

# Строительные материалы и изделия

УДК 666.972

## МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПРЕССОВАННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*С.П. Горбунов, С.Н. Погорелов*

Представлены результаты исследований оптимизации гранулометрического состава цементных систем с позиции снижения пористости композита. Показана роль влияния электролитов и смесей минеральных тонкодисперсных добавок на структурообразование цементных систем вариативной реологии.

*Ключевые слова: портландцемент, тонкодисперсные минеральные добавки, прочность, мелкозернистый бетон.*

При производстве строительных материалов прессование и вибропрессование порошковых масс занимают важное место среди технологических приемов получения готовых изделий. При прессовании порошков основными технологическими параметрами являются давление прессования, влажность формовочной смеси и гранулометрического состава смеси заполнителей, тонкодисперсных наполнителей и вяжущего.

Известно [1], что увеличение давления прессования свыше 40...60 МПа нецелесообразно, так как прирост прочности при этом на единицу давления незначителен. Наличие интервала оптимальной величины давления прессования связывается с различными деформативными свойствами компонентов формовочной смеси, изменением влажности формовочной смеси, формой и геометрией образцов, а также режимами прессования, с которыми работали разные исследователи.

Низкий прирост прочности при увеличении давления выше определенного предела связывают с началом деформации каркаса заполнителя и его последующего упругого расширения после снятия нагрузки, что может быть причиной образования микротрещин, и может приводить к снижению прочности изделия получаемого изделия.

Особенности структурирования порошковых масс в процессе формования протекают через ряд последовательных этапов.

В начальный момент приложения давления частицы перемещаются в направлении действия вектора давления, заполняя крупные поры и разрушая мостики и арки, возникшие в свободно насыпанном порошке. При этом вода выполняет роль смазки, снижая трение между частицами и принимая участие в передаче давления по объему системы.

Деформации частиц практически не происходит, и достигается равновесное положение структурных элементов материала, существенно увеличивается плотность упаковки относительно исходного состояния. Но при этом плотность и площадь

контактов между частицами меняется незначительно, а прочность композита остается низкой (стадия подпрессовки).

В процессе дальнейшего приложения давления (стадия прессования) достигается максимальное уплотнение смеси, характеризуемое критической плотностью, а давление для данной формовочной влажности является критическим. При увеличении усилия прессования система «вода – твердые частицы – заземленный воздух» ведет себя как упругое тело и, после снятия нагрузки, она расширяется. При этом вода, находящаяся между твердыми частицами формовочной смеси, ослабляет точечные и пленочные контакты между частицами, что приводит к снижению прочности. Этим механизмом структурообразования объясняется наличие оптимального давления дисперсных систем, работающих как упругое тело.

При дальнейшем наращивании давления прессования (свыше 100 МПа) начинается деформация частиц порошка, сначала упругая, а затем и пластическая с изменением величины контактной поверхности. Одновременно меняется гранулометрия компонентов смеси. Именно увеличением доли пластических деформаций и массовым дроблением частиц заполнителя (что ведет к активации его поверхности) и объясняют наблюдаемый при этом прирост прочности образцов при увеличении давления прессования более 100 МПа.

Механизм структурообразования дисперсных систем при весьма высоких давлениях интересен сам по себе, но большинство технологий получения прессованных материалов ориентированы на существующее оборудование, обеспечивающее достижение интервала оптимальных давлений.

Каким же образом можно повысить прочностные характеристики материалов в этом случае?

На наш взгляд следует учесть два важных обстоятельства.

Системы, используемые для прессования, по классификации Урьева [2], относятся к высоко-

концентрированным системам с объемной долей твердой фазы  $C_v$  свыше 80 %. Доля тонкодисперсных компонентов гравитационной растекаемости в смеси  $C_v$  может достигать величины 60 % и более. И именно это обстоятельство требует учитывать влияние на структурообразование при прессовании высоких величин поверхностной энергии частиц твердой фазы.

Поровая жидкость в системе «цемент – вода» представлена растворами, ионная сила которых зависит от ряда факторов, а поверхность твердой фазы имеет двойной электрический слой (ДЭС) различных значений величины и знака, характеризуемый  $\zeta$ -потенциалом.

Силикатосодержащие компоненты в основе своей структуры имеют кремнекислородные тетраэдры  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , нескомпенсированные кислородные вершины которых придают поверхности электроотрицательный заряд [3]. При сближении частиц твердой фазы в процессе прессования электростатическое взаимодействие одноименно заряженных поверхностей снижает вероятность увеличения плотности контактов в единице объема. Регулирование этого эффекта возможно за счет снижения значения ДЭС вплоть до перезарядки поверхности введением в систему электролита.

Вторым моментом повышения прочности является известный прием оптимизации гранулометрии смеси. Усиление этого эффекта, по-видимому, возможно при использовании зерен различного модуля упругости. Высокомодульные – формируют жесткий пространственный каркас упругого тела. Низкомодульные (желательно проявляющие гидравлическую активность) – повышают степень упаковки системы при их пластической деформации в области относительно невысоких давлений.

Целью данной работы является изучение закономерности структурообразования прессованных цементных композиций в зависимости от вида и количества минеральных добавок, добавок ПАВ и катализаторов твердения.

В экспериментальных исследованиях использовались следующие материалы.

Вяжущее – портландцемент с минеральной добавкой ПЦ-400 Д20 производства ЗАО «Уралцемент», удовлетворяющий требованиям ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия» с фактическим минеральным составом клинкера:  $C_3S = 65 \%$ ,  $\beta\text{-}C_2S = 13 \%$ ,  $C_3A = 7 \%$ ,  $C_4AF = 14 \%$ .

Мелкий заполнитель – песок кварцевый по ГОСТ 8736-93 с  $M_k = 2,37$ . Группа песка по крупности – средний.

Для модификации структуры бетона применялись химические добавки: суперпластификатор С-3 по ТУ 6-36-0204-229-625-90; лигносульфонаты технические ЛСТ по ТУ 13-0281036-05; хлорид кальция ГОСТ 450-77.

Тонкомолотые минеральные добавки: зола – унос Рефтинской ТЭС с  $S_{уд} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$ ; микро-

кремнезем МК 80 производства ЧЭМК с  $S_{уд} \approx 20\,000 \text{ см}^2/\text{г}$ ; горелая горная порода с терриконов Копейского угольного бассейна песчаной фракции, грансостав которой соответствовал кварцевому песку. Все ТМД удовлетворяют соответствующей НТД.

#### Условия проведения эксперимента

Образцы – цилиндры с диаметром и высотой 50 мм из смеси состава 1:2,5 изготавливались прессованием двусторонним пуансонами со скоростью приложения нагрузки не более 4 кН/с с последующей статической выдержкой 10 с при фиксированном давлении.

Условия твердения до испытания – нормальные.

Планирование эксперимента и обработка его результатов осуществлялись с применением планов Хартли второго порядка на кубе и планов симплекс-решетчатого планирования третьей степени с последующим графическим отображением адекватных математических моделей.

На первом этапе были проведены исследования влияния влажности смеси и давления прессования. Отдельные результаты приведены на рис. 1.

Увеличение давления прессования и влажности формовочной смеси (до определенных пределов) повышает прочность прессованных цементных композиций. Оптимальным давлением прессования можно считать 45 МПа (влажность формовочной смеси 8 %), при этом прочность при сжатии после 28 суток нормального твердения составляет 31,6 МПа. Дальнейшее увеличение давления прессования (до 70 МПа) сопровождается незначительным приростом прочности (32,0 МПа). Практически нулевой прирост прочности, а при малых влажностях формовочной смеси даже снижение прочности прессованных цементных композиций при увеличении давления прессования более 45 МПа можно связать с началом упругого деформирования каркаса из мелкого заполнителя. После снятия прессующего давления последний упруго расширяется с нарушением сплошности изделия. Кроме того, при повышенных давлениях прессования объемное расширение защемленного воздуха

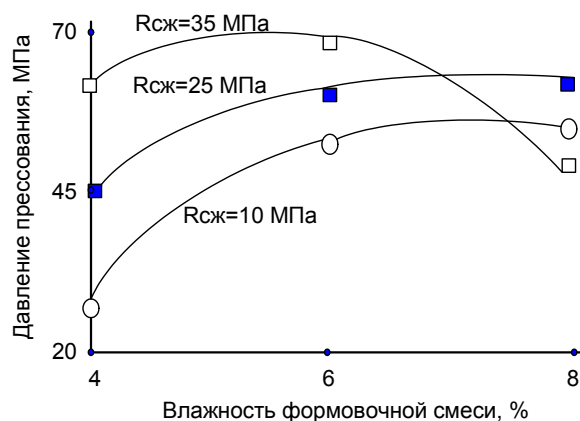


Рис. 1. Влияние формовочной влажности и давления прессования на прочность бетона

## Строительные материалы и изделия

возрастает, что после снятия нагрузки способствует нарушению сплошности полученных изделий и соответственно снижению прочности. При давлении прессования 45 МПа оптимальной влажностью формовочной смеси можно считать влажность 8,0...9,0.

Целью дальнейших исследований являлась оценка влияния добавки хлорида кальция на набор прочности бетона. Образцы прессовались из смеси Ц/П=1/2,5; прессование одностороннее 15 с, выдержка 10 с, влажность 8 %; соответственно изменялись давление от 20 до 70 МПа и количество добавки  $\text{CaCl}_2$  от 0 до 4 % от массы цемента, испытания проводились после 1, 3, 7 и 28 суток твердения. Условия твердения до испытания – нормальные (рис. 2).

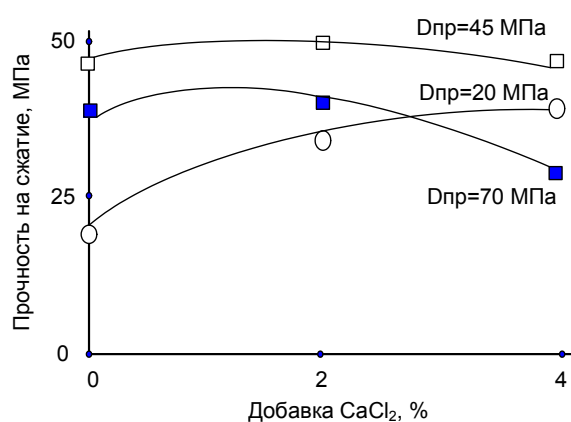


Рис. 2. Влияние добавки хлорида кальция и давления прессования на прочность бетона

Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее.

Введение хлорида кальция в количестве 2 % от массы цемента значительно ускоряет процессы структурообразования, протекающие в прессованных цементных композиционных материалах. Увеличение количества добавки до 4 % практически не оказывает влияния на кинетику набора прочности в ранние сроки твердения, и негативно влияет на прочность при сжатии после 28 суток нормального твердения. При этом, как и было вы-

явлено ранее, оптимальным оказалось давление прессования 45 МПа. После суток нормального твердения прочность при сжатии образцов без добавки хлорида кальция составила 13,6 МПа, а с добавкой хлорида кальция в количестве 2 % – 20,9 МПа, т. е. прирост прочности составил 54 %. Кроме того, прочность при сжатии образцов без добавки хлорида кальция после 28 суток нормального твердения составила 37,1 МПа, а с добавкой хлорида кальция в количестве 2 % – 44,6 МПа, т. е. прирост прочности составил 20 %. Таким образом, добавка хлорида кальция в количестве 2 % от массы цемента ускоряет структурообразование прессованных цементных композиций, а также увеличивает «конечную» прочность изделий. Применение добавки хлорида кальция в технологии прессованных изделий на основе цемента позволяет полностью отказаться от тепловлажностной обработки и увеличить «конечную» прочность изделий.

Для исследования возможности получения малоцементных и бесцементных прессованных композиционных изделий были выбраны следующие материалы: шлак доменный (Ш), горелая порода (ГП), портландцемент, микрокремнезем (МК).

Для производства стеновых материалов, как правило, нет необходимости получать прочности выше 15 МПа.

Прессованные образцы на основе предлагаемых композиций смесей с невысоким содержанием цемента удовлетворяют этим требованиям. Образцы, изготовленные из смеси песка и цемента П/Ц=1:2,5, имеют прочность 27,9 МПа, образцы, изготовленные из состава № 8, где заполнителем является горелая порода, с тем же содержанием цемента имеют прочность 42,7 МПа, т. е. прирост прочности составляет 53 % (см. таблицу).

Такой прирост прочности можно объяснить несколькими причинами:

- поверхность горелой породы (горелая порода главным образом состоит из алюмосиликатов) активно взаимодействует с гидроксидом кальция с образованием гидроалюмосиликатов кальция, таким образом имеет место не только адгезия, но и химическое взаимодействие;

Составы формовочных масс и результаты испытаний прочности бетонов

№	Состав Ц:П:Добавка	Влажность формовочной смеси, %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$R^{28}$ , МПа
1	Ц/П=1:2,5	8	2325	27,9
2	Ц/П =1/3,7	8	2248	16,2
3	Ц/П =1/6	8	2180	10,9
4	Ц/П =1/12,5	8	2031	3,5
5	Ц/П /Ш=1/3,3/0,1	8	2328	22,8
6	Ц/П /Ш=1/5/0,2	8	2309	18,7
7	П/Ц/Ш=1/10/0,3	8	2316	13,0
8	Ц/ГП=1/2,5	15	2139	42,7
9	Ц/П/МК=1/3,0/0,04	8,6	2296	25,8
10	Ц/П/МК=1/3,0/0,08	9,3	2306	24,3

– зерна горелой породы имеют меньшую прочность и модуль упругости, чем зерна кварцевого песка, поэтому под действием давления прессования они разрушаются и открываются новые активные центры взаимодействия;

– частицы горелой породы находятся в метастабильном состоянии и под действием давления прессования, по-видимому, имеет место механизм контактно-конденсационного твердения.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность регулирования свойств мелкозернистого прессованного бетона путем оптимизации пористости за счет регулирования грансостава смесей и введением оптимального количества электролита для изменения электростатического

эффекта между взаимодействующими частицами твердой фазы.

#### Литература

1. Арбузова, Т.Б. *Технология композиционных прессованных материалов общестроительного и специального назначения* / Т.Б. Арбузова, В.Ю. Сухов, М.В. Рябова / *Строительные материалы*. – 1998. – № 8. – С. 10–12.
2. Урьев, Н.Б. *Текучесть суспензий и порошков* / Н.Б. Урьев, А.А. Потанин. – М.: Химия, 1992. – 245 с.
3. *Добавки в бетон: справочное пособие* / под ред. В.С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1998. – 567 с.

**Горбунов Сергей Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), prrcm@74.ru

**Погорелов Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), spogorelov2@mail.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2013 г.

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series “Construction Engineering and Architecture”  
2014, vol. 14, no. 1, pp. 38–41**

---

## IMPROVING STRENGTH OF PRESSED CONSTRUCTION MATERIALS

*S.P. Gorbunov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, nppcm@74.ru*

*S.N. Pogorelov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, spogorelov2@mail.ru*

**The results of study on optimization of grain-size composition of cement systems reducing porosity in composites are presented. The impact of electrolytes and mixtures of mineral fine-dispersed mineral additives is described.**

*Keywords: portland cement, fine-dispersed mineral additives, strength, fine concrete.*

#### References

1. Arbutzova T.B., Sukhov V.Yu., Ryabova M.V. *Technology of the Composite Pressed Materials of an All-construction and Special Purpose Tekhnologiya kompozitsionnykh pressovannykh materialov obshchestroitel'nogo i spetsial'nogo naznacheniya*. *Stroitel'nye Materialy*, 1998, no. 8, pp. 10–12.
2. Ur'ev N.B., Potanin A.A. *Tekuchest' suspenziy i poroshkov* [Fluidity of Suspensions and Powders]. Moscow, Khimiya, 1992, 245 p.
3. *Dobavki v beton: spravochnoe posobie* [Concrete Admixtures Handbook]. Moscow, Stroyizdat, 1998, 567 p.

*Received 1 October 2013*