

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.322

### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

*В.В. Белов, М.А. Смирнов, П.В. Куляев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Смирнов М.А.,  
Куляев П.В., 2024

**Аннотация.** Изучение проблемы формирования прочности материалов как дисперсных структур на стыке таких фундаментальных наук, как физическая и коллоидная химия, механика сплошной среды и структурная теория разрушения, открывает возможность эффективного поиска оптимальных составов композитных материалов, построения модели структуры материала в объеме, применения физических законов, а также помогает прогнозировать изменение свойств материала в зависимости от внешних условий. Учет оптимального распределения структурных элементов в объеме строительного материала позволяет достаточно полно описать поведение материала и, в частности, существенно повысить прочность бетона и получить его новые перспективные виды.

**Ключевые слова:** структура материала, оптимальная рецептура, реконструкция пространственных свойств материала, прочность, модификация химическими добавками, наполнители.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-5-11**

Как известно, перспективные направления повышения прочности бетонов с возможностью получения новых видов бетона связаны с применением:

новых модификаторов структуры бетона;  
вяжущего на основе композитов;  
добавок тонкодисперсной структуры;  
волоконистых наполнителей [1, 2].

Сегодня в поле зрения науки и практики находится широкая номенклатура бетонов различного назначения и эксплуатационных свойств. По критерию предела прочности при сжатии их можно условно подразделить на четыре большие группы:

I – рядовые бетоны (с прочностью до 40 МПа), имеющие массовый спрос и потребление на строительном рынке;

II – высокопрочные бетоны (40–80 МПа), широко применяемые в строительстве высотных зданий и сооружений;

III – особо высокопрочные бетоны (80–120 МПа) для конструкций зданий и сооружений повышенной ответственности и большого ресурса эксплуатации;

IV – сверхвысокопрочные бетоны (более 120 МПа) уникального назначения.

Свойства бетона определяются его структурой. Совокупность возможных и необходимых механизмов формирования структуры для каждой группы бетонов систематизирована в статье [3]. Для получения высокопрочных бетонов II группы достаточно эффективны методы повышения их плотности за счет оптимизации зернового состава крупного и мелкого заполнителей, а также за счет снижения водоцементного отношения [3–7].

В проблеме формирования структуры высокопрочных бетонов очень важным моментом является их способность противостоять процессам возникновения и роста трещин под воздействием нагрузок. Для особо высокопрочных (III группа) и сверхвысокопрочных (IV группа) бетонов это актуально, так как при весьма высокой прочности на сжатии они имеют относительно малую прочность при растяжении и низкую трещиностойкость. Иерархия трещинообразования бетонов и совокупности трещин свидетельствуют о целесообразности и необходимости многоуровневого дисперсного армирования. При многоуровневом дисперсном армировании, когда рост субмикротрещин может сдерживаться выращенными в процессе гидратации (самоармирования) кристаллами этрингита, рост микротрещин – волокнами асбеста, а макротрещин – базальтовыми волокнами, достигается весьма эффективное торможение трещин, позволяющее повысить трещиностойкость бетона более чем в четыре раза [3, 8, 9].

При производстве высокопрочных бетонов большое значение имеет процентное соотношение воды и цемента, существенно меньшее 0,4. Это позволяет снизить пористость и, соответственно, повысить прочность матрицы цементного камня. Однако снижение водоцементного соотношения отрицательно влияет на удобство практической укладки бетона, что можно устранить только путем повышения содержания вяжущего с добавкой суперпластификаторов. Получение самоуплотняющихся высокопрочных бетонов с суперпластификаторами связано с преодолением трех противоречивых факторов: получением высокой текучести бетонной смеси с распылом конуса 55–70 см (осадка конуса более 20 см), исключением расслаиваемости ее и достижением высокой прочности бетона 100–150 МПа и более [5, 10].

Известно, что один и тот же цемент при твердении в прессованном виде и в виде суспензии (пасты) имеет отношение  $R_{28}/R_1$  (где  $R_{28}$  и  $R_1$  – пределы прочности на сжатие соответственно в возрасте 28 и 1 суток), отличающееся в несколько раз. Поэтому из приведенного анализа условий получения высокопрочных бетонов следует, что оптимальное водоцементное отношение (В/Ц) в бетонах незначительно превышает уровень нормальной густоты (НГ) цементного теста [11]. Это правило оценки водосодержания бетонной смеси должно быть выражено как  $В/Ц = НГ/100$ . Водоцементное отношение бетонной смеси для высокопрочного бетона можно выразить соотношением [11]:

$$В/Ц = К(НГ/100),$$

где  $K$  – коэффициент рецептурной эффективности состава бетона и реологической активности суперпластификатора.

На прочность цементного камня влияет соотношение между кристаллической и гелеобразной составляющими (при оптимальном соотношении достигается лучшая плотность контактов между элементами твердой фазы), а также наличие особо

тонкозернистого микронаполнителя и наноэлементов. Микронаполнитель увеличивает плотность цементного камня, а наноэлементы упрочняют контактную зону. При уменьшении поперечного размера нитевидных кристаллов эттрингита прочность их повышается [12]. Реальный цемент является полиминеральным материалом. Структура затвердевшего цементного камня состоит из кристаллических элементов различных размеров и конфигурации. В соответствии с законами физики твердого тела и вероятностно-статистической теорией прочность подобных материалов зависит от размеров структурных элементов, характера пористости (применительно к цементному камню) и прочности контактов между элементами твердой фазы.

С помощью электронного сканирующего микроскопа и малоугловой рентгенографии авторами [13] было изучено влияние структуры цементного камня на его прочность и энергию разрушения. Применение химических добавок и различных режимов твердения позволило в заметных пределах изменять размеры кристаллов и пор в цементном камне и, соответственно, его прочность. С уменьшением среднего размера кристаллов прочность цементного камня возрастает. Поэтому для получения высокопрочных бетонов особое значение имеет создание плотной тонкозернистой структуры цементного камня.

Повышения плотности и прочности бетона можно добиться скорректированным составом смеси, оптимальным количеством заполнителей, наполнителя и их плотной упаковкой [14]. Применение наполнителей различного происхождения в оптимальном количестве в бетонной смеси позволяет регулировать зерновой состав и достигать некоторых требуемых характеристик сырьевой смеси и бетона [15]. Наполнитель в составе смеси способен снизить пористость бетона и улучшить структурообразование. Кроме того, заменяя часть вяжущего вещества наполнителем, можно улучшить коррозионную стойкость бетона, в частности карбонизационную, причем глубина карбонизации будет зависеть от доли наполнителя в смеси и его удельной поверхности [16].

Использование порошкообразных минеральных модификаторов (ПММ) [17], состоящих из микрокремнезема, алюмо- и карбонатсодержащей добавок в составе бетона позволяет получить камень с высокой контактной зоной, минимальным содержанием пор и микротрещин. Это объясняется спецификой структуры компонентов, обусловленной активно сформированной матрицей вяжущего за счет использования запасенной в порах воды, а также микроструктурой контактных зон заполнителя и цементного камня [17], т.е. полезность микрочастиц в том, что они вбирают в себя воду и отдают ее при гидратации вяжущего для формирования оптимальной структуры бетона.

Заметное влияние на структуру и свойства бетона оказывает заполнитель. Целесообразно, чтобы прочность крупного заполнителя была на 20 % выше прочности бетона [18]. Поэтому на известняковом заполнителе получают бетоны с максимальной прочностью 40–60 МПа, на гранитном – с прочностью 80–120 МПа, на особо прочных горных породах (габбро-диабазе, базальте) – с прочностью 150–180 МПа. Для получения более прочных материалов требуется переход на более мелкие и прочные заполнители, например кварцевые пески из особопрочных горных пород, так как в более мелких зернах более однородна структура и меньше вероятность появления дефектов, снижающих прочность зерен. Введение заполнителя, особенно крупного, огрубляет структуру, повышает вероятность появления серьезных дефектов, в первую очередь в контактной зоне между заполнителем и цементным камнем и, соответственно, понижает прочность бетона [18].

Заполнитель заметно влияет на водопотребность бетонной смеси: с увеличением его содержания и уменьшением крупности водопотребность возрастает. Дополнительная вода, вводимая в бетонную смесь для обеспечения ее заданной подвижности, уменьшает плотность бетона и понижает его прочность в результате образования капиллярной пористости. Введение суперпластификаторов или комплекса «суперпластификатор – микрокремнезем – активизирующий компонент» позволяет существенно снизить водопотребность бетонной смеси, существенно уплотнить и улучшить структуру бетона и тем самым повысить его прочность. В композиционных вяжущих веществах модификаторы, например суперпластификаторы и активные минеральные компоненты, вводятся непосредственно при помоле вяжущего. За счет этого удается увеличить оптимальную дозировку суперпластификатора до 2–3 % (при введении в бетонную смесь 1–1,5 %) и получить вяжущее с повышенной удельной поверхностью (500–600 м<sup>2</sup>/кг), высокой однородностью и оптимальным для получения плотного цементного камня соотношением между различными элементами твердой фазы. В результате бетонная смесь может укладываться при предельно низких водоцементных отношениях ( $V/C \approx 0,2$ ), в то время как для обычной доброкачественной бетонной смеси минимальные значения  $V/C$  составляют приблизительно 0,4, а для бетонной смеси с суперпластификатором – около 0,3. Бетоны на композиционном вяжущем обладают наивысшей плотностью структуры и прочностью.

Следует особо отметить, что применение низких водоцементных отношений обеспечивает быстрый рост прочности высокопрочных бетонов в раннем возрасте. Уже через 8–10 часов прочность может достигать 10–20 МПа, с достаточно высоким расходом цемента, а через сутки – 30–100 МПа. При этом такие бетоны обладают повышенным выделением тепла вследствие быстрой гидратации цемента в раннем возрасте. Это значительно упрощает ведение бетонных работ в зимний период: достаточно применения подогретых смесей и их кратковременного термосного выдерживания без специальных мероприятий, обычно проводимых при зимнем бетонировании. Быстрый набор прочности также резко ускоряет процесс возведения монолитных конструкций и сооружений.

Наиболее эффективно использование в высокопрочных бетонах не отдельных модификаторов, а специально подобранных комплексов в зависимости от назначения бетона и предъявляемых к нему требований. Помимо суперпластификатора вводятся антивоздухововлекающие либо, наоборот, воздухововлекающие или микрогазообразующие добавки, добавки, управляющие структурообразованием, в частности кинетикой схватывания и твердения, расширяющие добавки, активные минеральные компоненты и супертонкие наполнители, волокнистые добавки, наноэлементы и др. Состав комплекса должен соответствовать выбранной технологии и заданным свойствам бетона.

Одной из главных задач при производстве высокопрочных бетонных смесей является обеспечение удобоукладываемости бетонной смеси в течение периода, предусмотренного строительной практикой. Это предполагает:

- постоянный контроль влажности заполнителей;
- высокую точность дозировки;
- использование смесителей, обеспечивающих высокую интенсивность смешивания компонентов;

определение последовательности загрузки компонентов и соответствующей продолжительности смешивания;

учет времени, требующегося для транспортировки и укладки бетона, и соотнесение его с началом твердения (при работе с товарным бетоном); при быстром твердении следует добавить замедлитель;

определение правил дополнительной дозировки пластификатора на строительной площадке [19].

В сравнении с традиционными бетонами у высокопрочных проявляется один существенный недостаток, заключающийся в более интенсивной аутогенной усадке. Это может привести к возникновению сильных напряжений на растяжение в первые же дни после укладки бетона, что, в свою очередь, способствует процессам дальнейшего трещинообразования. При этом за счет внешнего ухода уменьшения аутогенной усадки достичь нельзя. Для борьбы с возникновением трещин в высокопрочных бетонах вследствие аутогенной усадки необходимо наличие микровключений, содержащих свободную воду и равномерно распределенных по всему объему бетона. В качестве таких микровключений весьма эффективно применение полимеров SAP, которые имеют высокую абсорбирующую способность, благодаря чему накапливают молекулы воды и играют, таким образом, роль микронакопителей свободной воды [20].

Дальнейшее создание новых бетонов пойдет по пути использования теории и технологии строительных композиций, причем изучение проблемы формирования прочности материалов как дисперсных структур базируется на стыке таких фундаментальных наук, как физическая и коллоидная химия, механика сплошной среды и структурная теория разрушения. При этом очевидно, что для понимания синтеза прочности и регулирования деформативности структур необходимо уделять должное внимание не только химическим процессам, но и явлениям физического и физико-химического характера, в том числе на стадии приготовления сырьевых смесей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мащенко К.Г. Модификаторы – шаг к повышению качества бетонов и растворов // *Строительные материалы*. 2004. № 6. С. 62–63.
2. Каримов И.Ш. Тонкодисперсные минеральные наполнители в составах цементных композиций: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.23.05. СПб., 1996. 22 с.
3. Гусев Б.В., Дуамбеков Б.С., Чеховский Ю.В., Корегин В.Н. Влияние микронаполнителей на свойства мелкозернистых бетонов // *Изв. вузов. Стр-во и архитектура*. 1987. № 10. С. 127–130.
4. Быховский И.И. Зависимость эффективной частоты вибрирования бетонной смеси от крупности заполнителя // *Вибрационная техника*. М.: НИИИнфстройдоркоммунмаш, 1966. С. 108–113.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавкой микро-кремнезема и суперпластификатора на свойства бетона // *Бетон и железобетон*. 1992. № 7. С. 4–7.
6. Михайлов Н.В. Основные принципы новой технологии бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1961. 53 с.
7. Кононова О.В. Разработка технологии бетона с минеральным наполнением с учетом дисперсности наполнителя и цемента: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.23.05. М., 1989. 20 с.

8. Гусев Б.В. Основные направления развития вибрационного способа уплотнения бетонных смесей / Технология производства сборного железобетона в условиях низких температур: труды. Вып. 175/2. Днепропетровск: ДИИТ, 1975. С. 3–27.
9. Афанасьев А.А. Технология импульсного уплотнения бетонных смесей: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук: 05.23.08. М.: Стройиздат, 1987. 49 с.
10. Волженский А.В., Карпова Т.А. Влияние низких водоцементных отношений на свойства цементного камня при длительном хранении // *Строительные материалы*. 1980. № 7. С. 15–16.
11. Лесовик Р.В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Белгород, 2009. 496 с.
12. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцемент. Минералогический и гранулометрический составы, процессы модифицирования и гидратации. М.: Стройиздат, 1974. 328 с.
13. Ярлушкина С.Х. Физико-химические процессы, их роль в формировании прочности цементного камня с заполнителями // *Структурообразование бетонов и физико-химические методы его исследования: сборник трудов*. М.: НИИЖБ, 1980. С. 60–69.
14. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости // *Вестник СибАДИ*. 2016. Вып. 1 (47). С. 65–72.
15. Толстой А.Д. Долговечность многокомпонентного бетона в условиях действия агрессивных сред // *Вестник ВСГУТУ*. 2019. № 4 (75). С. 83–88.
16. Хежев Т.А., Кажаров А.Р., Журтов А.В., Семенов Р.Н., Желоков Т.Х., Карданов А.А., Ногеров М.Б. Самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны с применением отходов камнедробления // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 1 (44). С. 89.
17. Белов В.В., Образцов И.В. Исследование закономерностей структурообразования строительных цементных композитов в целях получения оптимальных рецептов приготовления сырьевых смесей // *Сборник научных трудов РААСН*. 2017. Т. 2. С. 85–94.
18. Скрамтаев Б.Г. Теория и прочность бетонов. Новые виды бетонов. Харьков: Госнаучтехиздат, 1934. 236 с.
19. ГОСТ 12730.0-2020. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водопроницаемости.
20. Федосов С.В., Акулова М.В. Плазменная металлизация бетонов. М.: АСВ, 2003. 122 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*СМИРНОВ Матвей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

*КУЛЯЕВ Павел Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Белов В.В., Смирнов М.А., Куляев П.В. Основные направления и проблемы при получении современных высокопрочных бетонов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 5–11.

**MAIN DIRECTIONS AND PROBLEMS  
IN PRODUCTION OF MODERN HIGH-STRENGTH CONCRETES**

*V.V. Belov, M.A. Smirnov, P.V. Kulyaev*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The study of the problem of forming the strength of materials as dispersed structures at the junction of such fundamental sciences as physical and colloidal chemistry, solid medium mechanics and structural theory of destruction makes it possible to effectively search for optimal compositions of composite materials, build models of the material structure in volume, apply physical laws and predict changes in material properties depending on external conditions. Taking into account the optimal distribution of structural elements in the volume of construction material makes it possible to fully describe the material management and, in particular, significantly increase the strength of concrete and obtain its new promising types.

**Keywords:** structure of the material, optimal formulation, reconstruction of the spatial properties of the material, strength, modification with chemical additives, fillers.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*BELOV Vladimir Vladimirovich* – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*SMIRNOV Matvey Alexandrovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

*KULYAEV Pavel Viktorovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V., Smirnov M.A., Kulyaev P.V. Main directions and problems in production of modern high-strength concretes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 5–11.