

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ И СВЕРХПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ: ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Благодаря своим превосходным свойствам — отличному соотношению прочности к объемной плотности, высокой плотности и долговечности — высокопрочный бетон все чаще используется для решения различных практических задач строительства. В последние годы высокопрочный бетон был включен в нормативные строительные документы Германии и Европы с присвоением класса прочности до С100, что заложило прочную основу для применения подобных бетонов.

С точки зрения современной технологии, производство высокопрочного бетона сегодня не представляет принципиальных трудностей. Тем не менее неперенное достижение проектных качеств свежего и затвердевшего бетона, а также выбор технологически и экономически оптимального состава бетона требуют серьезной научной и практической подготовки. Еще в большей степени это относится к производству и применению сверхпрочного бетона — сверхкоррозионностойкого плотного материала, прочность на сжатие которого превышает 150 МПа. В данной статье рассматривается технология изготовления высокопрочных и сверхпрочных бетонов и представляются основные сферы их применения.

КЛАССЫ ПРОЧНОСТИ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОИЗВОДСТВА

Под высокопрочным бетоном мы понимаем плотные бетоны класса прочности

выше С55 (данная цифра обозначает характерную прочность на сжатие выдержанного в воде бетонного цилиндра высотой 300 мм и диаметром 150 мм в возрасте 28 дней). В Германии и Европе разработаны стандарты для бетонов класса прочности до С100 [1, 2]. Бетон на легком заполнителе также возможно изготавливать как высокопрочный бетон. Немецкие и европейские нормы предусматривают классы прочности от LC55 до LC80.

Для производства высокопрочного бетона водоцементное отношение (отношение В/Ц) должно быть значительно ниже 0,4, за счет чего уменьшается пористость и повышается прочность матрицы цементного камня. На рисунке 1 показана принципиальная зависимость между пористостью и прочностью на сжатие цементного камня [3]. 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 пуццолановых вяжущих.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, РЕЦЕПТУРА И ПРОИЗВОДСТВО

В качестве вяжущих могут употребляться в принципе все стандартные типы цементов. При выборе цемента следует обратить внимание на следующие позиции:

- совместимость цемента и пластификатора;

Рис. 1. Принципиальная зависимость между пористостью и прочностью на сжатие цементного камня [3]

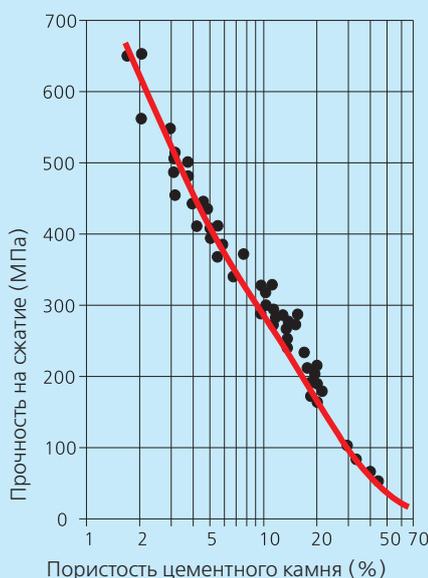


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава заполнителей для производства высокопрочных бетонов: размер самого крупного зерна составляет 16 мм [5]

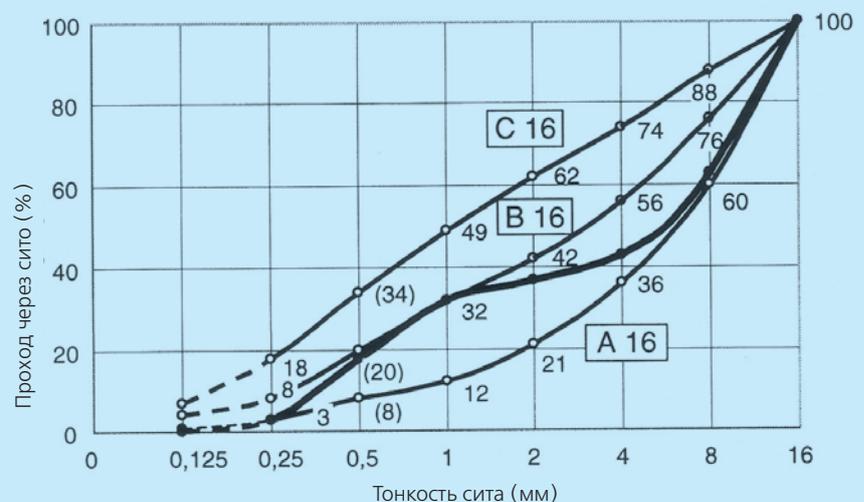


Рис. 3. Аутогенная усадка в течение первых 28 дней после окончательного затвердевания исследуемого высокопрочного бетона с добавлением SAP и без него





Виадук Мийо во Франции с крайне высокими опорами из высокопрочного бетона (фото: Николас Янберг)

- водопотребление или тонкость помола;
- характер нарастания прочности и желаемое значение конечной прочности;
- характер выделения тепла в процессе гидратации с учетом размеров строительной конструкции.

Чтобы получить высокую начальную прочность, необходимо использовать портландцемент (СЕМ I). На практике отлично проявили себя цементы класса СЕМ I 42,5 R, особенно те, которые отличаются низким содержанием трикальция алюмината (СЗА). Как показывает опыт, в случае производства крупногабаритных элементов или при повышенной температуре окружающей среды целесообразно скомбинировать портландцемент и шлакоцемент, заменив также одну часть портландцемента на золу-унос каменного угля. За-

полнители должны отвечать требованиям соответствующих норм (в Германии: DIN 4226 4.). Важную роль играют прочность, водопоглощение (форма зерна, гранулометрический состав) и химическая активность (предотвращение щелочных реакций). Чтобы уверенно выйти на прочность выше 100 Н/куб. мм, рекомендуется применять мелкий базальтовый, габбровый или гранитный щебень.

Кривая гранулометрического состава должна проходить между эталонными кривыми просеивания А и В в соответствии с нормой DIN 1045-2 [1] 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 (рис. 2).

Составы смесей для высокопрочных бетонов

Компоненты	Содержание (кг/куб. м бетона)	
	С70	С80
Цемент СЕМ I 42,5 R Цемент СЕМ I 42,5 R-HS	380	450
Суспензия микрокремнезема, состоящая из: воды твердого вещества	60 30 30	90 45 45
Зола-унос каменного угля	60	—
Заполнитель	1 812	1 776
Песок 0/2 мм (30%)	544	533
Щебень 2/8 мм (25%)	453	444
Щебень 8/16 мм (45%)	815	799
Вода затворения	89,8	78,6
Пластификатор (П), состоящий из: воды твердого вещества	16 10,4 5,6	22 14,3 7,7
Замедлитель твердения (З), состоящий из: воды твердого вещества	—	1 0,75 0,22
Полипропиленовая фибра	—	2
Содержание воздуха	—	—
Итого	2 427	2 420

В качестве минеральных добавок при производстве высокопрочных бетонов используются: микрокремнезем, зола-унос каменного угля, метакаолин, нанокремнезем (кремневая кислота) и каменная мука (кварцевая и известняковая мука). Микрокремнезем имеет в данном контексте особое значение: сферические частицы микрокремнезема диаметром примерно 0,2 микронметра 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. В недавнем прошлом особой популярностью пользовались пластификаторы на основе сульфатов нафталина и меламин (действие осуществляется за счет электростатического отталкивания одинаково заряженных ионов на поверхности частицы, а также за счет уменьшения поверхностного натяжения воды). В последние годы все большее применение находят эфиры поликарбонилата, которые наряду с вышеперечисленными эффектами обладают дополнительным преимуществом: структуры макромолекул полимера, которые скапливаются на поверхности частицы, фактически берут на себя функцию распорок. В данном случае речь идет о пространственной (стерической) стабилизации. По сравнению с другими реагентами, даже минимальная доза продуктов на основе эфиров поликарбонилата обеспечивает адекватное разжижающее действие и продлевает сроки удобоукладываемости бетонной смеси. При этом необходимо учитывать замедление гидратации цемента.

Как правило, эффективность или совместимость пластификатора с цементом и тонкодисперсными компонентами бетонной смеси, а также дозировка испытываются в ходе соответствующих экспериментов.

СОСТАВ

Состав смеси для высокопрочных бетонов определяется в соответствии с областью применения и подвергается специальной проверке. В таблице приводятся образцы составов смесей для бетонов класса прочности С70 и С80.

ПРОИЗВОДСТВО И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА

Главной задачей при производстве высокопрочных бетонных смесей является обеспечение достаточной удобоукладываемости бетонной смеси в течение периода, предусмотренного строительной практикой. Для этого необходимы:

- постоянный контроль влажности заполнителей;
- высокая точность дозировки;
- использование смесителей, отличающихся высокой интенсивностью смешивания;
- определение последовательности загрузки компонентов смеси и соответствующей продолжительности смешивания;
- при работе с товарным бетоном необходимо учитывать время, необходимое для транспортировки и укладки бетона, и соотносить его с началом твердения; при необходимости следует добавить замедлитель;
- определение правил дополнительной дозировки пластификатора на строительной площадке.

Удобоукладываемость бетона проверяется в ходе соответствующих испытаний в реальных условиях (смешивание, транспортировка, укладка, последующий уход за бетоном). Для высокопрочных бетонов в особенности рекомендуются высокоподвижные смеси (осадка конуса с применением шокового воздействия 50... 65 см), поскольку они легко поддаются перекачке бетононасосом.

Уход оказывает значительное влияние на качество бетона. Предпочтение следует отдавать влажностной обработке. В условиях высоких требований к непроницаемости и долговечности элементов конструкции продолжительность ухода должна составлять не менее трех дней.

Чтобы избежать ошибок при производстве, укладке и уходе за бетоном, необходимо составить план контроля качества (ср. DIN 10452 [1], приложение Н), который включает:

- контроль со стороны производителя бетона (выработка требований к исходным материалам, техническому оборудованию, характеристикам бетонной смеси и затвердевшего бетона; разработка заданных параметров и допустимых отклонений);
- контроль со стороны потребителя бетона;
- действия в случае недопустимых отклонений от требований (например, отказ от приема бетона);
- определение ответственных лиц.

ПРОЦЕСС ЗАТВЕРДЕВАНИЯ БЕТОНА, АУТОГЕННАЯ УСАДКА

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» мы обозначаем 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 распределенных 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. при возведении павильона FIFA к чемпионату мира в Кайзерслаутерне. Сооружение представляет собой филигранную конструкцию из самоуплотняющегося армированного фиброй бетона с прочностью на сжатие цилиндра 145 [6]. На рисунке 3 показаны графические изображения аутогенных усадочных деформаций с момента окончательного схватывания бетона с добавлением SAP и без него. Внутренний уход позволил значительно сократить аутогенную усадку, не оказав при этом негативного воздействия на удобоукладываемость бетона (осадка конуса — 780 мм), а также его прочность на сжатие и на изгиб.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Высокопрочные бетоны значительно быстрее набирают прочность, чем традиционные бетоны. Причиной этому служит низкое водоцементное отношение, а также более активное выделение тепла вследствие быстрой гидратации и высокого содержания цемента. Нарастание прочности на растяжение и модуля упругости по времени происходит еще быстрее, чем рост проч-

ности на сжатие. Соответственно повышению класса прочности бетона на сжатие уменьшается прирост прочности бетона на растяжение.

Высокопрочные бетоны отличаются большей хрупкостью по сравнению с традиционными бетонами [7], что обусловлено их более однородной структурой в отличие от бетонов обычной прочности. Трещины быстро распространяются по всей структуре, что приводит к образованию плоскостных изломов и к растрескиванию зерен заполнителя.

Процессы, которые с течением времени вызывают деформации бетонов обычной прочности, как правило, также характерны для высокопрочных бетонов, однако с некоторыми отличиями:

- уменьшение деформации ползучести;
- уменьшение влияния толщины строительной конструкции и относительной влажности воздуха окружающей среды;
- сокращение сухой усадки (за счет выделения влаги в окружающую среду);
- увеличение аутогенной усадки вследствие внутреннего высыхания.

В опубликованном докладе Международной федерации по бетону fib освещается текущее положение дел в области исследований механических характеристик высокопрочного бетона.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

Благодаря малому объему капиллярных пор скорость проникновения жидких и газообразных веществ в высокопрочный бетон значительно ниже аналогичных показателей бетонов обычной прочности. Следовательно, от подобных бетонов мы можем ожидать как значительно более низких темпов проникновения агрессивных сред (что является преимуществом с точки зрения коррозионной защиты арматуры), так и более высокой устойчивости к химическому воздействию, среди прочего, антигололедных реагентов (технической соли), а также при износе.

При оценке долговечности высокопрочных бетонов прогнозирование образования трещин, возникающих на поверхности бетона или в матрице вследствие, например, аутогенной усадки, до сих пор представляется проблематичным.

Судить о подобных трещинах мы можем, например, по измерениям проницаемости кромочных зон бетона. При определении глубины карбонизации высокопрочных бетонов максимальный уровень карбонизации также зафиксирован в зонах трещинообразования.

При пожаре высокопрочные бетоны в отличие от бетонов обычной прочности значительно теряют в прочности уже при температуре ниже 300 °С. Если конструкции из высокопрочного бетона усилены стальной арматурой, период огнестойкости опреде-

ляется, в основном, началом откалывания бетонного слоя поверх арматуры.

С увеличением плотности цементной матрицы затрудняется процесс выхода водяного пара, возникшего в результате нагревания. Из-за высокого внутреннего давления увеличивается опасность взрывоподобного скалывания бетонного слоя. Данную проблему можно решить путем добавления полипропиленовой фибры, которая при температурах около 150–170 °С начинает плавиться, образуя каналы, благодаря которым давление пара понижается.

СВЕРХПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ

Интересной разработкой является так называемый сверхэффективный бетон (УНРС = Ultra High Performance Concrete), прочность которого колеблется в пределах 150 МПа и 250 МПа.

Данный бетон позволяет создавать конструкции и сооружения, отличающиеся одновременно как высокой несущей способностью, так и тонкостью контуров и долговечностью. Помимо правил производства высокопрочных бетонов для изготовления УНРС были разработаны следующие технологические требования:

- дальнейшее сокращение водоцементного отношения до $V/C = 0,2$;
- непременно использование микрокремнезема и пластификатора;
- оптимизация плотности упаковки зерен заполнителя вплоть до нановеличин;
- ограничение максимального размера крупнейших зерен до 8 мм, как правило, до 2 мм;
- использование заполнителей из горных пород повышенной прочности;
- в некоторых случаях затвердевание в условиях повышенного давления (примерно до 500 бар) и повышенной температуры (до 250 °С).

С целью сокращения взрывоопасного скалывания материала и повышения его прочности на растяжение или на изгиб добавляются, как правило, от 1,5 до 2,5% от объема мелкой стальной фибры. Обзор данной

новой технологии вы можете найти, например, в сборнике [8].

СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Применение высокопрочных бетонов предлагает следующие преимущества:

- уменьшение габаритов опалубки для колонн, балок и стеновых элементов;
- уменьшение строительной толщины или увеличение несущей способности конструкций, работающих на изгиб;
- создание более изящных контуров при увеличении длины пролетов конструкций, работающих на изгиб (большепролетные мосты);
- одинаковые размеры опалубки в условиях заводского производства колонн, рассчитанных на различную нагрузку, или для производства колонн для всех этажей при монолитном строительстве (высокопрочный бетон на нижних этажах);
- сокращение расхода бетона и арматуры и, соответственно, транспортировочной и монтажной массы, более высокая начальная прочность, более ранняя распалубка и предварительное обжатие, что обеспечивает возможность более ранней эксплуатации элемента;
- более высокая плотность, водо- и газонепроницаемость за счет низкого содержания капиллярных пор;
- более высокая износостойкость;
- повышенная коррозионная защита арматуры за счет чрезвычайно медленного распространения карбонизации;
- повышенная стойкость к химически активным веществам.

До сих пор основными областями применения высокопрочных бетонов являлись:

- высотное строительство, возведение мостов;
- непроницаемые для жидкостей резервуары/поверхности в установках для хранения, дозирования и транспортировки экологически опасных жидкостей;

- облицовка водоочистных установок;
- промышленные напольные покрытия;
- бетон для несгораемых сейфов.

На фото в качестве примера из области мостостроения представлен виадук Мийо во Франции с крайне высокими опорами из высокопрочного бетона.

В. МЕЦЕРИН, доктор, профессор Института строительных материалов, Технический университет Дрездена (Германия)
(Из сборника ICCX/2007)

Литература

1. DIN 1045-2 Norm, 2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton-Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag, Berlin.
2. DIN EN 206-1 Norm, 2001-07. Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000, Beuth Verlag, Berlin.
3. Roy D. M., Gouda G. R.: Optimization of Strength in Cement Pastes. Cement and Concrete Research Vol. 5 (1975) No. 2, S. 153–162.
4. DIN EN 12620 Norm, 2003-04. Gesteinskörnung für Beton. Beuth Verlag, Berlin.
5. König G., Tue N. V., Zink M.: Hochleistungsbeton — Bemessung, Herstellung und Anwendung. Ernst & Sohn, Berlin, 2001.
6. Mechtcherine V., Dudziak L., Schulze J., Stahr H.: Internal curing by Super Absorbent Polymers — Effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete. International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, O. M. Jensen et al. (eds.), RILEM Proceedings PRO 52, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 87–96, 2006.
7. Mechtcherine V., Müller H. S.: Fracture behaviour of High Performance Concrete. Finite Elements in Civil Engineering Applications, M.A.N. Hendriks & J.G. Rots (eds.), Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, pp. 35–44, 2002.
8. Schmidt M., Fehling E., Geisenhanslake C. (eds.): Ultra High Performance Concrete (UHPC) — Proceedings of the 1st International Symposium on Ultra High Performance Concrete; Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, Heft 3, 2004.

Новости

ГК «СОДРУЖЕСТВО» ОТМЕТИЛА СВОЕ 20-ЛЕТИЕ ОТКРЫТИЕМ ЕЩЕ ОДНОГО ПРОИЗВОДСТВА!

28 октября на заводе «HAUS-KONZEPT Содружество», входящем в холдинг «Содружество», состоялось торжественное открытие первого в России производства по электронной силовой сортировке пиломатериалов для склейки большепролетных клееных деревянных конструкций (БҚДК). Аналогов подобному производству в России нет. В процессе эксплуатации конструкция большепролетных зданий приходится выдерживать очень большие нагрузки. Новая автоматизированная линия сортировки пиломатериалов позволит оптимально распределить пиломатериалы, обеспечивая заданную прочность и несущую способность конструкции в целом. Запуск линии осуществляется в два этапа. Первый этап — открытие линии по предварительной калибровке и сортировке пиломатериалов. После сушки в сушильных камерах пиломатериалы строгаются, после чего высококвали-

фицированные рабочие оценивают качество доски, отмечают дефекты и определяют сорт. Далее пиломатериалы автоматически распределяются по трем пакетам в соответствии с сортом. Возможности линии предусматривают увеличение количества пакетов. Второй этап — встраивание электронных измерительных систем. Это даст возможность автоматически не только проверить на наличие поверхностных дефектов каждую доску, но и определить прочность пиломатериалов. Такие технологии широко распространены на Западе, и их применение позволяет сэкономить до 40% пиломатериалов. БҚДК используются для строительства физкультурно-оздоровительных комплексов, теннисных кортов, катков и ледовых стадионов, бассейнов и аквапарков, конных манежей и конюшен, многофункциональных торговых и выставочных центров и др. сооружений. На петербургском строительном рынке сегодня началось активное применение БҚДК завода «HAUS-KONZEPT Содружество».