

## Высокопрочный бетон, проблемы и задачи

Кучук Е.В.

Научный руководитель – Гуриненко Н.С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

В настоящее время высокопрочными бетонами считаются бетоны, прочность на сжатие которых, составляет более 150 МПа.

Данную прочность в производственных условиях получить не представляется возможным в связи с неполной разработкой теоретических вопросов и отсутствием на рынке качественных составляющих для бетона.

Для производства высокопрочного бетона водоцементное отношение должно быть значительно ниже 0,4, за счет чего уменьшается пористость и повышается прочность матрицы цементного камня. При минимальном отношении В/Ц и, следовательно, низком содержании воды в смеси удобоукладываемость бетона в реальных условиях достигается лишь за счет увеличения содержания вяжущего и, особенно за счет добавления пластификатора.

Зерна заполнителя должны обладать высокой прочностью и по возможности высоким модулем упругости. Также необходимо очень хорошее сцепление между зернами заполнителя и матрицей цементного камня. В данном случае превосходный результат достигается за счет добавления активных минеральных добавок и каменной муки микрометрического масштабного уровня (пущолановых вяжущих).

Важную роль играют прочность, водопоглощение (форма зерна, гранулометрический состав) и химическая активность (предотвращение щелочных реакций). Чтобы уверенно выйти на прочность выше 100 МПа, рекомендуется применять мелкий базальтовый, габбровый или гранитный щебень.

Кривая гранулометрического состава должна проходить между эталонными кривыми просеивания и обладать как можно более низким содержанием мелкодисперсных частиц ( $< 0,125$  мм) и мелкозернистого песка (от 0,125 до 0,25 мм). Диаметр самого крупного зерна должен колебаться в пределах от 8 до 16 мм.

В качестве минеральных добавок при производстве высокопрочных бетонов используются: микрокремнезем, зола-унос каменного угля, метакраолин, нанокремнезем (кремневая кислота) и каменная мука (кварцевая и известняковая мука). Микрокремнезем имеет в данном контексте особое значение: сферические частицы микрокремнезема диаметром примерно 0,2 мкм заполняют пустоты между частицами цемента и усиливают сцепление между зернами заполнителя и цементным камнем за счет разрушения низкопрочных кристаллов портландита (пуццолановая реакция).

Обязательным условием при изготовлении высокопрочных бетонов является использование пластификаторов в качестве химических добавок.

Благодаря относительно высокому содержанию цемента, использованию микрокремнезема и низкому водоцементному отношению высокопрочные бетоны при затвердевании развивают следующие качества (в сравнении с традиционными бетонами):

- более быстрое нарастание температуры в строительной конструкции;
- повышенная скорость потребления и связывания воды в процессе гидратации;
- ускоренное нарастание прочности в первые дни.

Недостатком подобных бетонов по сравнению с традиционными бетонами является их более интенсивная аутогенная усадка. Понятием «аутогенная усадка» обозначают изменение объема, которое под влиянием изотермических условий происходит в бетонном образце, помещенном в герметичное пространство. Она является результатом химической усадки и, в общих чертах, ассоциируется с «внутренним высыханием» цементного камня (при отношении В/Ц ниже 0,4 содержание воды недостаточно для обеспечения полноценной гидратации цемента). Аутогенная усадка уже в первые дни после бетонирования может привести к возникновению сильного напряжения на растяжение и, следовательно, к трещинообразованию. В отличие от сухой усадки аутогенную усадку невозможно уменьшить путем внешнего ухода за бетоном.

Наиболее эффективным средством борьбы с трещинообразованием в высокопрочных бетонах, вызванным аутогенной усадкой, является внутренний уход путем введения равномерно распреде-

ленных по всему объему бетона микровключений, содержащих свободную воду. Перспективным представляется использование полимеров (SAP), обладающих высокой абсорбирующей способностью и играющих роль накопителей. Полимеры SAP добавляются в бетон в виде порошка и в процессе перемешивания поглощают воду, образуя, таким образом, микроскопические водяные поры. Впервые полимеры SAP были применены для внутреннего ухода в 2006 г.

Введение в бетонную смесь супер- и гиперпластификаторов и реакционноактивных пуццолановых добавок микрокремнезема (МК) и микрометакаолина (ММК) – условие необходимое, но недостаточное для создания высокопрочных (ВПБ) и особо высокопрочных (ОВПБ) бетонов с прочностью 150–200 МПа. Используя суперпластификаторы в бетонах традиционных составов, обеспечивающих заполнение каркаса бетона максимальным количеством щебня, можно увеличить прочность бетона в “тощих” составах на 10–15%, а в “жирных” на 25–40%. Добавляя МК или ММК, можно связать до 20% гидролизной извести из алита и белита и повысить прочность бетона на 20–50%. В итоге общее увеличение прочности может быть полуторо-двукратным.

Используя для бетона экономичный состав с соотношением компонентов Ц : П : Щ = 1 : 1,5 : 2 при расходе цемента 500 кг марки М550, можно при В/Ц=0,38 получить марку бетона 500. При введении суперпластификатора и снижении расхода воды до 20–25% можно повысить прочность до 65–75 МПа. При введении МК в количестве 15–20% от массы портландцемента можно из самоуплотняющихся бетонных смесей достигнуть прочности бетона 80–100 МПа. Такое значение прочности является предельным для традиционных составов бетона. При этом концентрация твердой фазы, вычисляемая как отношение суммы объемов цемента, песка и щебня к 1 м<sup>3</sup> бетона, будет очень высокой и составит 85–89% при водотвердом отношении бетонной смеси 0,072–0,090.

В статье [5] приводятся результаты испытания высокопрочного бетона, изготовленного с использованием вяжущего низкой водопотребности ВНВ-100 активностью 92 МПа, мытого гранитного щебня, крупного песка и МК. Бетон имел к 28 сут. нормального твердения прочность при сжатии всего 86 МПа. Это является доказательством того, что дальнейшее повышение прочности невозможно без кардинального изменения состава и топологической структуры бе-

тона. Новая рецептура и структура высокопрочных бетонов должна увеличить объем реологической водно-дисперсной матрицы ( $V_{\text{дп}}$ ) первого рода, состоящей из цемента, добавки МК и воды. Эта более объемная матрица должна обеспечить свободное перемещение частиц песка в водно-дисперсной системе.

В бетонах нового поколения объем реологической матрицы необходимо увеличивать добавлением к цементу не только МК, но и дисперсных частиц каменной муки микрометрического масштаба уровня.

Второй важный для обеспечения “высокой” реологии бетонных смесей для высокопрочных бетонов фактор – увеличение подвижности за счет увеличения объема цементно-водно-песчаной реологической матрицы  $V_{\text{цп}}$  второго уровня. Она должна обеспечить свободное перемещение зерен щебня в цементно-песчаной (растворной) смеси, то есть необходима существенная раздвижка зерен щебня.

В бетонах, изготовленных только с дисперсной добавкой МК [5], объемы реологических матриц при солидном расходе цемента хоть и увеличились в 1,7–1,9 раз по сравнению с бетонами общего назначения, но существенно ниже, чем должны быть в структуре супербетонов.

Таким образом, цемент низкой водопотребности, который обычно обеспечивает в суспензии высокий водоредуцирующий индекс (ВИ) (по нашим исследованиям, 2,1–2,5), не в состоянии сделать бетон высокопрочным. Поэтому для достижения высокой прочности бетона на ВНВ его необходимо также использовать с добавкой каменной муки для создания рациональной топологической структуры бетона, а не только обеспечить высокий разжижающий эффект суперпластификатора (СП) в ВНВ. Разжижающая способность СП в ВНВ высокая, а объема дисперсной фазы для обеспечения свободного перемещения частиц песка и зерен щебня в достаточном количестве не имеется.

Для бетонов высокой прочности более эффективны не ВНВ-100, а ВНВ-60–70, содержание которых в бетоне должна быть 900–1000 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Кардинальное повышение прочности бетонов с суперпластификаторами от марки 1000 до марки 1500–2000 при активности це-

мента 500–550 достигается рационально подобранным составом и многокомпонентностью бетона, а также за счет рациональной реологии и дополнительного синтеза гидросиликатов в капиллярно-пористой структуре цементного камня.

2. Улучшение реологии путем существенного разжижения цементно-водной матрицы обеспечивается использованием эффективных супер- и гиперпластификаторов и значительным водопонижением в бетонных смесях.

3. Увеличение объема цементно-водной матрицы, а вместе с ней и прочности, можно достигнуть повышением содержания цемента до 800–1000 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Однако такие бетоны с пониженным содержанием крупного заполнителя являются сильно усадочными, нетрещиностойкими и недолговечными. Они обладают повышенной ползучестью.

4. Для увеличения объема тонкодисперсной реологической матрицы в бетонных смесях необходимо добавлять к цементу значительное количество каменной муки, повышая ее долю до 50–70% и более к массе цемента. Такая матрица, кардинально меняющая состав и топологическую структуру бетона, превращая бетон в малопесчаный, обеспечит свободное перемещение частиц песка в минерально-водно-цементной системе.

5. Не всякая каменная мука может быть использована для увеличения объема реологической матрицы из дисперсных частиц микрометрического уровня. Каменная мука должна быть реологически активной в суспензии с суперпластификатором и обеспечивать более высокую гравитационную растекаемость (текучесть под действием собственного веса), чем цементная суспензия. Реологические свойства такой суспензии должны обеспечивать высокий водоредуцирующий индекс при водопонижении с сохранением текучести.

6. Реализация более высокой прочности за счет синтеза дополнительного количества гидросиликатов в структуре бетона достигается добавками активного МК, ММК или кислой золы мультициклонов (с минимальным количеством несгоревших остатков), доля которых составляет 10–30% и зависит от содержания портландцемента.

7. Каменная мука для изготовления ВПБ и ОВПБ должна изготавливаться из прочных и плотных горных пород для исключения

капиллярного поглощения раствора СП и обезвоживания бетонной смеси в процессе ее приготовления и укладки.

8. В процессе интенсивного перемешивания бетонной смеси с суперпластификатором неизбежно вовлечение пузырьков воздуха. После укладки бетонной смеси воздушные пузырьки частично удаляются из объема под действием сил Архимеда. В связи с быстрым образованием в поверхности изделий, контактирующих с воздухом, плотного слоя необходимо покрывать изделие пленкой, препятствующей испарению воды и не мешающей удалению пузырьков воздуха.

#### Литература:

1. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Рыскин М.Н. – Минск, 2002.
2. Основные принципы создания высокопрочных и особо высокопрочных бетонов. Статья/ Калашников В. И. – 2008.
3. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения. Статья, «СтройПРОФИль» № 8-08/ Мещерин В.С. – Москва, 2008.
4. Высокопрочный бетон. Статья, «СтройПРОФИль» № 8-07/ Зайцев И.Н. – Москва, 2007.
5. Фаликман В. Р., Калашников О. О. “Внутренний уход” за особо высокопрочными быстротвердеющими бетонами // Технологии бетонов. – 2006. – № 5. – С. 46–47.
6. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны/ Научное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368с.