

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ БЕТОНОВ

В.В. Белов, М.А. Смирнов

Под высокотехнологичными (высокоэффективными) бетонами понимаются бетоны, которые во многом в лучшую сторону отличаются от обычного стандартного бетона, как с точки зрения готовых бетонных изделий, так и с точки зрения свежеприготовленной бетонной смеси, прежде всего, по укладываемости и уплотняемости. В общем случае высокотехнологичные бетоны характеризуются следующими свойствами:

- а) очень высокая прочность на сжатие и растяжение;
- б) устойчивость при разрушении и деформации;
- в) высокая долговечность (устойчивость к замораживанию и оттаиванию, к действию размораживающих солей, химическая и механическая стойкость);
- г) высокий коэффициент конструктивного качества;
- д) самонивелирующиеся и самоуплотняющиеся консистенции свежеприготовленных бетонных смесей.

В результате использования разнообразных приемов направленного структурообразования сегодня на практике удается получить высококачественный многокомпонентный цементный камень, модифицированный минеральными и химическими добавками, на основе которого могут создаваться следующие основные виды высокотехнологичных бетонов:

при введении заполнителей оптимальной гранулометрии – высокопрочный бетон;

при использовании специальных сырьевых компонентов и соответствующей технологии уплотнения – ультравысокопрочный бетон;

при введении гиперпластификаторов совместно с дисперсными наполнителями и использовании заполнителей оптимальной гранулометрии – самоуплотняющийся бетон;

при введении тонкодисперсной газовой фазы и/или особо легких заполнителей оптимальной гранулометрии – высокопрочный конструктивный бетон с лёгким заполнителем;

при введении дисперсных волокнистых наполнителей и комплекса химических добавок – сверхпрочный фибробетон.

На практике часто используются комбинации этих видов бетона, например, высокопрочный фиброармированный бетон со свойствами самоуплотнения.

В группу высокопрочных высокомодифицированных бетонов (High Performance Concrete, или сокращенно HPC) объединены многокомпонентные бетоны с высокими эксплуатационными свойствами, прочностью, долговечностью, адсорбционной способностью, низким коэффициентом диффузии и истираемости, надежными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре, высокой химической стойкостью, бактерицидностью и стабильностью объема. Высокопрочные модифицированные бетоны, приготавливаемые из высокоподвижных пластичных бетонных смесей с ограниченным водосодержанием, имеют прочность на сжатие в возрасте двух суток 30–50 МПа, в возрасте 28 суток – 60–150 МПа, морозостойкость $F = 600$ и выше, водопоглощение менее 1–2% по массе, истираемость не более 0,3–0,4 г/см², регулируемые показатели деформативности, в том числе с компенсацией усадки в возрасте 14–28 суток естественного твердения, малую проницаемость для жидкостей и газов [1]. Высокопрочные высокомодифицированные бетоны – это новый технический уровень стройиндустрии, временами достигавшийся и у нас, но «просящийся» теперь в широкое внедрение. Именно из этого бетона, как видно из зарубежной технической литературы, в настоящее время производят покрытия автострад, мосты, тоннели, небоскребы, морские нефтяные платформы. Основная область его применения – дороги и

высотные дома – должна быть обеспечена «бетоном усиленной переработки» и у нас, с попутным решением целого комплекса проблем, связанных с индустрией заполнителей, цемента, химических добавок. Легко прогнозировать, что в ближайшем будущем будет происходить постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными высокопрочными бетонами.

В качестве особых признаков, характеризующих состав высокопрочного модифицированного бетона, следует назвать следующие: очень низкое водоцементное отношение; использование тонкодисперсных высокореактивных минеральных добавок (микрокремнезем и другие) в сочетании с высокоэффективными суперпластификаторами. Благодаря разработке соответствующих высокоэффективных пластификаторов в виде эфиров поликарбоксилата, а также благодаря использованию микрокремнезема стало возможным производство подвижных бетонов с водоцементным отношением ниже 0,25. Предел их прочности на сжатие может достигать и превышать 100 МПа. Поскольку большинство характеристик высокопрочного модифицированного бетона вполне сравнимо со свойствами стандартных бетонов, в разработке рецептур первых центральную роль играют общие качественные критерии сырья. Например, этот бетон получают на основе чистых заполнителей с хорошим зерновым составом (на фракционированном щебне из плотных и прочных горных пород, песке с пустотностью не выше 40%). При подтверждении пригодности компонентов рецептуры должны учитываться как качество, так и однородность показателей основных свойств.

Выбор мелкозернистых минеральных материалов играет при производстве высокопрочных бетонов значительную роль, особенно важны форма зерна и его гранулометрический состав, а также механические и минералогические/петрографические свойства, химическое и физико-химическое взаимодействие с цементным камнем. Существенные требования к исходным компонентам высокопрочных бетонов, по сравнению с традиционным бетоном, состоят в необходимости снижения применяемых водоцементных отношений. Для этого, в частности, используются мелкозернистые плотные горные породы с незначительной водопотребностью [2].

Разработка бетонов с постоянно возрастающей прочностью является актуальной задачей. В конце 80-х во Франции и Канаде с использованием достижений механохимии, нанотехнологий на макроуровне начались широкомасштабные исследовательские работы по разработке «высоких» бетонов с экстремально высокой прочностью и повышенным коэффициентом долговечности. В настоящее время практически возможно произвести бетон с пределом прочности при сжатии более 150 МПа и успешно из него строить. В специальных лабораторных условиях даже удалось изготовить бетон с пределом прочности 800 и более МПа. Ультравысокопрочными, или сверхпрочными («Ultra High-Performance Concrete» UHPC), считаются бетоны, если их предел прочности превышает 100 МПа. Основываясь на составе такого бетона, ему было дано в международной литературе определение «Beton de Poudres Reactives» (BPR), или «Reactive Powder Concrete» (RPC), что по сути означает «Высококачественный мелкозернистый или реактивно-порошковый бетон». Реактивные порошковые композиты – специальные высокопрочные фибронаполненные растворы с высоким содержанием микрокремнезема и химических добавок, прежде всего, суперпластификаторов.

Необходимое механическое сцепление и зацепление зерен заполнителя напрямую зависят от максимальной и минимальной величины его зерна и гранулометрии. Поскольку результаты исследований показали прямую зависимость между уменьшением диаметра зерна и пределом прочности при сжатии, то максимальная величина зерен заполнителя обычно ограничивается 1 мм, а минимальная – 0,125 мм. Главным во всех случаях является уменьшение диаметра зерна заполнителя в сравнении с традиционным бетоном. Для обеспечения сверхкомпактности и гомогенности бетонной структуры необходима оптимальная гранулометрия, при которой учитываются и мелкие частицы (наполнители,

каменная мука с размером зерна менее 0,063 мм). В то время как классический реактивно-порошковый бетон состоит из мельчайших зерен (самое большое из них 1 мм), тем не менее, можно производить ультравысокопрочный бетон, используя крупный заполнитель – горную породу с величиной зерна от 8 до 16 мм; при этом достижимы величины прочности 150 МПа и выше [2].

Для производства ультравысокопрочных бетонов широко используются тонкомолотые кристаллические кварцы. Кварцевая мука принадлежит к тому же диапазону дисперсности, что и цемент. Эти инертные добавки характеризуются высокой прочностью и твердостью. Максимальная эффективность достигается при специальной термической обработке этих материалов и при величине зерна между 5 и 25 мкм. Средний размер зерна кварцевой муки должен составлять примерно 10 мкм. Сейчас стали говорить и о нанозаполнителях, в том числе, о нановолокнах, которые могут сыграть революционную роль в повышении прочности и улучшении других свойств этих композитов.

При применении высокоэффективных химических добавок, активных пуццолановых тонкодисперсных составляющих, а также мелкозернистых горных пород с высокой однородностью, таких как базальт, боксит, диабаз, создаются гомогенные бетонные матрицы, которые, при соответствующей обработке и уплотнении, не образуют пустот.

Для повышения прочности бетона и снижения возрастающего эффекта хрупкости, как правило, на помощь приходят волокна или смеси волокон. Использование фибры в строительных материалах на основе цемента практикуется уже давно. Первый патент на армированный стальной фиброй бетон был выдан в 1872 году. В XX веке были проведены многочисленные эксперименты с различными типами фибры. Однако первые подробные научно обоснованные концепции проектирования армированных фиброй бетонных композитных материалов появились только в последние годы. В сочетании с современными методами анализа и обработки строительных материалов, эти подходы открывают дорогу для целенаправленной разработки инновационных высокотехнологичных композитов на основе цемента. Новые типы бетонов способны произвести революцию в области планирования, разработки, определения размеров, проектирования и возведения конструкций, а также в области реконструкции специализированных зданий. Последние достижения технологии фибробетона наиболее полно воплощают в себе следующие два новых типа высокотехнологичного фибробетона: высокопластичный бетон и текстиль-бетон. Они представляют собой композитные строительные материалы, в которых стальная дисперсная или текстильная арматура из полимерного, углеродного или стекловолокну уложена в тонкозернистую бетонную матрицу. Именно развитие текстильно-волоконного производства тканевых объемных каркасов из высокопрочных полимерных и щелочестойких стеклянных нитей в развитых зарубежных странах явилось мотивацией для разработки во Франции и Канаде в конце XX века реакционно-порошковых бетонов. Бетон из таких тонкозернистых смесей должен растекаться под действием собственного веса при содержании воды 10–12 % от массы твердых компонентов, чтобы заполнить полностью густую сетчатую структуру тканого каркаса и все сопряжения филигранной формы. Эти бетоны с суперпластификаторами, без крупных заполнителей, с особо мелким кварцевым заполнителем, наполненные каменными тонкодисперсными материалами (мукой) и микрокремнеземом, являются одновременно самоуплотняющимися бетонами [3].

Самоуплотняющиеся бетоны («Self-Compacting Concrete» SCC) – это бетоны, воздух из бетонных смесей которых удаляется без применения энергии уплотнения, они подобно вязкой жидкости заполняют форму или опалубку и показывают высокую устойчивость к расслаиванию смеси. Высокая подвижность и стойкость к расслоению (высокая связность) таких смесей гарантируют высокую однородность, минимальный объем пор и постоянство прочностных характеристик бетона, хорошее качество

поверхности и долговечность бетонных конструкций. У большинства самоуплотняющихся бетонов водоцементное отношение (В/Ц) составляет 0,3–0,4, что дает высокую раннюю прочность, позволяет получить бетоны с высокой морозостойкостью до $F = 400$ и выше и водонепроницаемостью до $W = 20$, ускоряет оборот опалубки и выпуск железобетонных изделий. Ускорение производства работ на объекте в сочетании с улучшением условий труда – все это позволяет самоуплотняющимся бетонам становиться все более привлекательным материалом в производстве товарного бетона и железобетонных изделий.

Общим требованием ко всем композициям для изготовления высокотехнологичных бетонов является оптимизация гранулометрического состава заполнителя с целью обеспечения наиболее плотной упаковки зерен. Известны два способа оптимизации состава [4]:

1. Получение эталонной кривой гранулометрического состава минеральной части композита.

2. Смешивание реальных сырьевых компонентов в определенном соотношении.

Эталонными считаются непрерывные кривые рассева дисперсных систем, обеспечивающие наибольшую плотность упаковки. Примером подобных «идеальных» кривых могут служить известные кривые просеивания, предложенные Фуллером (1907) или Андреасеном (1930), уравнение которых имеет вид

$$\frac{G_{np}}{100} = \frac{X^n}{D_{\max}^n}, \quad (1)$$

где G_{np} – проход, %, через сито размером X , мм; D_{\max} – наибольшая крупность зерна в смеси; n – коэффициент распределения, равный по Фуллеру 0,5, по Андреасену (для пространственного распределения) – 0,37.

Или кривые просеивания, предложенные Функом и Дингером (1994), уравнение которых имеет вид:

$$\frac{G_{np}}{100} = \frac{X^n - D_{\min}^n}{D_{\max}^n - D_{\min}^n}, \quad (2)$$

где D_{\min} – наименьшая крупность зерна в смеси, мм; остальные обозначения те же, что и в формуле (1).

В отличие от российских рекомендаций по отдельному учету щебня и песка при подборе состава традиционных бетонов (причем песок различается только по модулю крупности), при расчете гранулометрии минеральной части самоуплотняющихся и других высокотехнологичных бетонов необходимо строить совместную кривую просеивания, которая должна быть как можно ближе к «идеальной» кривой просеивания. Первый способ предполагает тщательную классификацию исходных сырьевых компонентов, а также проведение соответствующих испытаний, что определяет большую трудоемкость и стоимость этого способа. Смешение различных компонентов известного фракционного состава в оптимальном соотношении с целью приближения гранулометрического состава смеси к эталонной кривой или непосредственно из условия достижения наибольшей плотности упаковки проще и чаще применяется на практике, хотя и не дает гарантии достижения наилучшего результата. Как правило, для получения кривой просеивания, близкой к идеальной, недостаточно только двух природных минеральных компонентов, выполняющих функцию заполнителя. Необходимо либо вводить третий компонент, либо модифицировать имеющиеся пески и щебни [4].

В данной работе изучалось влияние оптимизации гранулометрического состава заполнителя на свойства тяжелого бетона. Основной состав бетона, рассчитанный по традиционному методу абсолютных объемов, включал (в кг/м³): цемент (ЦЕМ I 42,5Н) – 295, гранитный щебень фракции 10-40 мм – 1435, песок (средний, модуль крупности 2,12) – 591, вода – до достижения удобоукладываемости бетонной смеси по показателю жесткости (10 с). Заполнитель № 1 (контрольный) содержал указанные выше стандартные песок и щебень. Заполнитель № 2 с гранулометрическим составом, соответствующим «идеальной» кривой просеивания по Функу (2), был получен рассевом на стандартном наборе сит применяемых песка и щебня с выделением узких фракций и их смешением в нужном соотношении. Заполнитель № 3 характеризовался оптимальным гранулометрическим составом, найденным методом экспериментальной оптимизации по критерию наибольшей насыпной плотности [5].

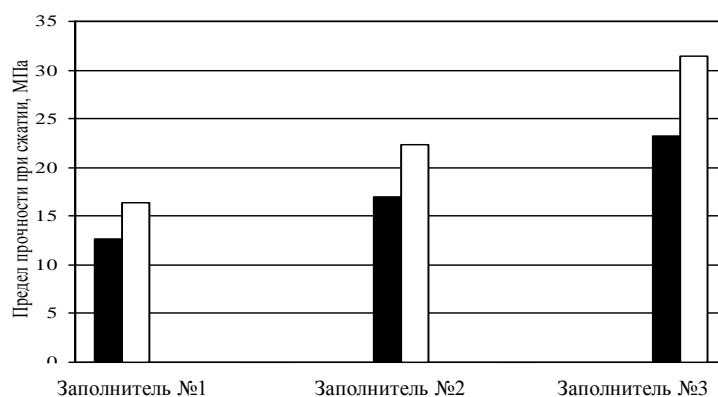


Диаграмма зависимости прочности бетона
от вида заполнителя: в возрасте ■ 7 и □ 14 суток

Оптимизация гранулометрического состава заполнителя при одном и том же расходе цемента позволила повысить предел прочности при сжатии образцов бетона как в возрасте 7 суток, так и в возрасте 14 суток в среднем на 35 % (для заполнителя № 2) и на 92 % (для заполнителя № 3) по сравнению с применением заполнителя № 1 контрольного зернового состава (рисунок).

В перспективе применение на практике найдет вся гамма бетонов – от обычных традиционных до многокомпонентных и высококачественных. Однако постепенный переход к более эффективным видам бетона будет предопределен их более высоким качеством, и соответственно большей конкурентоспособностью на строительном рынке, большими возможностями в создании новых видов конструкций, возведении зданий и сооружений, всемерным снижением эксплуатационных затрат и инвестиционных рисков при строительстве сложных инженерных объектов.

Библиографический список

1. Баженов, Ю.М. Технология бетонов XXI века / Ю.М. Баженов // Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. - С. 9-19.
2. Хольшемахер, К. Технология и исследования производства ультравысокопрочного бетона UNFB / К. Хольшемахер, Ф. Ден // Международное бетонное производство. 2004. № 3. С. 28-34.
3. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. Ч. 2. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. 2007. № 6. С. 8-11.
4. Рыжов, И.Н. Самоуплотняющиеся бетонные смеси. Производство и применение / И.Н.Рыжов, А.Н. Романов // Цемент. Бетон. Сухие строительные смеси. 2008. № 1. С. 71-77.

5. Белов, В.В. Оптимизирование композиций для изготовления прессованного мелкозернистого бетона / В.В. Белов // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: периодич. науч. издание. Воронеж – Тверь: РААСН. ТГТУ, 2007. Вып. 6. С. 27-35.