

## **ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА**

***Б.Я. Трофимов***

Для удовлетворения требований долговечности железобетонные конструкции должны иметь такие начальные характеристики, которые в течение установленного длительного времени обеспечивали бы требования по безопасности и эксплуатационной пригодности. При этом необходимо учитывать влияние на геометрические характеристики конструкций и механические свойства бетона и арматуры различных расчетных воздействий (длительное воздействие нагрузки, неблагоприятные климатические, технологические, температурные и влажностные воздействия, попеременное замораживание и оттаивание, агрессивные воздействия и др.).

Ключевые слова: пористость, стойкость, качество материалов, плотность бетона.

Одним из основных направлений научно-технической деятельности в области бетона и железобетона на период до 2020 года 3-я Всероссийская конференция по бетону и железобетону (Москва, май 2014 г.) считает:

- разработку, исследование и совершенствование бетона в части повышения строительно-технических свойств, обеспечивающих экологическую безопасность и гарантированные сроки эксплуатации зданий и сооружений не менее 100 лет, в том числе особо плотного, морозостойкого, коррозионностойкого, кислотостойкого, полимерного, фибрового, мелкозернистого и др., а также создание систем диагностики и прогнозных методов определения долговечности бетона применительно к различным условиям эксплуатации.

Долговечность – способность строительного объекта сохранять физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчётного срока службы при надлежащем техническом обслуживании [1].

Наиболее распространёнными причинами повреждения строительных конструкций считаются [2] коррозионные процессы, развивающиеся под влиянием противогололедных препаратов, выбросов предприятий и автотранспорта, содержащих оксиды углерода, азота, серы и др., циклического замораживания, биологической коррозии и пр.

Из факторов, влияющих на долговечность бетона, в первую очередь следует отметить роль используемых материалов. Качество цемента оценивается минералогическим составом – для железобетонных конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе, чаще всего применяются цементы с нормированным минералогическим составом. При этом ограничивается содержание алюминатов и алюмоферритов кальция ( $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), иногда ограничивается содержание основного клинкерного минерала – алита ( $C_3S$ ).

По ГОСТ 10178 [3] для бетона дорожных и аэродромных покрытий, железобетонных напорных и безнапорных труб, железобетонных шпал, мостовых конструкций, стоек опор линий электропередачи, контактной сети железнодорожного транспорта и освещения должен поставляться цемент, изготавливаемый на основе клинкера нормируемого состава с содержанием  $C_3A$  не более 8 % по массе.

По [4, 5] введены ограничения по минералогическому составу клинкера для цемента транспортных сооружений:  $C_3A$  не более 7 % для дорожных покрытий и железобетонных изделий,  $C_3A+C_4AF$  не более 24 % для дорожных покрытий,  $C_3S$  не более 55 % для дорожных покрытий и железобетонных изделий.

Все цементы должны обладать равномерностью изменения объёма – это требование направлено на ограничение содержания в цементе медленно из-за пережога гидратирующихся с увеличением объёма свободных оксидов  $CaO$  и  $MgO$ . В затвердевшем бетоне эта реакция вызывает отслоение лещадок и появление трещин с потерей долговечности.

Нормируется в цементах содержание гипса в пересчёте на  $SO_3$ , при этом его должно быть не менее 1–1,5 % от массы цемента для предотвращения раннего схватывания и быстрой потери удобоукладываемости бетонной смеси, что может привести к недоуплотнению бетонной смеси при формировании железобетонных конструкций. Верхний предел содержания  $SO_3$  не должен превышать 3,5–4 % (иногда допускается до 4,5 %) от массы цемента, так как в противном случае излишки сульфатов в цементе могут вызвать сульфатную коррозию бетона.

Содержание едких щелочей в пересчёте на  $Na_2O$  не желательно (для сульфатостойких цементов их содержание допускается не более 0,6 %), так

как они являются компонентами внутренней коррозии бетона, при наличии в заполнителях реакционно способных форм кремнезёма эта коррозия вызывает разрушение бетона в железобетонных конструкциях.

Во всех цементах содержание иона хлора не должно превышать 0,1 % от массы цемента, это связано с тем, что ион хлора активизирует коррозию стали даже в щелочной среде. Появление на поверхности арматуры ржавчины с увеличением объёма твёрдой фазы вызывает разрушение защитного слоя бетона и является признаком истощения долговечности железобетонных конструкций.

Потери при прокаливании допускаются не более 3–5 % и являются следствием длительного хранения и частичной гидратации цемента, что ведёт к потере его активности. Такой цемент в бетоне железобетонных конструкций будет формировать более пористую, менее стойкую и долговечную структуру из-за меньшего объёма продуктов гидратации.

Ещё один дефект качества цемента получил название «ложное схватывание», проявляется в быстром загустевании бетонной смеси вследствие применения цемента, в котором в процессе помола клинкера с двуводным гипсом последний дегидратировал до полуводного гипса или растворимого ангидрита.

Требования к заполнителям – отсутствие радиоактивных, ядовитых, отравляющих веществ и аллергенов. В процессе эксплуатации из них не должны выделяться токсичные газы, мономеры, растворители и т.п. Содержание вредных примесей в заполнителях для бетона не должно превышать допустимых значений.

По данным [9], допустимое содержание растворимого в щелочах аморфного  $\text{SiO}_2$  до 50 Ммоль/л не гарантирует предотвращение опасности РЦК, так как при значениях меньше 50 Ммоль/л некоторые разновидности аморфного  $\text{SiO}_2$  вызывают растрескивание бетона. Действенным средством предотвращения расширения бетона при РЦК является применение активных минеральных добавок, в частности микрокремнезёма.

Основные вредные примеси, вызывающие коррозию арматуры в бетоне: галоиды (галит, сильвин и др.), включающие водорастворимые хлориды, сера, сульфиды и сульфаты.

Кроме этого, ограничивается содержание в заполнителях пылевидных и глинистых частиц, глины в комках, повышающих водопотребность бетонной смеси, усадку и ползучесть бетона, что отрицательно сказывается на долговечности бетона. Для крупного заполнителя дополнительно регламентируется содержание зёрен пластинчатой и игловатой формы, содержание зёрен слабых пород, морозостойкость, устойчивость против распада. Оптимальная гранулометрия заполнителей способствует снижению расхода цемента в бетоне, что не только повышает экономическую эффективность бетона, но и увеличивает его долговечность.

Крупный заполнитель снижает выносливость бетона при циклических замораживаниях и других воздействиях, которые формируют неоднородные напряжения и деформации под влиянием перепадов температуры и влажности. Поэтому для долговечных бетонов снижают наибольшую крупность заполнителя [7].

По ГОСТ 24211 добавки органических и неорганических веществ применяются в качестве модификаторов свойств бетонных смесей и бетонов, изготовленных на вяжущих на основе портландцементного клинкера. В настоящее время используется большая номенклатура добавок, с позиции повышения долговечности наиболее важны добавки водоредуцирующие, позволяющие получать удобоукладываемые бетонные смеси с пониженным количеством воды затворения. При этом снижается расслаиваемость и повышается сохраняемость смесей, растет однородность, плотность, морозостойкость и коррозионная стойкость, снижаются деформации усадки и ползучести бетона. Имеются также добавки, понижающие проницаемость бетона, повышающие защитные свойства бетона по отношению к арматуре, морозостойкость и коррозионную стойкость.

Химические добавки электролиты как правило представляют собой растворимые в воде соли щелочных металлов, что может стимулировать внутреннюю коррозию бетона в результате реакции щелочей с кремнезёмом (РЦК).

По [8] для повышения коррозионной стойкости бетона применяются добавки, повышающие водонепроницаемость и морозостойкость бетона, усиливающие защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре и повышающие биостойкость бетона.

Активные минеральные добавки связывают гидроксид кальция в гелеобразные низкоосновные гидросиликаты кальция, что благоприятно сказывается на плотности и стойкости бетона к различным видам коррозии. Высокоэффективные минеральные добавки характеризуются аморфным строением и высокой дисперсностью. Последнее вызывает повышение водопотребности бетонных смесей, поэтому для высокофункциональных бетонов применяются комплексные органо-минеральные добавки, состоящие из поликарбоксилатного водоредуцирующего компонента и активной минеральной добавки, например, микрокремнезёма – МК [9]. Соотношение  $\text{CaO/SiO}_2$  в С-S-H уменьшается с увеличением дозировки МК. Благодаря пуццоланизации исчезают крупные кристаллы портландита и пустоты между зёрнами цемента заполняются цементным гелем, что снижает проницаемость цементного камня для жидких и газообразных сред [10].

В настоящее время как пластификаторы получили распространение эфиры поликарбоксилатов, которые прикрепляются к поверхности клинкерного зерна и характеризуются пространственным строением молекул, состоящих из анионной основной цепи и боковых цепей, представленных

как анионными функциональными группами, так и гидрофобными, незаряженными полиэфирами [11]. Такое строение молекул способствует более интенсивной диспергации цементных флокулов за счет стерического эффекта и обеспечивает доступ воды к цементным минералам. Изменяя параметры боковых цепей, можно создавать водоредуцирующие добавки с контролируемой адсорбцией и пластификацией в зависимости от свойств применяемых материалов и требований к бетонной смеси.

По ГОСТ 23732 [12] для приготовления бетонных и растворных смесей, ухода за твердеющим бетоном и промывки заполнителей может применяться вода: питьевая, естественная поверхностная и грунтовая, техническая, морская и засоленная, вода после промывки оборудования для приготовления и транспортирования бетонных и растворных смесей, комбинированная вода. Не допускается для приготовления бетонных и растворных смесей, ухода за бетоном и промывки заполнителей сточная, болотная и торфяная вода.

Сопротивление бетона прониканию агрессивных веществ, зависящее от плотности бетона, имеет особое значение для его долговечности. Возможные пути проникания веществ – капиллярные поры цементного камня, контактная зона цементного камня и заполнителя, открытые капилляры седиментационного происхождения, а также усадочные и температурные микротрещины.

Капиллярные поры (10 нм – 100 мкм) – основной дефект структуры цементного камня, гелевые поры (менее 10 нм) практически непроницаемы для агрессивной среды. Зависимость объема капиллярных и гелевых пор от величины исходного В/Ц приведена в табл.

Таблица

Влияние В/Ц на пористость и усадку цементного камня

В/Ц	Общий объем пор, %		Капиллярные поры, %		Поры геля, %	Усадка, %
	При степени гидратации цемента					
	0,5	0,75	0,5	0,75	0,5	0,5
0,3	34	26	21	8	11	6
0,4	43	36	31	20	10	5
0,6	56	50	48	39	9	5
0,9	66	60	59	51	8	5

С увеличением В/Ц возрастает капиллярная пористость цементного камня и снижается гелевая пористость. Усадка при этом практически неизменна. С увеличением степени гидратации цемента уменьшается капиллярная пористость, особенно с уменьшением В/Ц. Это говорит о том, что с увеличением В/Ц должна увеличиваться продолжительность ухода за бетоном для повышения степени гидратации цемента и снижения капиллярной пористости.

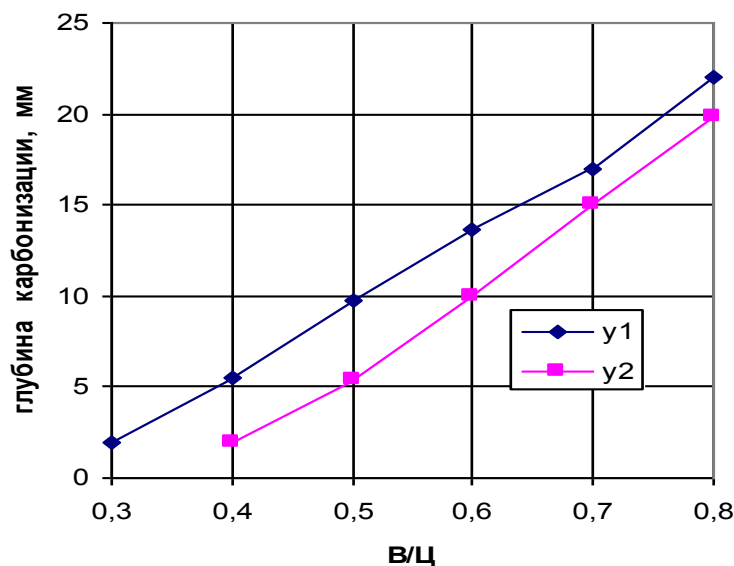
Для водонепроницаемости и долговечности бетона важны минимально возможные значения В/Ц цементного камня и наибольшая степень гидратации цемента. По [13] в условиях воздействия коррозии 1 вида при марке бетона по водонепроницаемости W 2 долговечность его не более 2 лет, W 6 – не более 20 лет (в таких условиях может работать бетон челябинского метрополитена), и только W 10–12 обеспечивает долговечность его не менее 100 лет.

Только прочность при сжатии не является показателем долговечности бетона, так как бетон более высокого класса может быть получен при более высоком В/Ц.

Газопроницаемость как функция В/Ц является важным критерием защищённости арматуры от коррозии. Меньшая газопроницаемость означает более высокое сопротивление прониканию хлоридов,  $\text{CO}_2$ , обуславливающего карбонизацию, и кислорода, вызывающего коррозию стали.

Краткосрочный уход за бетоном с ростом В/Ц сильно увеличивает газопроницаемость. При тщательном и длительном последующем уходе при В/Ц до 0,7 возможно уменьшение газопроницаемости бетона. В/Ц 0,7 и более не обеспечивает снижение газопроницаемости, поэтому на практике такой бетон не обеспечивает долговечность железобетонных конструкций и не должен применяться.

Глубина карбонизации линейно зависит от В/Ц (рис.). Вместе с увеличением В/Ц растёт капиллярная пористость, т.е. доля наиболее крупных пор в бетоне, которые образуются потому, что в бетонную смесь вводят больше воды, чем требуется для реакции с цементом. С увеличением пористости возрастает коэффициент диффузии газов.



Влияние В/Ц на глубину карбонизации бетона  
на шлакопортландцементе (y1) и портландцементе (y2).

Возраст бетона 8 лет, температура 20 °С, относительная влажность воздуха 65 %

Удлинение ухода за бетоном исключает его раннее высушивание, существенно повышает степень гидратации цемента в поверхностных слоях бетона. Это снижает проницаемость бетона для газов, поэтому увеличение длительности ухода уменьшает глубину карбонизации.

При В/Ц до 0,55 коррозию стали можно значительно уменьшить за счёт роста толщины защитного слоя бетона, но уже при В/Ц 0,6 даже толстого защитного слоя (до 50 мм) оказывается недостаточно для защиты от коррозии.

При температуре до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  вода замерзает с увеличением объёма в капиллярных порах, бетон без капиллярных пор или с небольшим их объёмом устойчив к циклическому замораживанию. Это касается бетона с В/Ц не более 0,4 при высокой степени гидратации цемента. Так как даже затвердевший бетон вследствие незакончившейся гидратации обладает капиллярными порами, считается целесообразным и при небольшом В/Ц дополнительно защитить бетон с помощью воздухововлечения созданием воздушных пор размером не более 300 мкм.

Таким образом, В/Ц влияет на все параметры, характеризующие долговечность бетона. При эксплуатации железобетонных конструкций в определённых средах ограничивается максимальное значение величины В/Ц тем больше, чем больше индекс интенсивности воздействия среды на бетон. Кроме этого, повышается расход цемента и увеличивается класс бетона по прочности при сжатии – эти требования направлены на повышение плотности бетона и повышают долговечность при благоприятных условиях твердения бетона.

Снижение В/Ц предполагает сближение частиц цемента в бетоне, поэтому продукты гидратации, растущие на клинкерных зернах, быстрее начинают контактировать между собой, что способствует ускорению набора прочности. Перекрытие гидратными соединениями узких перешейков чёточных капилляров цементного камня способствует повышению плотности и водонепроницаемости, что благоприятно сказывается на долговечности бетона и железобетонных конструкций.

### **Выводы**

1. Долговечность бетона – важнейший показатель функционального свойства железобетонных конструкций, зависит как от качественных характеристик бетона, так и от условий эксплуатации.

2. Материалы для долговечного бетона не должны содержать вредных и загрязняющих примесей выше допустимых пределов. Правильный выбор матричного материала, а также технологии железобетонных конструкций в ряде случаев обеспечивает надёжную экономичную первичную защиту. Для повышения долговечности бетона чаще всего рекомендуется комплексная добавка, включающая водоредуцирующий компонент и эффективную пуццолану.

3. Основной дефект структуры бетона – капиллярные поры цементного камня, а также открытые капилляры и трещины усадочного, температурного и седиментационного происхождения.

4. При благоприятных условиях проницаемость бетона снижается с уменьшением В/Ц и увеличением продолжительности ухода. Поэтому в большинстве нормативных документов В/Ц считается одним из основных факторов долговечности бетона. Перекрытие гидратными соединениями цементного камня узких перешейков четочных капилляров способствует повышению плотности и непроницаемости бетона. С уменьшением В/Ц бетон, твердеющий в благоприятных условиях, быстрее снижает открытую пористость и повышает долговечность железобетонных конструкций.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения».
2. Степанова, В.Ф. Проблемы долговечности бетонных и железобетонных конструкций в современном строительстве / В.Ф. Степанова // Долговечность и защита конструкций от коррозии. Материалы межд. конференции. – М., 1999. – С. 32–37.
3. ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия».
4. ГОСТ Р 55224-2012 «Цементы для транспортного строительства. Технические условия».
5. ГОСТ 22266-2013 «Цементы сульфатостойкие. Технические условия».
6. Трофимов, Б.Я. Регулирование морозостойкости бетона на шлакопортландцементе / Б.Я. Трофимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – № 14 (86). – Вып. 4. – С. 18–20.
7. Баженов, Ю.М. Бетоны повышенной долговечности / Ю.М. Баженов // Долговечность и защита конструкций от коррозии. Материалы межд. конференции. – М., 1999. – С. 43–48.
8. СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии». – М., 2012.
9. Тейлор, Х. Химия цемента / Х.Тейлор; пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
10. Giergiczny, Z. European experience of successful Portland cement with slag additive usage in construction / Z.Giergiczny // ALITinform, international analytical review CEMENT. CONCRETE. DRY MIXTURES. – 2013. – № 4–5. – Pp. 36–41.
11. Модификаторы цементных бетонов. (Технические характеристики и механизм действия) / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий и др. – Челябинск: ООО «Искра-Профи», 2012. – 202 с.
12. ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».
13. Несветаев, Г.В. Бетоны: учебное пособие/ Г.В. Несветаев. – Ростов н/Д.: Феникс, 2013. – 381 с.

[К содержанию](#)