

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БЕТОНА

В.В. Белов, М.А. Смирнов

За последние годы бетон превратился из трехкомпонентной (цемент, заполнители, вода) в четырех- и даже пятикомпонентную (плюс добавки) систему. Все это позволило не только создать и освоить производство новых видов бетона, но и значительно расширить номенклатуру применяемых в строительстве материалов: от суперлегких теплоизоляционных (с объемной массой менее 100 кг/м^3) до высокопрочных конструкционных (с прочностью на сжатие свыше 200 МПа). Сегодня в строительстве применяется более тысячи различных видов бетона, и процесс создания новых бетонов интенсивно продолжается. Бетон широко используется в жилищном, промышленном, транспортном, гидротехническом, энергетическом и других видах строительства.

Строительные композиты, к числу которых наряду с бетоном относятся растворы, мастики и другие материалы, являются особым видом композиционных материалов, структура которых имеет две стадии формирования: первоначальное образование структуры из пластичных многокомпонентных (и многофазных) сырьевых смесей и последующее «укрепление» структуры затвердевшего материала в результате сложных физико-химических процессов [1].

Наиболее полно современные возможности технологии бетона получили в создании и производстве высококачественных, высокотехнологичных бетонов (High Performance Concrete, НРС). Под этим термином, принятым в 1993 г. совместной рабочей группой ЕКБ/ФИП, объединены многокомпонентные бетоны с высокими эксплуатационными свойствами: прочностью, долговечностью, адсорбционной способностью, низкими показателями коэффициента диффузии и истираемости, надежными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре, высокой химической стойкостью, бактерицидностью и стабильностью объема. Основные требования к нему впервые сформулированы в «Программе стратегических исследований в области автострад», проводимой Федеральным управлением автострад США с 1990 г. Высококачественные бетоны, приготавливаемые из высокоподвижных и литых 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, водонепроницаемость W 12 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, высокую газонепроницаемость. В реальных условиях прогнозируемый срок службы такого бетона превышает 200 лет. Возможно получение и супердолговечных бетонов со сроками службы до 500 лет, что подтверждается исследованиями японских ученых.

Таким образом, НРС – это новый технический уровень стройиндустрии, временами достигавшийся и у нас, но «просящий» 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, связанного с индустрией заполнителей, цемента, химических добавок. Легко прогнозировать, что в ближайшем будущем будет происходить постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными высокопрочными бетонами. В последних, как известно, используются химические модификаторы структуры, свойств и технологических характеристик бетона, в том числе комплексные модификаторы, включающие порой несколько десятков индивидуальных химических добавок, активные минеральные компоненты различной

дисперсности (от 2000 до 25000 см²/г) и, в ряде случаев, композиционные вяжущие вещества, в том числе вяжущие низкой водопотребности, расширяющие добавки (неорганические и органические), дисперсные волокнистые наполнители (углеволокно, стекловолокно, полипропиленовая и кевларовая фибра, асбест, растительные волокна и т.д.), а также другие специальные компоненты. Многокомпонентность бетонной смеси позволяет эффективно управлять структурообразованием на всех этапах технологии и получать материалы с самым различным комплексом свойств [2].

Вместе с тем многокомпонентность системы повышает одновременно требования к определению рецептуры сырьевых смесей, дозированию материалов и перемешиванию бетонной смеси, так как часто требуется вводить модификатор (часто не один, а несколько) в очень небольших количествах и перемешивать высокодисперсные порошки (цемент + наполнитель) до получения однородной массы, что может быть обеспечено только за счет применения соответствующего оборудования. Широко используемый у нас метод абсолютных объёмов, закрепленный ГОСТ 27006-86 «Бетоны. Правила подбора состава», опирается на представление о бетоне как трехкомпонентной системе с минимальным содержанием воды, при котором достигается необходимая удобоукладываемость смеси, соответствующая возможности ее уплотнению вибрированием, желательного под пригрузом, до возможно более полного удаления воздушных пузырьков. При этом бетон приобретает максимальную плотность, прочность и долговечность. Но малоподвижные и жесткие бетонные смеси, для которых этот подход разработан, уходят в прошлое – в связи с неуклонным ростом стоимости энергии и рабочей силы, а также требований охраны труда. В 70-е годы за рубежом, в 80-е у нас – появились добавки – суперпластификаторы, в 90-е – гиперпластификаторы, позволяющие работать с подвижными, литыми и даже самоуплотняющимися бетонными и растворными смесями с получением высокой прочности бетонов и растворов, но при условии тщательного подбора гранулометрического (зернового) состава заполнителей. Как правило, необходимы ещё и микрозаполнители: микрокремнезем, летучие золы, активные и другие минеральные добавки. Сейчас стали говорить и о нанозаполнителях. На сегодняшний день подбор состава высококачественного бетона производят опытным путем либо на основании гипотетических предположений.

Метод подбора состава высококачественного бетона может быть разработан только на основе математизации знаний о сырьевых материалах, закономерностей упаковки частиц сырьевых смесей, в том числе с учетом межчастичных взаимодействий, установления количественных взаимосвязей между основными характеристиками сырьевых материалов, составом смеси, макроструктурой полученного материала и показателями его физико-механических свойств. Проявление физических явлений уплотнения (заполнения пустот) и раздвижки одних минеральных материалов другими с меньшими размерами зерен и их количественная оценка обеспечивают не только заполнение единицы объема монолитным веществом или материалом, но и формирование оптимальной макроструктуры минеральной части сыпучих смесей, что свидетельствует о существовании фундаментальной научной базы для разработки новых, более совершенных методов проектирования состава строительных смесей, в частности бетонных, обеспечивающих возможность получения систем оптимальной макроструктуры и их экстремально выраженных показателей физико-механических свойств. При этом подбор составов композиций для изготовления высококачественного бетона должен обеспечивать не только необходимое количество цементирующего вещества, но и оптимальное распределение его в представительском объеме композита, а также оптимальную гранулометрию заполнителя.

Методика определения оптимальной гранулометрии заполнителя бетонной или растворной смеси проверялась на строительных смесях для изготовления пескобетона [3]. Для нахождения оптимальной гранулометрии заполнителя определяли область соотношений фракций песка, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц заполнителя, при этом критерием плотной упаковки служило максимальное значение насыпной плотности заполнителя. Исследования, проведенные на ОАО КСК «Ржевский», выпускающем в большом

объеме сухие строительные смеси, показали, что наиболее эффективным с точки зрения технологии и затрат на просеивание является разделение песка на фракции с размерами частиц: 0 – 0,5; 0,5 – 1,25; 1,25 – 3,2 мм. Рассев песка, принятого для опытов, на указанные три фракции показал, что их содержание в заполнителе реальных строительных смесей составляет соответственно 30, 46, 24% (контрольный состав).

Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности (рис. 1) позволила наметить состав смеси, соответствующий ее наибольшей насыпной плотности, т.е. состав с оптимальной гранулометрией, а именно: 30% фракции 0 – 0,5 мм, 20% фракции 0,5 – 1,25 мм, 50% фракции 1,25 – 3,2 мм. Далее изготавливались образцы-кубы с размером ребра 70 мм из цементно-песчаной смеси состава 1:4,5 (цемент:песок) нормальной консистенции на песке контрольного и оптимального гранулометрического составов и определялась прочность при сжатии в возрасте 3 и 28 суток (табл. 1).

Таблица 1. Свойства цементно-песчаного бетона (по данным [3])

Гранулометрический состав песка (содержание фракций, %)			Насыпная плотность песка, кг/м ³	Характеристика гранулометрического состава заполнителя	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте	
0 – 0,5 мм	0,5 – 1,25 мм	1,25 – 3,2 мм			3 сут.	28 сут.
30	20	50	1645	Оптимальный	12,3	17,2
30	46	24	1560	Контрольный	10,4	14,6

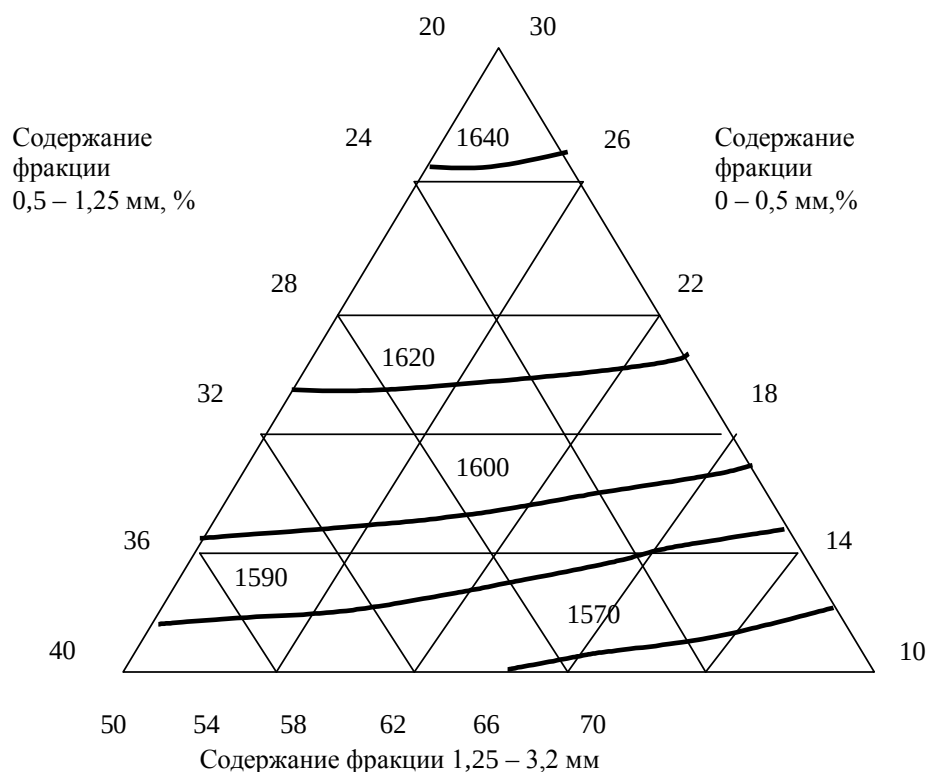


Рис. 1. Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности смесей трехфракционного песка

Применение оптимальной гранулометрии позволило повысить предел прочности при сжатии цементно-песчаного бетона в среднем на 18 % по сравнению с применением песка контрольного гранулометрического состава.

В отличие от традиционных вибробетонов область оптимального водосодержания высококачественного бетона существенно ограничена. Даже незначительные изменения могут привести к ухудшению свойств бетона [1]. На сегодняшний день не существует единого общепризнанного метода для установления оптимального содержания воды и химических добавок в высококачественном бетоне. Ранее одним из авторов статьи разработаны теоретические предпосылки [4] и метод расчета состава прессованного мелкозернистого бетона [5] на основе представлений о влиянии процессов капиллярного структурообразования в сырьевых смесях на структуру и свойства готового бетона. Показано, что при оптимальной влажности сырьевой смеси $W_{\text{мг}}$ в результате действия капиллярных сил тонкодисперсные частицы цемента сосредотачиваются на поверхности грубодисперсных зерен песка и в зонах контакта последних, образуя ячеисто-глобулярную структуру, признаком которой является минимум насыпной плотности сырьевой смеси в пересчете на сухое вещество. Это обуславливает оптимальную структуру композита, характеризующуюся наибольшей концентрацией вяжущего в зонах контакта заполнителя и, как следствие, повышенной прочностью контактных зон. Прочность полученного материала с оптимальной структурой при прочих равных условиях будет наибольшей.

Установлено [5], что значения влажности $W_{\text{мг}}$ и водоцементного отношения $(В/Ц)^*$, соответствующие максимальному глобулированию и максимуму прочности цементного мелкозернистого бетона, можно рассчитать, зная относительное содержание в системе соответственно тонкодисперсного (вяжущего) и грубодисперсного (заполнителя) компонентов, а также их удельные поверхности по БЭТ, по формулам

$$W_{\text{мг}} = \frac{W_{\text{нк}}^{\text{ц}}}{1+C} \cdot \left(1 + C \cdot \frac{S_{\text{уп}}^{\text{п}}}{S_{\text{уп}}^{\text{ц}}}\right), \quad (В/Ц)^* = \frac{W_{\text{нк}}^{\text{ц}}}{100} \cdot \left(1 + C \cdot \frac{S_{\text{уп}}^{\text{п}}}{S_{\text{уп}}^{\text{ц}}}\right),$$

где $W_{\text{нк}}^{\text{ц}}$ – влажность капиллярного насыщения цемента, %; $S_{\text{уп}}^{\text{п}}$ и $S_{\text{уп}}^{\text{ц}}$ – удельная поверхность по БЭТ цемента и песка соответственно, $\text{м}^2/\text{кг}$; C – соотношение между песком и цементом по массе.

Влажность капиллярного насыщения цемента $W_{\text{нк}}^{\text{ц}}$, как показали эксперименты, составляет $0,74B_{\text{п}}$ ($B_{\text{п}}$ – водопотребность цемента в процентах, определяемая по стандартной методике).

При разработке нового подхода для определения состава высококачественного бетона принята гипотеза о формировании оптимальной структуры высокопластичных бетонов аналогично полусухим бетонным смесям. Эта оптимальная структура характеризуется наибольшей концентрацией вяжущего в зонах контакта заполнителя, и как следствие, повышенной прочностью контактных зон. Признаком этой структуры является минимум насыпной плотности сырьевой смеси в пересчете на сухое вещество при определенном водосодержании. В то время как полусухим бетонным смесям требуется интенсивное уплотнение для достижения заданной плотности, высокопластичным высококачественным бетонам для достижения этой цели необходима оптимальная добавка высокоэффективного суперпластификатора.

В табл. 2 приведены результаты испытаний образцов-кубов размерами $7 \times 7 \times 7$ см, изготовленных из пластичных цементно-песчаных смесей состава 1:3 с распылом конуса около 120 мм при малом водосодержании. Пластичность смесей достигалась оптимальной добавкой гиперпластификатора Melflux PP100F. В этой же таблице приведены значения насыпной плотности сырьевой смеси в пересчете на сухое вещество.

Таблица 2. Результаты испытаний образцов пластичных цементно-песчаных смесей состава 1:3 с распливом конуса около 120 мм при малом водосодержании

Влажность смеси, % (В/Ц)	Количество добавки Melflux PP100F от массы цемента, %	Насыпная плотность сырьевой смеси в пересчете на сухое вещество, кг/м ³	Расплы в конуса, мм	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие в возрасте 7 суток, МПа
6 (0,18)	1,55	1135	117	2480	22,0
7 (0,21)	1,25	1095	118	2490	23,6
8 (0,24)	1,2	1075	118	2510	25,6
9 (0,27)	1,1	1105	119	2490	24,8
10 (0,30)	0,95	1150	118	2470	24,0

Новые принципы и основанные на них методики могут применяться для быстрого и практичного определения оптимального содержания воды и химических добавок при варьировании вида цемента, добавок, зернового состава и вида заполнителей, а также других технологических факторов при изготовлении высококачественного бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник / Ю.М. Баженов. М.: Изд-во АСВ, 2003. - 500 с.
2. 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.
3. Белов, В.В. Модифицированные сухие общестроительные смеси оптимальной гранулометрии / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь: ТГТУ, 2007. Вып.10. С. 13 – 17.
4. Белов, В.В. Оптимизирование композиций для изготовления прессованного мелкозернистого бетона / В.В. Белов // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: период.. науч.. издание. - Воронеж – Тверь: РААСН, ТГТУ, 2007. - Вып. 6. - С. 27 – 35.
5. Белов, В.В. Прессованный бетон с оптимальными структурой и свойствами / В.В. Белов // Вестник Тверского государственного технического университета. - Тверь: ТГТУ, 2007. - Вып.12. - С. 3 – 7.