

Александр Бёль

## БЕТОНЫ ОСОБО ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Исследование параметров плотности и  
проектирование особо плотных бетонов

# БЕТОНЫ ОСОБО ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

## Исследование параметров плотности и проектирование особо плотных бетонов

Александр Бёль, AB Projektmanagement

Развитие строительства объектов в северных, дальневосточных и арктических регионах становится все более осязаемым, связано с расширяющимся освоением энергоресурсов и с новыми возможностями в их реализации. Среди них могли бы быть также задуманные и проработанные, но не осуществленные гидротехнические проекты 60-80-х годов: мезенская ПЭС, пенжинская ПЭС и др. приливные электростанции. Опыт строительства наплавных конструкций комплекса защиты Петербурга от наводнений в сочетании с новыми технологиями и материалами последних 20-30 лет увеличивают возможности к возрождению и реализации таких проектов.

Планирование, проектирование и строительство современных объектов в регионах с суровыми климатическими условиями, предъявляет все более высокие требования к бетону. Эти требования сложно удовлетворить опираясь на прежние взгляды и критерии к проектированию составов бетона. Новые подходы и представления к исследованию бетона, лучшее понимание его составляющих и их роли в формировании стойкого, долговечного камня, ведут к разработкам новых вариантов бетона и успешному их применению в сложных условиях службы. К ним относятся к примеру воздействия кислот и других разрушающе действующих на него химических материалов, многократные циклы замораживания-оттаивания в присутствии хлоридов и других солей при очень низких температурах, циклы насыщения-высушивания, низкотемпературные шок-овые и другие воздействия [1].

Современные бетоны ультра высокой прочности, бетоны высокой химической стойкости, бетоны высокой морозостойкости, самоуплотняющиеся бетоны и другие ВЭС бетоны объединяет один существенно важный параметр бетона - его высокая плотность, высокая плотность цементного камня.

Исследованиям по этой теме и вопросам создания плотной структуры бетона посвящена настоящая статья.

Плотными против действия коррозивных материалов в растворенном или газообразном виде считается бетон с общей пористостью порядка 14-16 объем.%. По другим литературным данным, для ВЭС бетонов не включающих из соображений повышения его морозостойкости вовлеченного диспергированного воздуха, он должен иметь общую пористость бетона не выше 11 объем.%. Из опыта проектирования рецептур бетона этого типа, имеющих конкретное прикладное значение, формулируются требования по плотности порядка 9-11 объем.%. Другими задаваемыми и контролируемыми для таких бетонов параметрами, характеризующими плотность на микроуровне также считается объем микропор размером менее 100мкм, их средний размер, а также коэффициент проникновения ионов хлора и др. [2]. Это как правило дополнительные и более высокие требования чем они содержатся в действующих нормативных документах. Для кислотостойких бетонов дополнительно формулируются также требования по допустимой глубине разрушающей зоны, по остаточной щелочности бетона (остаточному содержанию  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), а также по абразивной потере в массе [3]. При проектировании составов ВЭС бетонов считается также желательным учет плотности упаковки заполнителя и/или учет плотности всего зернового состава, включая вяжущее и минеральные добавки.

По представлениям Фуллера и Томпсона наиболее плотная упаковка частиц достигается если кривая просеивания (идеальная) для заполнителя с максимальной крупностью зерен до 16мм имеет следующие значения прохода на ситах: 0,125мм -14,9%, 0,25мм - 18,6%, 0,5мм - 23,3%, 1мм - 29,1%, 2мм - 35,1%, 4мм - 44,4%, 8мм - 62,9%, 16мм - 100%.

Результаты некоторых исследований, приводимые ниже показывают, что и при существенном отклонении использованного заполнителя от этой кривой, достигнуты заданные параметры по плотности бетона и по его долговечности. Это означает что зависимость конечной плотности бетона от зернового состава

должна учитывать еще и другие параметры, связанные например с иным состоянием материалов после затворения бетона. Однако учитывая более высокую стойкость пригодных заполнителей к всевозможным разрушающим бетон воздействиям, логично следовать этому принципу и по возможности максимизировать его содержание в бетоне. Как пример, по одному из известных требований, содержание крупного заполнителя в бетоне должно быть  $\geq 50\%$  по объему. Понимая что слабым звеном в бетоне является цементный камень, даже если он сформировался при очень низком водо-цементном отношении, особое внимание уделяют виду используемого цемента, его минералогии и составу. Слабыми звеньями и компонентами цементного камня могут быть избыточный гидроксид кальция и формирующийся из него карбонат кальция, кристаллы этtringита, щелочи. Гидроксид кальция сам по себе не придает цементному камню прочность, а из условий гидратации клинкерных минералов его образуется существенный избыток. Крупные кристаллы не связанного, избыточного в бетоне гидроксида кальция, делают цементный камень менее однородным и прочным, что имеет особое значение для зоны контакта цементного камня с заполнителем. При наличии в составе бетона аморфного оксида кремния, он связывает эту гидроксид кальция в CSH фазы (протекает так называемая пуццолановая реакция:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CSH}$ ), делающие цементный камень плотнее и напрямую вносящие свою лепту в формирование более высокой прочности цементного камня и бетона в целом. «Носителем» аморфного кремнезема могут быть разные искусственные, техногенные и природные материалы. Поэтому для достижения необходимых характеристик ВЭС бетонов в них используют различные, доступные и более подходящие минеральные добавки, как порошки молотого шлака, микрокремнезем в различных вариантах качества, метакраин и кальцинированные глины, золу-унос и мелкодисперсные порошки натуральных аморфных оксидов кремния как туф, трепел, трасс, опока, нанопорошки искусственной кремнекислоты. Их реакционную способность как и вяжущие свойства шлака оптимально используют, по необходимости и возможности, тонким помолотом отдельно от клинкерной составляющей или вместе с ней. Тонкий помол

этих материалов как и инертных каменных порошков карбоната кальция, доломита и др. способствует также хорошей связности бетонных смесей. Это особенно важно если смеси имеют высокопластичную, литую консистенцию или консистенцию самоуплотняющихся бетонных смесей. В зависимости от происхождения, от дисперсности и некоторых других условий пуццоланическая реакция может протекать уже в ранние сроки, быть растянутой на длительные сроки или иметь место только в поздние сроки твердения бетона. Обязательным условием протекания этих реакций является наличие воды, что обуславливает необходимость соответствующего ухода за бетоном.

Для различных ВЭС бетонов используют имеющиеся на рынке специальные цементы, сульфатостойкие портландцементы, сульфатостойкие шлакопортландцементы, пуццолановые цементы, цементы содержащие золу-унос и /или другие носители оксида кремния, цементы содержащие известняковую муку. Известняковая мука считается инертным материалом, наполнителем, но из опыта ее применения в составах высокопрочных СУБов известно на первый взгляд не объяснимое формирование высокой прочности бетона. Объяснить её можно эффектом плотной упаковки и также эффектом затравки- центров кристаллизации.

В случае сульфатной агрессии предписываются и применяются сульфатостойкие портландцементы, другие специальные цементы или варианты шлакопортландцементов.

Для последних формулируют дополнительные к обычным цементам этого типа требования по удельной поверхности, по параметру среднего размера частиц, по содержанию хлоридов, пп, щелочей, сульфатов, нормальной густоте (водопотребности) и др. Для пуццоланических тонкодисперсных минеральных добавок формулируются требования по содержанию реакционноспособного оксида кремния, содержанию свободной и реакционноспособной окиси кальция, по содержанию сульфатов, щелочей, окиси магния, по величине индекса активности (в 28 сут и 90 сут.), по зерновому составу, водопотребности и др.

Требования к параметрам составов бетона формулируются в ориентировке на известный опыт: по расходу цемента, в/ц, содержанию минеральных добавок, ПАВ и др. Для новых вариантов применения, где еще отсутствует исследовательская база и опыт применения,

требования могут быть сформулированы на основе известного опыта в схожих вариантах применения с корректировкой параметров в сторону более высоких требований, если в варианте применения ожидается более высокая экспозиция и наоборот. В связи с этим кажется важно подчеркнуть, что сегодняшние особо-плотные бетоны еще не выбрали резерв возможного в/ц- отношения, возможности его снижения современными гиперпластификаторами как и другие, о которых говорилось выше, т.е. есть резервы для проектирования и производства еще более долговечных бетонов. Поскольку механизмы разрушающего действия на бетон могут различаться, необходимо наряду с обеспечением его высокой плотности, предусматривать другие соответствующие этим воздействиям меры целенаправленного регулирования требуемых свойств.

В рассматриваемых далее в настоящей статье исследованиях параметры плотности и другие характеристики были заданы и определены для варианта кислотостойкого бетона, спроектированного нами для производства труб и тюбингов, для инфраструктурных современных объектов при сульфатной и кислотной агрессивной среде.

Требования к бетону были сформулированы заказчиком следующим образом. Класс бетона по прочности C50/60 (28сут.), высший класс экспозиции ХА3 (при этом с отказом от защитного покрытия, как того требуют нормы, в силу использования бетона с повышенной кислотостойкостью) и следующими дополнительными требованиями:

- содержание крупного заполнителя  $\geq 50$  объ.%,
- не использовать заполнители на основе карбонатов кальция,
- в/ц или в/в не более 0,42,
- мельчайшего песка и мучнистых частиц до 0,25мм не менее 410 кг/м<sup>3</sup>,
- содержание вяжущего (включая тонкодисперсные минеральные добавки) не более 350 кг/м<sup>3</sup>.

По вяжущему допускались варианты применения цемента по DIN EN 197-1 с удельной поверхностью 3000-4200 см<sup>2</sup>/г и средним размером зерен 16μм - 22μм, в сочетании с золой-унос, содержащей не более 20% зерен больше 45μм и с микрокремнеземом при их общем содержании в составе вяжущего более 30% или СЕМ III/A 52,5 N с содержанием молотого шлака порядка 40%, с отдельным помолом клинкера до тонкости порядка 5000 см<sup>2</sup>/г и

средним размером зерен 11μм и шлака до прим. 8000 см<sup>2</sup>/г и средним размером зерен 6μм.

По дальнейшему требованию заказчика вяжущее для этого бетона должно было быть сульфатостойким. Реперный состав заказчика был сформулирован на основе сульфатостойкого портланд-цемента.

При выборе пуццоланической минеральной добавки предпочтение было отдано нами микрокремнезему, поскольку метакаолин в таком варианте применения дает худший эффект [4].

Поскольку потенциальный производитель бетона/ изделий использовал на своем производстве цементы несколько отличные от названных заказчиком, возник вопрос о возможности выполнения требований к бетону применяя имеющиеся у него цементы. Решение вопроса виделось в комбинированном использовании имеющихся на производстве цементов. Поэтому в первую очередь нужно было уточнить будет ли ранняя прочность достаточной для обычного ритма работы производства жби, поскольку один из цементов- СЕМ III/A 42,5N в первые сутки медленно ее набирает и обычно используется только для товарного бетона.

Ранняя прочность бетона при комбинировании СЕМ I 52,5N с цементом СЕМ III/A 42,5N была нами определена в составе: 270 кг цемента, 110 кг золы-унос, 20кг микрокремнезема, 700 кг песка 0/2мм, 1210 кг гравия 8/16мм, 7 кг гиперпластификатора, 119 кг воды и позволила получить первые ориентиры в возможном соотношении этих цементов (таб.1). Следующим шагом было выяснено, отвечает ли такое вяжущее требованию по сульфатостойкости.

таб.1

| № | СЕМ III/A 42,5 | СЕМ I 52,5 | Расплав, см | Температура, °C | ПС, 21ч, МПа | ПС, 24ч, МПа |
|---|----------------|------------|-------------|-----------------|--------------|--------------|
| 1 | 100%           | -          | 25,0/25,5   | 15-20           | 7,6          | 10,0         |
| 2 | 50%            | 50%        | 24,5/25,0   | 15-20           | 12,6         | 17,5         |
| 3 | 70%            | 30%        | 25,5/25,5   | 15-20           | 9,6          | 14,0         |
| 4 | 70%            | 30%        | -           | 29              | 26,3         | 31,0         |
| 5 | 100%           | -          | -           | 29              | 20,0         | -            |

На основе данных о минералогическом составе исходных цементов и содержании в них клинкера были рассчитаны варианты соотношений цементов, при которых содержание минерала С<sub>3</sub>А соответствует требованию для сульфатостойкого цемента- менее 5%.

Для изготовления и проверки образцов на сульфатостойкость были выбраны варианты вяжущего с 70% СЕМ III/A 42,5N ( рецепт 1) и с

Опираясь на эти результаты были изготовлены образцы из бетонов четырех составов для испытания на стойкость в кислотной среде и определения их параметров плотности.



Для всех составов были определены общая пористость бетона, объем микропор размером от 0 до 100μм, средний размер микропор, коэффициент проникновения ионов хлора, абразивная потеря в массе и глубина коррозии. Данные по этим исследованиям приведены в таблице 2. Общая пористость определялась расчетом исходя из определенных экспериментально, плотности и истинной плотности бетона. Объем микропор и их средний размер были определены методом ртутной порометрии на анализаторе макропор Pascal 140 фирмы Thermofinngen и анализаторе микропор Mikropores 2000 WS фирмы Carlo Erba. Коэффициент миграции ионов хлора определялся на образцах- шайбах диаметром 100мм и высотой 50мм, выбуренных и вырезанных из образцов-кубов бетона, на приборе, принципиальная схема которого показана ниже на рис.5 [5].

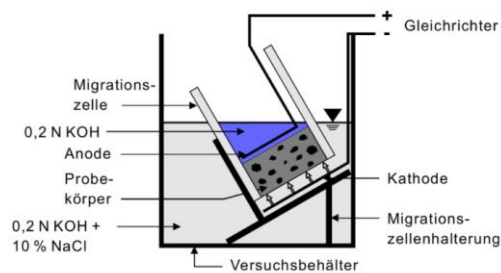


рис.5

Химическая стойкость бетона по потере массы и глубине разрушений определялась с помощью прибора, схематически показанного на рис.6, в котором образцы в течение 12 недель подвергались циклическому воздействию раствора серной кислоты с  $\text{pH}=3,0$ , концентрация которого автоматически поддерживалась весь период испытаний на заданном уровне.

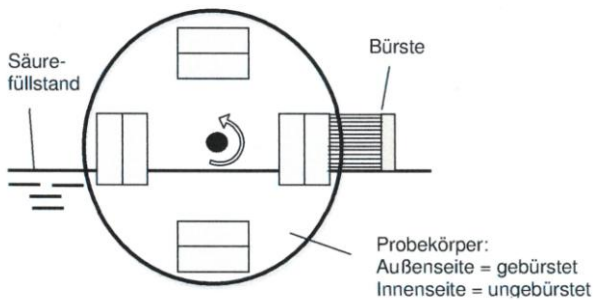


рис.6

Образцы закреплялись на вращающемся с постоянной скоростью колесе (один оборот за 2,5 мин.) и подвергались при окутании в раствор действию кислоты и также абразивному воздействию щеток. После 12 недель испытаний на шлифах под микроскопом определялась глубина фронта разрушений в образцах. Как видно из таблицы 2, спроектированные варианты составов C1- C4 показали требуемую высокую стойкость против кислотной коррозии и требуемые параметры плотности бетона, при лучших результатах в сравнении с реперным составом. Общая пористость во всех проектных составах была существенно ниже требуемых 11 объем.%. Таким образом проведенными

исследованиями показана возможность использования и комбинирования «рядовых» цемента для бетонов высокой стойкости, дающими в применении существенную экономию в сравнении со специальными или сульфатостойкими цементами.

таб.2

| Проба, состав | Общая пористость, % | Объем пор 0-100µм | Средний размер пор, µм | Коэфф. миграции ионов хлора | Потери в массе, % | Глубина коррозии, мм |
|---------------|---------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------|
| Требование    | < 11                | < 40              | < 0,1                  | < 1,0                       | < 0,95            | < 1,3                |
| C1            | 6,6                 | 28                | 0,065                  | 0,22                        | 0,62              | 0,50                 |
| C2            | 7,2                 | 31                | 0,037                  | 0,25                        | 0,98              | 0,58                 |
| C3            | 5,6                 | 23                | 0,075                  | 0,26                        | 0,63              | 0,54                 |
| C4            | 5,0                 | 21                | 0,059                  | 0,65                        | 0,73              | 0,50                 |
| Referenz      | 10                  | 33                | 0,035                  | 0,69                        | 2,25              | 1,2                  |

Экономия при этом заложена и в относительно низком содержании дорогостоящего микрокремнезема в составах таких бетонов.

В заключении следует отметить, что проектирование составов высокостойких бетонов с использованием новых принципов, с привлечением параметров плотности как и соответствующих методов испытаний, позволяет с большей уверенностью добиться необходимого результата. Этот подход, параметры и методы исследований могут быть использованы при проектировании других ВЭС бетонов.

## Литература

- [1] Hüttel, R.; Hillemeier, B.: Hochleistungsbeton – Beispiel Säureresistenz. Betonwerk und Fertigteil-Technik 66 (2000), S. 52–60
- [2] Paschmann, H.; Grube, H.: Einfluß mineralischer und organischer Zusatzstoffe auf die Dichtigkeit gegenüber organischen Flüssigkeiten und auf weitere Eigenschaften des Betons. Beton 44 (1994), H. 1, S. 24–29, H. 2, S. 86–91
- [3] Grube, H.; Neck, U.: Beton widerstandsfähig gegen chemische Angriffe. Betonwerk + Fertigteil-Technik 62 (1996), H. 1, S. 122–130.
- [4] Dr. Dehn, F., Dr. Friedemann, K., Dr. Schmidt, D.: Säureresistente Hochleistungsbetone. BFT 3/ 2003.
- [5] Dr. F. Hunkeler, Dr. Ch. Merz und H. Ungricht, TFB, Wildegg, Bericht VSS Nr. 568, November 2002.