

# СТРОИТЕЛЬСТВО И СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 691:53.217

## ПРЕССОВАННЫЙ БЕТОН С ОПТИМАЛЬНЫМИ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ

*В.В. Белов*

Бетонные изделия, пользующиеся сегодня очень большим спросом, такие как дорожные и тротуарные камни, плиты и бортовые камни, в основном изготавливаются из полусухих бетонных смесей. Производство бетонных и железобетонных труб – одна из важных областей применения полусухих бетонных смесей. Перспективным решением проблемы энерго- и ресурсосбережения является технология кирпича на цементном вяжущем с использованием высоких давлений прессования (гиперпрессования), которая позволяет исключить пропаривание за счет снижения количества макропор в изделии, увеличения сырцово-прочности, ускорения процесса формирования структуры цементного камня в нормальных условиях. При этой технологии наибольшее значение приобретает подбор составов композиций для изготовления прессованного мелкозернистого бетона, которые должны обеспечивать не только необходимое количество цементирующего вещества, но и оптимальное распределение его в представительском объеме композита, а также оптимальную гранулометрию заполнителя с целью достижения возможности наиболее плотной упаковки зерен, снижения упругого расширения прессовки после снятия давления и исключения перепрессовочных трещин. На сегодняшний день подбор состава и оптимизирование полусухих бетонных смесей происходят опытным путем либо на основании гипотетических предположений.

В трехфазных (твердое – жидкость – газ) цементных сырьевых смесях при малых значениях водоцементного отношения (В/Ц), т.е. при неполном заполнении межзерновых пор цементной системы водой (и цементным тестом), что имеет место при получении изделий способом полусухого прессования, преобладающими силами взаимодействия между цементными частицами и зернами заполнителя в начальный момент после затворения являются силы капиллярного сцепления. Поэтому на взаимосвязь прочности затвердевшего материала с влажностью сырьевой смеси оказывают влияние процессы капиллярного структурообразования. Важнейшим процессом капиллярного структурообразования в системах, состоящих из грубодисперсной и тонкодисперсной фракций, к которым относятся смеси заполнителя и минерального вяжущего, является глобулирование. Оно выражается в налипании частиц вяжущего на поверхность зерен заполнителя с образованием агрегатов-глобул [1]. В результате глобулирования прочность и плотность материала в указанных зонах повышается, что способствует увеличению прочности затвердевшего материала в целом. При разной влажности сырьевой смеси, т.е. разным водотвердом отношении, степень глобулирования или налипания частиц вяжущего на поверхность зерен заполнителя неодинакова, что неизбежно влияет на прочность прессованного бетона при его одинаковой первоначальной пористости [2].

В работе [3] показано, что значения влажности  $W_{\text{мр}}$  и водоцементного отношения (В/Ц)\*, соответствующие максимальному глобулированию и максимуму прочности цементного мелкозернистого бетона, зная относительное содержание в системе соответственно тонкодисперсного (вяжущего) и грубодисперсного (заполнителя) компонентов, а также их удельные поверхности по БЭТ, можно рассчитать по формулам

$$W_{\text{мр}} = \frac{W_{\text{нк}}^{\text{н}}}{1+C} \cdot \left( 1 + C \cdot \frac{S_{\text{уп}}^{\text{н}}}{S_{\text{уп}}^{\text{н}}} \right), \quad \text{В/Ц}^* = \frac{W_{\text{нк}}^{\text{н}}}{100} \cdot \left( 1 + C \cdot \frac{S_{\text{уп}}^{\text{н}}}{S_{\text{уп}}^{\text{н}}} \right),$$

где  $W_{нк}^н$  – влажность капиллярного насыщения цемента, %;  $S_{уп}^н$  и  $S_{уп}^п$  – удельная поверхность по БЭТ цемента и песка соответственно,  $m^2/kg$ ;  $C$  – соотношение между песком и цементом по массе.

Влажность капиллярного насыщения цемента  $W_{нк}^н$ , как показали эксперименты, составляет  $0,74V_п$  ( $V_п$  – водопотребность цемента в процентах, определяемая по стандартной методике).

Соотношение между песком и цементом в сырьевой смеси определяется из следующих соображений. Известно наличие трех основных типов структуры композиционного материала, включающего заполнитель или микрозаполнитель (наполнитель) и цементирующее вещество. При этом в зависимости от относительного содержания этих основных элементов твердой фазы материала, которые функционально играют роль упрочняющего и матричного компонентов, различают порфировый, контактный и законттактный типы структур. Порфировой принято называть структуру, в которой зерна или дискретные частицы разделены толстыми прослойками, т.е. для зерен или частиц характерно «плавающее» расположение в материале. Если зерна или частицы контактируют через тонкие прослойки вяжущего при сохранении ее непрерывности и сплошности, то такую структуру называют контактной. При непосредственном контакте дискретных элементов, когда вяжущего вещества недостаточно для сохранения своей непрерывности и сплошности, говорят о законттактной структуре.

При использовании этих представлений можно выделить оптимальные структуры конгломерата, которые образуются в результате капиллярного структурообразования и оптимального распределения цементирующего вещества в зависимости от его относительного содержания в представительском объеме материала (рис. 1).

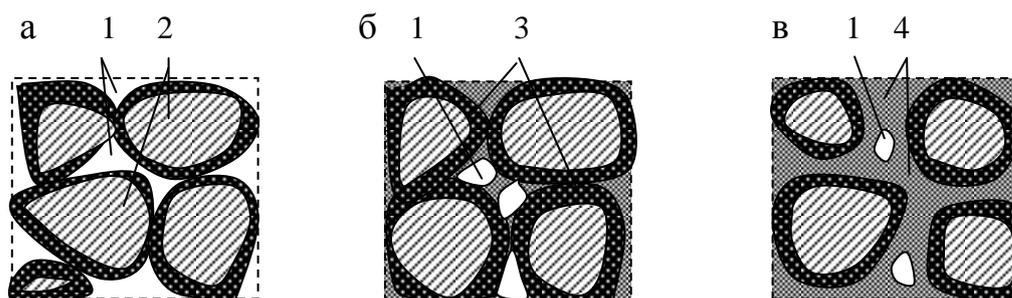


Рис. 1. Виды структур композита, изготовленного из сырьевой смеси с оптимальной влажностью, в зависимости от относительного содержания цементирующего вещества в представительском объеме материала:

- а – законттактная; б – контактная; в – порфировая; 1 – незаполненные поры;
- 2 – зерна заполнителя; 3 – контактный слой;
- 4 – цементирующее вещество в объемном состоянии

Первый тип оптимальной структуры композита (рис. 1а) характеризуется относительно небольшим содержанием цементирующего вещества в представительском объеме материала, при котором практически все цементирующее вещество в результате сгущения тонкодисперсных частиц цемента на поверхности грубодисперсных зерен песка и в зонах контакта последних под действием капиллярного сцепления находится в пленочном состоянии в контактных слоях, а в материале имеется большое количество незаполненных пустот. Этот тип структуры нестабилен и весьма критичен по отношению как к содержанию цементирующего вещества, так и к значению влажности сырьевой смеси. В материале с таким типом структуры количество связей, воспринимающих нагрузки, мало, а возникающие напряжения концентрируются в точках контакта зерен, что снижает прочность материала.

Второй тип оптимальной структуры композита (см. рис. 1б) характеризуется наличием максимально возможного количества связей при умеренном количестве цементирующего вещества. Здесь наблюдается контактирование дискретных частиц непосредственно через контактные прослойки цементирующего вещества без опасности прорыва последних, причем в

межзерновых пустотах цементирующее вещество находится в объемном, более ослабленном, чем в пленочном, состоянии. Этот тип структуры достаточно стабилен и некритичен в определенных пределах по отношению как к содержанию цементирующего вещества, так и к значению влажности сырьевой смеси.

Третий тип структуры (см. рис. 1в) формируется при большом количестве цементирующего вещества. В этом случае контактные прослойки цементирующего вещества на частицах заполнителя могут отдаляться друг от друга, а промежутки между ними занимать более ослабленные зоны матричного компонента, что, очевидно, приведет сначала к замедлению прироста прочности материала с увеличением количества цементирующего вещества, а затем возможно и снижение прочности. Для данного типа структуры характерна размытость экстремума на зависимости прочности бетона от влажности сырьевой смеси, особенно при превышении оптимального значения влажности (более заметное снижение прочности при малых значениях влажности объясняется недостатком воды для реакций гидратации).

Оптимальное содержание цементирующего вещества в прессованном композите объективно оценивается объемно-поверхностными характеристиками в зависимости от удельной поверхности зерен заполнителя, которые должны быть покрыты пленками цементирующего вещества оптимальной толщины. Зная среднюю оптимальную толщину пленок цементирующего вещества, которая обычно составляет около 40 мкм, и удельную поверхность грубодисперсного компонента (без учета микрорельефа поверхности его частиц), можно рассчитать оптимальное содержание цементирующего вещества в сырьевой смеси на единицу массы песка. Тонкие частицы размером менее 40 – 50 мкм в грубодисперсном компоненте должны быть исключены из расчета его удельной поверхности, так как войдут в состав цементирующего вещества, что внесет соответствующие коррективы в эту зависимость.

Оптимальное содержание цементирующего вещества  $V_{цв}^*$  (дм<sup>3</sup>) в расчете на 1 кг песка

$$V_{цв} = 40 \cdot 10^{-3} \cdot S_y^n, \text{ дм}^3.$$

Цементирующее вещество включает в себя негидратированные зерна клинкера с абсолютным объемом  $V_{нгц}$  и гидратированный цемент (цементный гель) с объемом  $V_{гц}$ , т.е. объем цементирующего вещества

$$V_{цв} = V_{нгц} + V_{гц}.$$

Абсолютный объем негидратированного цемента (дм<sup>3</sup>)

$$V_{нгц} = \frac{Ц \cdot (1 - \alpha)}{\rho_{ц}},$$

где Ц – расход цемента по массе, кг;  $\alpha$  – степень гидратации цемента;  $\rho_{ц}$  – истинная плотность цемента, кг/дм<sup>3</sup>.

Объем гидратированного цемента (цементного геля) (дм<sup>3</sup>)

$$V_{гц} = \frac{Ц \cdot \alpha}{\rho_{гц}},$$

где  $\rho_{гц}$  – средняя плотность цементного геля, кг/дм<sup>3</sup>.

Цементный гель, получившийся при полной гидратации 1 кг цемента, содержит 0,2 дм<sup>3</sup> гелевых пор, представляющих собой промежутки между частицами гидросиликатов кальция, и 0,09 дм<sup>3</sup> контракционных пор, образовавшихся вследствие уменьшения абсолютного объема системы «цемент – вода». С учетом того что полная гидратация цемента происходит при минимальном В/Ц = 0,25, а в среднем истинная плотность цемента составляет 3,1 кг/дм<sup>3</sup>, пористость геля, получившегося при полной гидратации 1 кг цемента, вычисляется так:

$$P_{гц} = \frac{0,29}{\frac{В}{\rho_{в}} + \frac{Ц}{\rho_{ц}}} = \frac{0,29 \cdot \rho_{в}}{Ц \cdot \left( \frac{В}{Ц} + \frac{\rho_{в}}{\rho_{ц}} \right)} = \frac{0,29 \cdot 1}{1 \cdot \left( 0,25 + \frac{1}{3,1} \right)} = 0,51 \text{ (~50 \%)}.$$

Поскольку истинная плотность цементного геля составляет  $2,6 \text{ кг/дм}^3$ , при указанной пористости его средняя плотность  $\rho_{гц}$  определяется из соотношения  $0,5 = 1 - \rho_{гц} / 2,6$ , т.е. равна  $1,3 \text{ кг/дм}^3$ .

Объем цементирующего вещества ( $\text{дм}^3$ )

$$V_{цв} = \frac{\rho_{гц} \cdot \alpha}{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}} \cdot \frac{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}}{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}},$$

где  $\rho_{гц}$  – расход цемента, кг.

Соответственно расход цемента

$$\rho_{гц} = \frac{V_{цв} \cdot \rho_{гц} \cdot \rho_{гц}}{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}}.$$

При оптимальном содержании цементирующего вещества расход цемента (кг) в расчете на 1 кг песка

$$\rho_{гц} = \frac{V_{цв} \cdot \rho_{гц} \cdot \rho_{гц}}{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}} = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot S_y^n \cdot \rho_{гц} \cdot \rho_{гц}}{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}}.$$

Оптимальное соотношение между песком и цементом по массе

$$C = \frac{\rho_{гц} - \alpha \cdot \rho_{гц} + \alpha \cdot \rho_{ц}}{40 \cdot 10^{-3} \cdot S_y^n \cdot \rho_{гц} \cdot \rho_{гц}}.$$

С помощью последней формулы можно определить оптимальное соотношение между песком и цементом, исходя из оптимальной толщины пленок цементирующего вещества на зернах заполнителя. Для расчетов по этой формуле необходимо знать степень гидратации цемента в проектном возрасте. Эта величина экспериментально определяется на опытных образцах с помощью соответствующих методов анализа или принимается по литературным данным.

Полученные данные были использованы для развертывания производства гиперпрессованного бетонного кирпича на производственной базе ООО «Гранат» в г. Старице, Тверской обл., а также разработки технических условий и технологического регламента на производство этого нового вида изделий.

Продукция ООО «Гранат» – это облицовочный кирпич, декоративная плитка любой толщины, декоративный кирпич, стеновой кирпич для несущих стен и самонесущих конструкций (рис. 2).

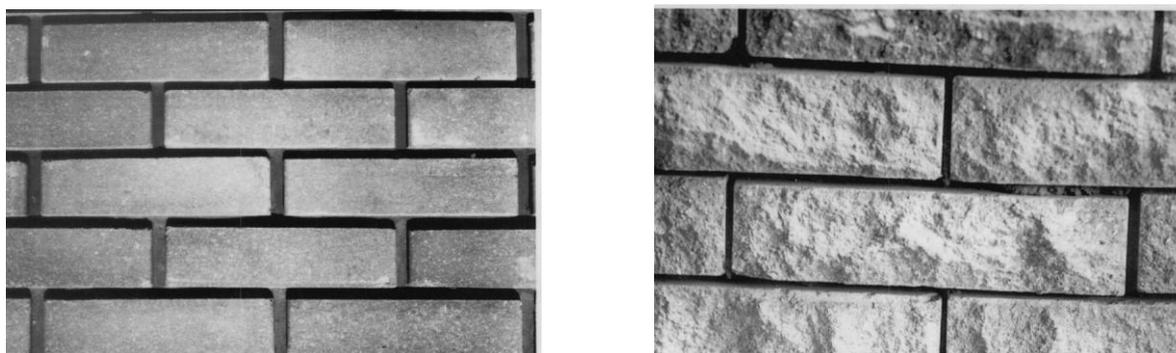


Рис. 2. Кладка из кирпича, выпускаемого ООО «Гранат»

Сочетание физико-механических возможностей, богатство цвета, формы, фактуры и размеров создаёт возможность реализовать самые разнообразные архитектурные и инженерные фантазии застройщика. Цветовая гамма составляет более 120 цветов и оттенков по заказу. Облицовочный кирпич имеет ровные грани и гладкую зеркальную поверхность. При дополнительной обработке наружной поверхности кирпича получаем эффект «дикого камня».

Добавление красителей позволяет изготовить кирпич любой цветовой гаммы (алый, желтый, зеленый, серый, синий, коричневый, черный, белый).

Продукция прошла испытания в лаборатории, аккредитованной Госстроем РФ, полностью соответствует требованиям Технических условий, утвержденных Госстроем РФ, что подтверждено Сертификатом и заключениями. В связи с низкими показателями водопоглощения возможна кладка в зимний период без проявления солевых отложений, которые характерны при кладке керамического кирпича.

Многовариантность форм, размеров, цветовой гаммы изделий, их долговечность позволяют использовать продукцию, выпускаемую по новой технологии, при строительстве индивидуальных домов, многоэтажном монолитном строительстве, для реконструкции старых зданий, облицовки наружных, внутренних стен во всех климатических зонах, облицовки фасадов зданий, отделки интерьеров, устройства малых архитектурных форм и благоустройства территории.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Белов, В.В.** Капиллярное структурообразование в дисперсных системах, применяемых для производства строительных материалов / В.В. Белов // Известия вузов. Строительство. 2002. № 9. С. 46 – 51.

2. **Белов, В.В.** Управление структурой и свойствами композиций для изготовления строительных материалов с учетом действия капиллярного сцепления в дисперсных системах: автореф. дис. докт. техн. наук / В.В. Белов. Пенза: ПГУАС, 2003. 36 с.

3. **Белов, В.В.** Композиционный состав прессованного мелкозернистого бетона / В.В. Белов // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь, 2005. Вып. 6. С. 11 – 15.