

УДК 666.9:691.32

НАПРАВЛЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СТОЙКОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар, К.В. Шулдяков

Приведены данные о стойкости бетонов с разными типами цементов. Установлено, что для создания технологии высокофункциональных бетонов на ЦЕМ I и долговечных железобетонных конструкций, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, необходимо применять эффективные пуццолановые и водоредуцирующие добавки. Для таких бетонов микроструктура цементного камня и его стабильность в процессе эксплуатации – основной критерий долговечности.

Ключевые слова: цемент, высокофункциональный бетон, микрокремнезем, доменный граншлак, зола-уноса, пластификаторы.

К качественным нормируемым показателям свойств цементов, влияющим на стойкость и длительность безаварийной службы конструкций, относятся: содержание ионов хлора, сульфатов, щелочей, СаО и MgO, алюминатов и алюмоферритов, ложное схватывание, водоотделение и др. Долговечность бетона на портландцементе (ПЦ) ЦЕМ I обеспечивается пониженным содержанием в цементном камне портландита вследствие пуццоланизации и комплексообразования поликарбоксилатного суперпластификатора, что позволяет повысить стабильность цементного геля при циклических испытаниях морозостойкости [1]. Для модификации цементного камня возможно применение водоредуцирования и пуццолановых цементов ЦЕМ-IV/A, содержащих 11–35 % микрокремнезёма, пуццоланы, золы-уноса, глиежа, или композиционных цементов ЦЕМ V/A с 18–30 % доменного граншлака и 18–30 % пуццоланы, глиежа или золы-уноса.

Пуццолановый портландцемент (ППЦ) содержит 20–30 % рыхлых активных минеральных добавок ($\rho_{ист} = 2,8 - 2,9 \text{ г/см}^3$) – АМД (трепел, опока, диатомит), которые значительно повышают водопотребность (до 34 %), или твёрдых АМД 25–40 % (туф, трасс, пемза), которые повышают нормальную плотность до 27–28 %. Замена портландцемента на пуццолановый портландцемент, при постоянном расходе вяжущего, делает бетонную смесь более вязкой, снижает подвижность, замедляет рост прочности и снижает экзотермию. Водонепроницаемость, стойкость в морской воде, водо- и солестойкость, сульфато- и щелочестойкость бетона на ППЦ выше, чем на ПЦ. Примерно через 6 месяцев прочность бетона на ППЦ сравнивается с бетоном на ПЦ. Такие бетоны с ППЦ применяются для бетонирования подземных и подводных массивных железобетонных конструкций, а при температуре ниже плюс 5 °С практически не твердеют. ППЦ не при-

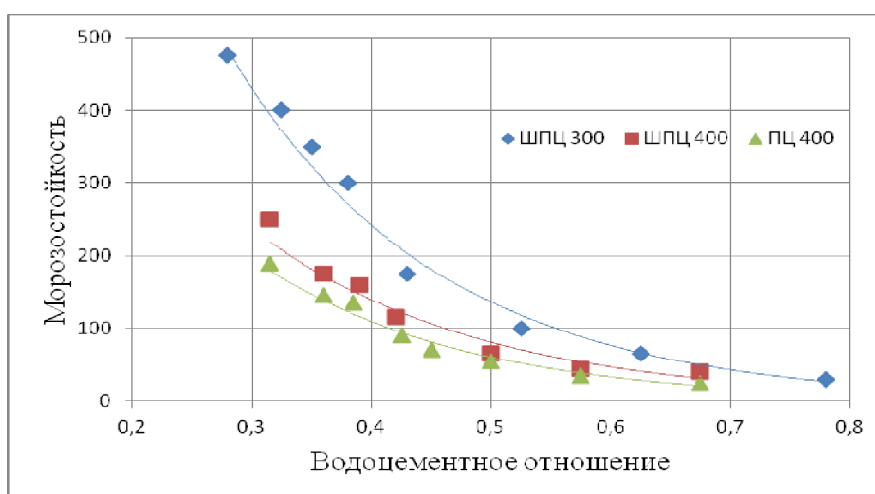
меняется для сборного железобетона из-за медленного набора прочности вследствие высокой водопотребности. Применение эффективных водоредуцирующих добавок совместно с пуццоланой обеспечивает бетону высокую марку по морозостойкости.

Однако в настоящее время пуццолановые и композиционные цементы на территории Российской Федерации в промышленных масштабах не выпускается. Это вызвано невостребованностью таких вяжущих, так как для всех сред эксплуатации по ГОСТ 31384–2017 регламентируется применение ЦЕМ I и ЦЕМ I СС.

В Евросоюзе и некоторых других странах расширяется использование цемента с добавками доменного гранулированного шлака и зол-уноса тепловых электростанций [0–4]. Нами проводились исследования влияния добавок доменного гранулированного шлака (ДГШ) Челябинского металлургического завода на морозостойкость бетона [0, 0]. Коэффициент качества при содержании $MgO \leq 10\%$ составил 1,37, и по этому показателю, в соответствии с ГОСТ 3476, шлак относится к 3 сорту. Шлак содержит две кристаллические фазы: геленит и гидрат геленита (гидратированный кальциево-алюминатный силикат).

Минерал геленит практически не гидратируется, но при наличии активаторов твердения или при гидротермальной обработке может проявлять вяжущие свойства [7]. Гидрат геленита в небольшом количестве образуется при обычных условиях и является стабильным соединением. На рентгенограмме имеется выраженная область гало, что указывает на его аморфизированное состояние, содержание стеклофазы в ДГШ в среднем составило 90,6 % по массе.

Из данных, приведенных на рисунке, можно сделать вывод, что роль добавки шлака проявляется при пониженных В/Ц менее 0,5 и способствует повышению морозостойкости и долговечности бетона.



Морозостойкость бетона на цементах с различным содержанием шлака: ПЦ 400 – 18 % ДГШ; ШПЦ 400 – 35 %; ШПЦ 300 – 49 % ДГШ

Цементы, содержащие до 30 % по массе кислой золы-уноса, характеризуются снижением прочности в начальные сроки твердения. Это снижение частично компенсируется более быстрой гидратацией клинкерных частиц. До 6 месяцев прочность золоцемента сравнивается с бездобавочным, эти сроки зависят от содержания золы и интенсивности её химического поверхностного взаимодействия с жидкой фазой. Золоцементы активно твердеют при пропаривании и автоклавировании, при этом улучшается удобоукладываемость бетонной смеси и снижается водопотребность, что повышает морозостойкость и водонепроницаемость, а также водо- и сульфатостойкость.

В качестве добавок при изготовлении бетонных смесей высокофункционального бетона наиболее часто используется пуццолановая добавка – гранулированный микрокремнезем, в дозировке до 10 % от массы цемента. Микрокремнезем способствует созданию в цементном камне повышенного содержания низкоосновной C–S–H(I) фазы за счет пуццолановой реакции между МК и вторичным Ca(OH)₂, который образуется в результате гидратации C₃S и β–C₂S [0]. Это приводит к равномерному распределению оставшегося Ca(OH)₂ в объёме цементного камня, делает структуру более однородной и упрочняет ее, а также переводит часть капиллярной пористости в гелевую и повышает сцепление цементного камня с заполнителем.

В качестве пластифицирующей добавки чаще всего применяются сухой порошок или водный раствор поликарбосилатного эфира, способный связывать в комплексы ионы кальция [0]. Основным принципом подбора дозировок добавок – снижение содержания портландита в цементном камне из теста нормальной густоты через 28 суток нормального твердения до уровня 3–5 % от массы образца [0]. Для повышения вязкости бетонной смеси и снижения усадочных деформаций могут вводиться уплотняющие добавки – зола-уноса, микрокальцит и др.

В соответствии с ГОСТ Р 56178–2014 выпускаются органо-минеральные модификаторы бетона МБ:

– класса А – регулирующие технологические свойства смесей, повышающие прочность и другие эксплуатационные свойства и снижающие проницаемость бетонов и растворов;

– класс Б – регулирующие технологические свойства смесей, повышающие прочность и другие эксплуатационные свойства и снижающие проницаемость бетонов и растворов, а также способствующие получению напрягающих, расширяющихся бетонов и растворов, бетонов и растворов с частично компенсированной усадкой.

В зависимости от вещественного состава минеральной части модификаторы подразделяют: класс А – на три вида:

- I – содержащий 100–70 % конденсированного микрокремнезема и 0–30 % золы-уноса;

- II – содержащий 40–69 % конденсированного микрокремнезема и 31–60 % золы-уноса;

- III – содержащий 10–39 % конденсированного микрокремнезема и 61–90 % золы-уноса;

Класс Б – на два вида:

- I – содержащий 100 % расширяющего компонента;

- II – содержащий 20–25 % конденсированного микрокремнезема и 75–80 % расширяющего компонента.

Наличие пуццолановой добавки в составе МБ способствует регулированию микроструктуры цементного камня высокофункционального бетона путем повышения содержания цементного геля и его стабильности при циклических воздействиях. Дозировка добавок определяется исходя из минералогического состава цемента и проверяется экспериментально.

Выводы

1. Материалоемкие долговечные строительные конструкции из бетона и железобетона должны изготавливаться из специально подготовленных материалов высокой однородности без вредных и загрязняющих примесей. Создание индустриального обогащения заполнителей – путь к современным цифровым технологиям.

2. В настоящее время в основном производится ЦЕМ I, получить из которого долговечные бетоны можно только введением водоредуцирующего компонента и эффективной пуццолановой добавки.

3. Дозировки добавок оцениваются по содержанию портландита в цементном камне. При количестве $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне не более 4...5 % формируется гелеобразная структура низкоосновных гидросиликатов, стабильная в условиях циклического замораживания при низких отрицательных температурах.

Библиографический список

1. Effects of sintetic C-S-H/PCE nanocomposites on early cement hydration / J. Sun, Hu Shi, Z. Xu et al. // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol 140. – P. 282–292.

2. Giergiczny, Z. European experience of successful Portland cement with slag additive usage in construction / Z. Giergiczny // ALITinform, international analytical review CEMENT.CONCRETE. DRY MIXTURESW. – 2013. – № 4–5. – P. 36–41.

3. Schutter, G. De. Hydration and temperature development of concrete made with blast furnace slag cement / G. De Schutter // Cement and concrete research. – 1999. – Vol. 29. – P. 143–149.

4. Креста, Ф. Гидравлические дорожные вяжущие с высоким содержанием золы-уноса: чешский опыт / Ф. Креста // Цемент и его применение. – 2019. – № 5. – С. 62–67.

5. Трофимов, Б.Я. Технология высокофункциональных дорожных бетонов / Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч.

тр. III Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону. – 2014. – Т. 5. – С. 124–138.

6. Трофимов, Б.Я. Активность шлака и обеспечение морозостойкости бетона на цементах с добавкой ДГШ / Б.Я. Трофимов, П.Н. Киль, К.В. Шульдяков // Бетон и железобетон Оборудование, материалы, технологии. – 2014. – №2 (11). – С. 26–30.

7. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 334 с.

8. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.

9. Sowoidnich, T.A study of retarding effects on cement and tricalcium silicate hydration induced by superplasticizers: PhD thesis / T.A. Sowoidnich. – Weimar, 2015. – 216 p.

10. Schuldyakov, K.V. Interconnection between Concrete Structure and Properties and Various Modifications / K.V. Schuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017). – Procedia Engineering, 2017. – Vol. 206. – P. 863–868.

[К содержанию](#)