УДК 666.972

© А. Ю. Ковалева, канд. техн. наук, доцент

© М. В. Ступак, аспирант

© А. С. Сидорова, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: kovalevaau@mail.ru, stupak.mariika@mail.ru,
sidorovaas96@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-120-127

© A. Yu. Kovaleva, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© M. V. Stupak, post-graduate student

© A. S. Sidorova, post-graduate student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: kovalevaau@mail.ru, stupak.mariika@mail.ru,
sidorovaas96@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА ТВЕРДЕЮЩЕГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

IMPACT OF ENVIRONMENTAL LOAD ON THE PROPERTIES OF HARDENING HIGH-STRENGTH CONCRETE

Проанализированы нормативные документы, содержащие требования к высокопрочным бетонам. Проведено исследование показателей долговечности высокопрочных бетонов при испытаниях на атмосферостойкость. Установлено, что оценка долговечности высокопрочных композитов по показателям прочности и морозостойкости без учета внешних факторов является недостаточной, что нашло подтверждение при анализе структуры образцов.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, долговечность, стойкость к воздействию атмосферных факторов, микроскопический анализ.

There have been analyzed some reference documents that contain requirements for high-performance concrete. The article presents the study results on the durability of high-strength concrete in weather resistance tests. It has been established that evaluation of durability of high-strength composites by strength and frost resistance without taking into account external factors is insufficient, which is confirmed in analysis of samples' structure.

Keywords: high-strength concrete, durability, weather resistance, microscopic analysis.

Стремительное развитие строительной отрасли диктует необходимость создания новых высокотехнологичных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками, которые позволят внедрять наиболее смелые проектные решения. Одним из таких материалов на данный момент является высокопрочный бетон, который с каждым годом находит все большее применение не только при строительстве уникальных объектов и сооружений, но и при решении более повседневных задач [10].

Впервые данный материал был использован за рубежом в начале 60-х годов XX века [1], а ши-

рокое применение высокопрочный бетон нашел ближе к концу 1980-х гг. В России использование этого вида строительного материала только набирает свои обороты. В связи с возрастанием спроса, а соответственно, и объемов производства высокопрочных бетонов возникает необходимость создания нормативной базы, которая будет отражать требования к сырьевым материалам, области применения данного вида строительного материала, технологии изготовления и методам контроля качества.

На сегодняшний день в нашей стране основным документом, содержащим требования к вы-

сокопрочным бетонам, является ГОСТ 31914–2012¹. Оценка физико-механических показателей в соответствии с данным стандартом дается путем прямых ссылок на нормативы, применяемые для бетонов общестроительного назначения. Однако, несмотря на наличие уточнений, связанных со спецификой свойств высокопрочных бетонов, их недостаточно, чтобы корректно оценить показатели качества композита. Подробный анализ нормативно-технической документации по высокопрочным бетонам был проведен в работе [6].

Определение высокопрочного бетона в современной нормативной документации^{1, 2, 3} построено таким образом, что его главной отличительной особенностью от бетонов общестроительного назначения считается именно повышенный предел прочности на сжатие. Этот параметр является лишь следствием создания более плотной и совершенной структуры цементного камня, благодаря чему такой материал имеет также повышенную стойкость к различным агрессивным факторам, воздействующим на композит в период эксплуатации [11], а соответственно, и повышенную долговечность.

Большинство авторов [5, 7, 9] разделяют факторы, влияющие на долговечность конструкций, на внешние и внутренние. К внутренним факторам относят сырьевые компоненты бетона, используемые при приготовлении бетонной смеси: вяжущее, щелочи которого взаимодействуют с активными минеральными наполнителями, мелкий и крупный заполнители, добавки и воду. Влияние внутренних факторов на показатели долговечности можно регулировать при помощи рационального подбора состава смесей и тщательного входного контроля сырьевых материалов.

К внешним факторам относят температуру и влажность окружающей среды, атмосферные осадки, загрязненность воздуха, различные агрессивные воздействия (химическое, биологическое, механическое).

Воздействия внешних факторов регулировать сложнее, так как они могут возникать как в самом процессе строительства, так и на протяжении эксплуатации, способствуя при этом образованию внутренних напряжений в теле бетона, что, как следствие, приведет к локальным повреждениям и преждевременному износу конструкций.

Анализ ряда исследований, связанных с контролем качества высокопрочных бетонов при монолитном строительстве [2, 3, 8], выявил, что таковой контроль является основной качественной оценкой свойств бетона. При этом контроль необходимо осуществлять как на уровне затвердевшего композита, так и на уровне определения характеристик бетонных смесей. Тем не менее этого недостаточно для оценки эксплуатационной долговечности монолитных конструкций.

Кроме того, назначение состава и оценка долговечности бетона только по показателю прочности и морозостойкости, как это обычно принято, без учета внешних факторов, при воздействии которых будет эксплуатироваться конструкция, может стать причиной разрушения сооружения [12]. Таким образом, возникает необходимость в проведении исследований с целью оценки изменения свойств и структуры бетонного композита, подвергающегося воздействиям попеременного высушивания и увлажнения, не только на стадии сформированной структуры бетона в 28 суток, как это принято в соответствии со стандартной нормативной базой, но и в более ранние сроки. Период интенсивных воздействий, в частности высушивание, увлажнение, изменение температуры внешней среды, на структуру композита начинается при монолитном строительстве, в сроки от двух до семи суток твердения забетонированной конструкции.

Показатели долговечности высокопрочного бетона исследовались по нестандартной методике ЦНИЛ Главкиевгорстроя (за основу которой была взята методика Свердловского НИИ по строительству) [4] для оценки стойкости бетонов к воздействиям атмосферных факторов — попеременного увлажнения и высушивания.

Для этого были изготовлены две серии стандартных образцов-балочек 40 × 40 × 160 мм класса В25 и В60. При проведении эксперимента образцы подвергались испытаниям в возрасте 3, 7 и 28 суток. Бетон класса В25 исследовался как

¹ ГОСТ 31914–2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Введ. 01.01.2014. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 10 с.

² ГОСТ 25192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования (Переиздание). Введ. 01.07.2013. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. 10 с.

³ СП 311.1325800.2017. Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования). Введ. 01.07.2013. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. 10 с.

контрольный, значительно отличающийся по структуре от высокопрочного бетона.

Контроль физико-механических характеристик бетонных образцов проводился каждые 25 циклов тепловлажностных воздействий. Один цикл испытаний представлен в следующей последовательности: 1) высушивание при температуре 105 °С — 8 ч; 2) остывание — 1 ч; 3) насыщение водой — 15 ч. Одновременно проводились измерения плотности и прочности в соответствии со стандартными методиками^{4,5}. Образцы-кубы подверглись испытаниям на морозостойкость по второму базовому методу⁶.

Анализ полученных графиков (рис. 1, 2) показывает, что образцы, подвергавшиеся попеременному увлажнению и высушиванию на ранних сроках твердения, спустя 25 циклов воздействий имеют прирост прочности, превышающий контрольные значения более чем в два раза. Причем данная картина наблюдается как у образцов класса по прочности В25, так и у образцов В60. Испытания бетона класса В25 в возрасте трех суток не производились по причине отсутствия необходимой и достаточной прочности композита. В реальных условиях эксплуатации традиционные бетоны в данном возрасте еще не подвергаются интенсивным внешним воздействиям, а находятся на стадии ухода и набора прочности.

Характер изменений прочности обусловлен тем, что в раннем возрасте, а именно в возрасте трех и семи суток, структура бетона недостаточно сформирована, воздействие повышенных температур на образцы с последующим насыщением водой способствует ускорению процессов гидратации и гидролиза на микроуровне. Однако при последующих циклах наблюдается резкое снижение прочности образцов. Одним из возможных факторов, вызывающих падение прочности, может быть нарушение этапов твердения: ускорение процессов гидратации способствует быстрому образованию пересыщенного раствора, в результате происходит ускоренное формирование кристаллической структурной

сетки, при этом не обеспечивается прочное сцепление между кристаллическими сростками. В свою очередь, образцы-балочки, подвергавшиеся попеременному воздействию через 28 суток нормального твердения, имеют плавный набор прочности благодаря сформированным более прочным кристаллическим связям в теле цементного камня.

Стоит также отметить, что значительное снижение прочности в результате приложения 75 циклов внешних воздействий наблюдается у образцов бетона класса В25, твердевших в нормальных условиях как в течение семи, так и в течение 28 суток. У бетона класса В60 самые значительные потери прочностных характеристик наблюдаются только у трехсуточных образцов. Это связано с тем, что структура высокопрочных бетонов формируется на более ранних сроках, чем у бетонов традиционной прочности.

Испытания на морозостойкость, проводимые в соответствии со стандартом в 28-суточном возрасте, подтверждают наличие более плотной структуры у высокопрочных бетонов. По результатам испытаний образцам бетона класса В25 присвоена марка по морозостойкости F₂150 по потере массы, а для класса В60 этот показатель составляет F₂400.

Однако соответствие бетона класса В60 высокой марке по морозостойкости не гарантирует того, что при воздействии попеременного высушивания и увлажнения не будут происходить изменения на структурных уровнях бетонного композита. Данная гипотеза находит подтверждение при оценке влияния циклических воздействий на плотность бетона.

Также необходимо отметить, что через 25 циклов наблюдается снижение плотности (рис. 3, 4). Образцы, подвергавшиеся воздействиям после 28 суток нормального твердения, имеют в своей структуре большее количество новообразований, а также прочные контакты срастания между кристаллами, следовательно, их плотность выше. Наличие тонкомолотых наполнителей в составе высокопрочного бетона обеспечивает постепенное снижение плотности композита по сравнению с бетоном класса В25. Воздействие попеременного увлажнения и высушивания на ранних сроках твердения бетонных композитов не дает прироста плотности, несмотря на наблюдаемый

⁴ ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Введ. 01.07.2013. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 30 с.

⁵ ГОСТ 12730.3–78. Бетоны. Метод определения водопоглощения. Введ. 01.01.1980. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. 5 с.

⁶ ГОСТ 10060–2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости (с поправками). Введ. 01.04.2019. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. 18 с.

Рис. 1. Изменение прочности бетона (класс В25) при испытаниях на атмосферостойкость

Рис. 2. Изменение прочности бетона (класс В60) при испытаниях на атмосферостойкость

рост прочности, что может свидетельствовать о формировании более рыхлой структуры цементного камня.

Очевидно, что от плотности и пористости структуры бетона будет зависеть его водопогло-

щение. Снижение плотности композита увеличивает водопоглощение, следовательно, снижаются коррозионная стойкость и морозостойкость материала. Такие изменения на структурном уровне часто приводят к получению несоответствий

Рис. 3. Изменение плотности бетона (класс В25) при испытаниях на атмосферостойкость

Рис. 4. Изменение плотности бетона (класс В60) при испытаниях на атмосферостойкость

по показателям морозостойкости, определенным в соответствии со стандартом по образцам, и в затвердевшей конструкции, которая на стадии твердения подвергается различным воздействиям. Кроме того, изменение плотности и пористости при воздействии внешних факторов

в виде попеременного увлажнения и высушивания будет сопровождаться усадочными деформациями цементного камня, что поспособствует увеличению внутренних напряжений и развитию деструктивных процессов, вплоть до появления трещин.

Рис. 5. Структура цементного камня (бетон класса В25; макроуровень): а — после 28 суток нормального твердения, без приложения тепловлажностных воздействий; б — структура цементного камня после 7 суток нормального твердения и 75 циклов воздействий; в — структура цементного камня после 28 суток нормального твердения и 61 цикла воздействий

Рис. 6. Структура цементного камня (бетон класса В60; макроуровень): а — после 28 суток нормального твердения без приложения тепловлажностных воздействий; б — структура цементного камня после трех суток нормального твердения и 75 циклов воздействий; в — структура цементного камня после семи суток нормального твердения и 75 циклов воздействий; г — структура цементного камня после 28 суток нормального твердения и 58 циклов воздействий

Микроскопический анализ позволил оценить влияние температурно-влажностных воздействий на структуру бетонного композита. Под электронным микроскопом были сделаны снимки и получены изображения структур (рис. 5, 6). Эти изображения на макроуровне подтверждают, что при воздействии агрессивных факторов на бетон в начальные сроки твердения формируется рыхлая структура композита, образующиеся кристаллические сростки не имеют надежного сцепления, размеры кристаллов значительно меньше по сравнению с образцами, твердевшими в нормальных условиях.

Обобщая все вышесказанное, можно утверждать, что результатом воздействий, вызванных попеременным высушиванием и увлажнением, которые могут наблюдаться при твердении бетона в конструкциях, будет образование нестабильной структуры кристаллогидратов, снижение сцепления между ними и, как правило, ослабление сцепления на границах структурных матриц. Таким образом, несмотря на то что бетон в конструкции соответствует заданным характеристикам, его дефектная структура не в состоянии обеспечить эксплуатационную долговечность. Оценка эксплуатационной долговечности высокопрочных бетонов исключительно по прочностному показателю и даже по значению морозостойкости не учитывает стойкость материала к внешним воздействиям и особенностям формирования структуры, является недостаточной и требует рассмотрения целого комплекса характеристик.

Библиографический список

1. Баженов Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / под ред. В. С. Демьяновой, В. И. Калашникова. М.: АСВ, 2006. 368 с.
2. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Киселева Ю. А. Особенности системы контроля качества высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2012. № 2. С. 63–67.
3. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Аль-Омаис Д., Зайцев А. С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 18–24.

4. Лецинский М. Ю. Испытание бетона: справочное пособие. М.: Стройиздат, 1980. 360 с.

5. Невилль А. М. Свойства бетона / сокр. пер. с англ. В. Д. Парфенова, Т. Ю. Якуб. М.: Стройиздат, 1972. 344 с.

6. Сидорова А. С., Ступак М. В. Анализ нормативно-технической документации по высокопрочным бетонам // Серия «Современное строительство»: сб. ст. магистрантов и аспирантов. Вып. 2. Т. 2. СПб.: СПбГАСУ, 2019. С. 329–333.

7. Чикин А. В. Технология повышения долговечности бетона с современными добавками // Экология и строительство. 2015. № 3. С. 8–13.

8. Шейнфельд А. В., Киселева Ю. А., Путьрская Л. В. Контроль качества высокопрочных бетонов классов В60 и В90 при возведении монолитных конструкций // Строительные материалы. 2012. № 1. С. 7–15.

9. Штарк И., Вухт Б. Долговечность бетона. Киев: Оранта, 2004. 295 с.

10. Aitcin P.-C. Developments in the application of high-performance concretes // Construction and Building Materials. 1995. Vol. 9. No. 1. Pp. 13–17.

11. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. E&FN Spon, 2004. 198 p.

12. Chang P. K., Peng Y. N., Hwang C. L. A design consideration for durability of high-performance concrete // Cement & Concrete Composites. 2001. Vol. 23. No. 4–5. Pp. 375–380.

References

1. Bazhenov Yu. M. *Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony* [Modified high-quality concrete]. Ed. by Dem'yanova B. C., Kalashnikov V. I. Moscow, ASV Publ., 2006, 368 p.
2. Kaprielov S. S., Sheynfel'd A. V., Kiseleva Yu. A. *Osobennosti sistemy kontrolya kachestva vysokoprochnykh betonov* [Features of the quality control system for high-strength concrete]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2012, no. 2, pp. 63–67.
3. Kaprielov S. S., Sheynfel'd A. V., Al'-Omais D., Zaytsev A. S. *Opyt proizvodstva i kontrolya kachestva vysokoprochnykh betonov na stroitel'stve vysotnogo kompleksa «OKO» v MMDTs «Moskva-Siti»* [Experience of production and quality control of high-strength concrete in the construction of the high-rise complex “OKO” in the Moscow-City MIBC]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2018, no. 1, pp. 18–24.
4. Leshchinskiy M. Yu. *Ispytanie betona. Spravochnoe posobie* [Testing of concrete. Reference book]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 360 p.

5. Nevill¹ A. M. *Svoystva betona* [Properties of concrete]. Transl. from English by Parfenov V. D. and Yakub T. Yu. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 344 p.
6. Sidorova A. S., Stupak M. V. *Analiz normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii po vysokoprochnym betonam* [Analysis of normative and technical documentation on high-strength concrete]. *Seriya «Sovremennoe stroitel'stvo». Sb. st. magistrantov i aspirantov* [In: Series "Modern construction". Coll. of articles of undergraduates and postgraduates]. Iss. 2, vol. 2. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2019, pp. 329–333.
7. Chikin A. V. *Tekhnologiya povysheniya dolgovechnosti betona s sovremennymi dobavkami* [Technology of increasing the durability of concrete with modern additives]. *Ekologiya i stroitel'stvo – Ecology and construction*, 2015, no. 3, pp. 8–13.
8. Sheynfel'd A. V., Kiseleva Yu. A., Putyrskaya L. V. *Kontrol' kachestva vysokoprochnykh betonov klassov V60 i V90 pri vozvedenii monolitnykh konstruksiy* [Quality control of high-strength concrete of classes B60 and B90 in the construction of monolithic structures]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2012, no. 1, pp. 7–15.
9. Shtark I., Vikht B. *Dolgovechnost' betona* [Durability of concrete]. Kiev, Oranta Publ., 2004, 295 p.
10. Aïtcin P.-C. Developments in the application of high-performance concretes. *Construction and Building Materials*, 1995, vol. 9, no. 1, pp. 13–17.
11. Aïtcin P.-C. High Performance Concrete, *E&FNSpon*, 2004, 198 p.
12. Chang P. K., Peng Y. N., Hwang C. L. A design consideration for durability of high-performance concrete. *Cement & Concrete Composites*, 2001, vol. 23, no. 4–5, pp. 375–380.