дня микротрещины образовали сеть, которая перешла и на боковые грани образцов. Прочность на сжатие в 28 суточном возрасте составила 43,2 МПа, а в возрасте 90 суток-35,5 МПа. Сброс прочности составляет-17,82 %.

Особый интерес представляют бетонные образцы состава №1 при твердении на воздухе и скорости движения воздушных масс со скоростью 0,7 м/с. Данные образцы после формовки подвергались тепловлажностной обработки при

температуре изотермического выдержки $82 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ по режиму 3+6+6. Прочность на сжатие после ТВО составляла 292 кг/см². Образцы были оставлены для дальнейшего набора прочности на сквозняке при температуре воздуха 20 °С. Через трое суток твердения на сквозняке образовались поверхностные трещины. Ширина их раскрытия составляла от 0,5 до 1,2 мм. Прочность на сжатие 48,5 кг/см².

Образцы бетона состава №1 твердевшие в воде как в полиэтилене, так и в контакте с водой на поверхности имеют сеть микротрещин. Они появились в интервале 40–50 суток с поверхности и в дальнейшем с выходом на боковые грани (рис. 2).

Прочность бетонных образцов на основе состава вяжущего № 2 имеют на 20–44 % выше прочности образцов состава №1. Поверхностных трещин нет при всех условиях твердения, предусмотренных условиями эксперимента.

Таблица 2

Кинетика набора прочности бетонов при твердении в камере нормального твердения

№ Композиционного вяжущего	Расход ингредиентов бетонной смеси, кг/м ³						Осадка конуса, см	Прочность бетона на сжатие в возрасте сут. Нормального хранения, Мпа			
	Вяжущее, кг	Жидкое стекло, % / кг	Гиперпластификатор- «Одолит», %	Пески фракций (0,16-0,63)+(0,63-2,5)	Щебень фракции 5-10 мм	Вода		7	14	28	90
1	300	5,6 /16,8	-	735 (245+490)	1155	175	8	22,0	31,2	42,3	35,5
2	300	5,6 /16,8	-	735 (245+490)	1155	175	7-8	26,4	35,3	45,4	51,3
3	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	7	2,1	3,4	5,2	6,8
4	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	7	3,0	5,9	9,7	11,3
5	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	7	7,7	13,4	18,8	22,4
6	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	7-8	13,5	23,4	32,8	37,8
7	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	7	16,8	33,0	40,0	44,9
8	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	7	12,5	24,5	34,1	40,1
9	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	8	14,7	16,4	28,9	35,4
10	300	-	0,8%	735 (245+490)	1155	175	8	10,1	15,8	28,0	33,1
11	300	5,6 /16,8	-	735 (245+490)	1155	175	6	26,6	37,1	44,8	52,8



Рис. 1. Сетчатые трещины на поверхности бетонных кубиков, состав №1 через 18 суток твердения в камере нормального твердения

Усадка всегда вызывает возникновение напряженного состояния в бетоне. Устранить полностью деформации цементного камня при усадке полностью невозможно. Правильно подобранным составом бетона по количеству вяжущего, наполнителя мелкодисперсного, заполнителя с его деформативными свойствами и фракционным составом можно уменьшить напряжения в бетоне от усадки. Однако и в этом случае бетон может получить значительные нарушения

в результате внешнего массообмена бетона со средой. Испарение влаги на ранней стадии интенсифицирует развитие сжимающих капиллярных сил, вызывающих значительную усадку бетона, находящегося в пластическом состоянии. Интенсивное испарение влаги под действием движения воздушных масс вызывает неравномерное ее распределение по сечению изделия, что способствует развитию неравномерной усадки, возникновению напряженного состояния и нарушению целостности бетона. В результате чего происходит зарождение трещин на поверхности образца со стороны наиболее интенсивной потери влаги. Данное заключение подтверждается проведенными нами экспериментами.

Относительная влажность окружающей среды также значительно влияет на усадку бетона. Бетон, хранящийся в сухих условиях, претерпевает усадку, но набухает в воде или атмосфере со 100%-ной влажностью [14]. Это указывает на то, что парциальное давление водяных паров внутри цементного камня всегда меньше, чем давление насыщенного водяного пара. Лорман установил существование промежуточной влажности (94 %), при которой бетон находится в гигроскопическом равновесии.

Но твердение образцов бетона в водной среде при постоянстве температуры, отсутствия интенсивного испарения влаги и неравномерного распределения ее по сечению процессами усадки полностью не объяснить. Возможно, здесь присутствуют факторы характеризующие гидратацию частиц вяжущего, и интенсивность образования гелевидных продуктов на поверхности гидратируемых частиц.

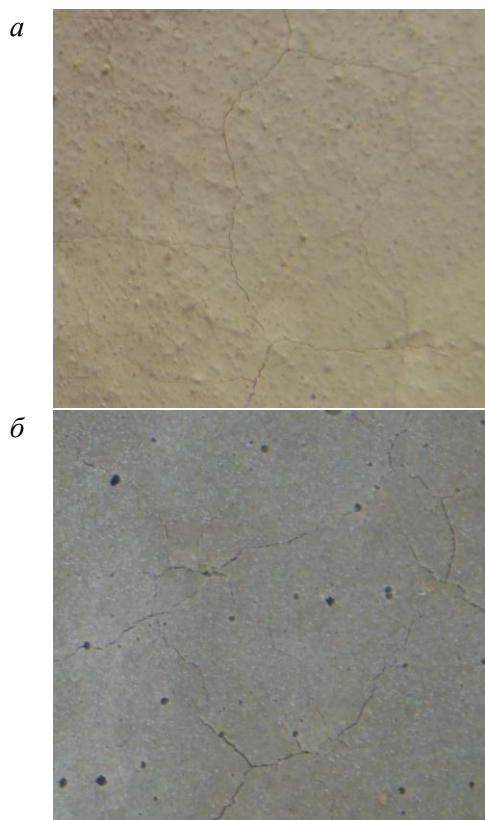


Рис. 2. Сетчатые трещины на поверхности бетонных кубиков, состав №1 твердения в ванне при температуре воды 20⁰С: *а* – контакт с водой, через 38 суток; *б* – изолирована поверхность полиэтиленовой пленкой, через 50 суток



Рис. 3. Сетчатые трещины на поверхности бетонных кубиков, состав №1 прошедшего ТВО, через 3 суток твердения на сквозняке при скорости движения воздушных масс 0,7 м/с

Фазовый состав продуктов твердения шлака, площадь и тип контакта между частицами вяжущего и заполнителем, плотность продуктов гидратации, общая пористость и распределение пор по размеру являются факторами, определяющими как прочность, так и долговечность искусственного камня [15]. Причина недолговечности искусственного бетонного камня скрывается в дисперсности вяжущего, в особенностях его химического и фазово-минералогического состава,

в условиях твердения и взаимодействия с окружающей средой.

Трещинообразование в цементном камне на основе молотого доменного граншлака в присутствии большого количества свободной щелочи, наряду с высокой концентрацией, следует считать также размер частиц молотого шлака.

Набор прочности шлакощелочного камня определяется формированием промежуточных неравновесных фаз, в случае достижения фазовых равновесий возможно произойдет сброс набранной прочности. Этими процессами можно объяснить незавершенность некоторых химических реакций, которые протекают в твердеющем шлакощелочном камне. Реакция гидратации шлакового стекла в щелочной среде камня протекают лишь частично с поверхности. Глубина проникновения щелочи внутрь крупных частиц шлаковых зерен не значительна. При этом наблюдается неполный выход продуктов гидратации на поверхность за счет образования плотной капсулирующей оболочки. Оболочка проницаема для щелочного раствора, но непроницаема для продуктов гидратации и в результате чего повышается внутреннее напряжение в системе. Впоследствии с изменением внешних условий набора прочности бетоном, а именно температуры, влажности окружающей среды - распределение влаги внутри образца по сечению не равномерно, что способствует разупрочнению цементного камня и саморазрушению за счет неравномерного распределения внутренних напряжений. Движение влаги к наружной грани приводит к образованию поверхностных трещин (рис.2 *а, б*).

Тонкий размол сырьевой шихты вяжущего (удельная поверхность 3000–4500 см²/г) снижают опасный порог образования трещин в период набора прочности (табл.1, 2; состав 11). Повышение удельной поверхности молотого граншлака до 3000–4500 см²/г с 1800 см²/г способствует повышению прочности бетонов, и снижению интенсивности усадки в процессе твердения цементного камня, что в конечном счете позволит снизить вероятность образования поверхностных трещин и нарушения целостности бетонов.

В шлакощелочных вяжущих всегда присутствует избыточное количество свободной щелочи, взаимодействие которой с реакционно активным кремнеземом (песок) приводит к образованию зон с повышенным внутренним напряжением, к образованию трещин, а в дальнейшем к разрушению.

Введение тонкодисперсной составляющей вяжущего на основе пыли от дробления гранитного щебня в количестве 20 % способствовало получению прочности на сжатие в 28 суточном возрасте твердения 45,4 МПа. Наличие поверхностных трещин на образце бетона в возрасте 90 суток не обнаружено. Прочность бетона на сжа-

тие 51,3 МПа. По сравнению с 28 суточными показателями прирост составил 12,99 %.

Бетоны, изготовленные без применения щелочного компонента вяжущего (составы №3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) обладают высоким сопротивлением к образованию поверхностных трещин за счет снижения усадочных напряжений и высокой удельной поверхностью вяжущего.

Прочность в возрасте 28 суток колеблется в зависимости от вяжущего от 5,2 до 40,0 МПа.

Наиболее оптимальный состав вяжущего по нашим исследованиям является №7 (таб.1). Где содержание портландцемента 60 %, молотого граншлака 10 % и гранитной пыли 30 %. Такая композиция вместе с гиперпластификатором «Одолит-К» в количестве 0,8 % от минеральной части вяжущего позволяет получить бетоны прочностью 40,0 МПа.

Расход вяжущего на 1 м³ бетонной смеси составляет 180 кг. Мелкодисперсная составляющая вяжущего (портландцемент, молотый шлак, гранитная пыль) приводит к уменьшению свободной воды в системе за счет адсорбционно-связанной. В результате введения в систему гиперпластификатора изменяются реологические и технологические свойства бетонной смеси. Разжижающий эффект наблюдается в большей мере при взаимодействии гиперпластификатора с мелким заполнителем, чем с частицами портландцемента.

Выводы

1. Представлены результаты исследований кинетики набора прочности и условия образования усадочных трещин в бетонах изготовленных на основе техногенных отходов производств, позволивших установить закономерности развития усадочных трещин в этих бетонах.

2. Вяжущее модифицированное тонкомолотыми отходами производств (пыль от дроблений гранитных пород с $S_{уд}=4100 \text{ см}^2/\text{г}$, молотые доменные граншлаки с $S_{уд}=1800 \text{ см}^2/\text{г}$) и некондиционными песками позволяют повысить терециностойкость бетонов.

3. При $S_{уд}=1800 \text{ см}^2/\text{г}$ молотого граншлака выявлена оптимальная величина введения в шлакощелочное вяжущее гранитной пыли с удельной поверхностью $S_{уд}=4100 \text{ см}^2/\text{г}$, что составляет 20 % от массы композиционного шлакощелочного вяжущего.

4. При минимальном расходе портландцемента и использовании техногенных отходов производств возможно получение рентабельного бизнеса по выпуску изделий из бетона или производства сухих бетонных смесей различных марок для ремонтных и других видов строительных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М., Калашников В.И., Демьянова В.С. Модифицированные высококачественные бетоны. - М, Изд-во АСВ, 2006. С-368.

2. Комохов П.Г. Влияние внутренних и внешних факторов на влажностную усадку цементных систем/ П.Г. Комохов, А.М. Харитонов // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – №2. – С. 95–97.

3. Калашников В.И. Новые геополлимерные материалы из горных пород, активированные малыми добавками из шлака и щелочей / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, Н.И. Макридин, А.А. Карташов // Строительные материалы. – 2006. – №6. – С.93.

4. Хозин В.Г. Модификация цементных бетонов малыми легирующими добавками / В.Г. Хозин, Н.Н. Морозова, И.Р. Сибгатуллин, А.В. Сальников // Строительные материалы. – 2006. – №10. – С. 30–32.

5. Рахимов Р.З. К комплексному использованию шлаков и бетонного лома в производстве шлакощелочных вяжущих /Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Фатыхов Г.А.// Известия КазГАСУ, Строительные материалы и изделия. 2011-№2.-С. 218-233.

6. Тараканов О.В. Формирование микроструктуры наполненных цементных материалов/ Е.О. Тараканова //Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №8.– С.13–16.

7. Мощанский Н.А. Плотность и стойкость бетонов/ Н.А. Мощанский. – М.: Госстройиздат, 1951. – С.175.

8. Циросани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1963.

9. Шейкин А.Е., Якуб Т.Ю. Безусадочный портландцемент. – М, Стройиздат, 1966. – С.13.

10. Калаусек Г.Л. Процессы гидратации на ранних стадиях твердения цемента /Г.Л. Калаусек //VI международный конгресс по М, Изд-во «Наука», 1986.- Физико- химические основы формирования структуры цементного камня/ Под редак. Л.Г. Шпыновой

11. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны.- М, 1990.С.132.

12. Vrana O. Vplyv jemnych frakcii kameniva na porovu strukturu a zmrastovanie betonov. Влияние мелких фракций заполнителя на поровую структуру и усадку бетонов. //Stavebn. cas. – 1987. – №1. – pp. 3–22.

13. Goto S. The drying shrinkage of cement paste. Усадка цементного камня при высыхании. //Сэмэнто конкурито=Cem. and Concr. –1989. – №508. – С. 25.

14. Ахвердов И.Н. Теоретические основы бетоноведения: Учеб. Пособие. – М.: Выш. шк., 1991. – С.188 .

15. Nagamatsu S., Kawakami Y. Shrinkage and stress caused by drying of concrete. Усадка и усадочные напряжения при высыхании бетона. //Rev. 31st Gen. Meet. Techn. Sess., Tokyo, -1977. - pp.151–153.