

Сергей Николаевич КОВШАР,
инженер НИИЛ бетона
и строительных материалов
Белорусского национального
технического университета

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

CHANGE IN STRUCTURAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE CEMENT STONE UNDER CYCLIC ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Показано влияние циклического замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания на изменение степени гидратации, показателя среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие цементного камня. Подтверждено предположение об изменении структурно-механических характеристик цементного камня как результата взаимодействия конструктивных и деструктивных процессов.

Cyclic freezing and thawing, saturation and drying affecting the changes in the degree of hydration, an indicator of the average capillary pores size and compressive strength of the cement stone have been described in this article. The assumption of change in structural-mechanical characteristics of the cement stone as a result of interaction of constructive and destructive processes has been confirmed.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования в области разработки методов оценки и прогнозирования долговечности бетона подтверждают факт присутствия не только разрушительных, но и созидательных процессов [1–5]. Основываясь на воззрениях Н. А. Мощанского [5], можно констатировать, что долговечность строительных материалов и, в частности бетона и железобетона, определяется количественным соотношением двух процессов — созидательного (конструктивного) и разрушительного (деструктивного), графическая интерпретация чего представлена на рис. 1.

Результирующий процесс зависит от множества влияющих факторов и его результатом зачастую является появление экстремума изменения какого-либо параметра, характеризующего долговечность материала (чаще всего прочности на сжатие). Это особенно ярко проявляется при испытаниях бетона на стойкость к III виду коррозии (по классификации В. М. Москвина), а также на морозостойкость.

Применительно к оценке долговечности бетона к воздействию циклического изменения температур и влажности можно рассмотреть представленную на рис. 1 модель как зависимость кинетики изменения структурно-механических характеристик цементного камня, например, от числа циклов замораживания-оттаивания (рис. 2). Такой подход интересен тем, что появляется возможность разработки системы прогнозирования морозостойкости (коррозионной стойкости) бетона. По мнению автора, если отдельно математически описать кинетику конструктивного и деструктивного процессов, то можно получить и модель результирующего процесса.

Рассмотрим проявления конструктивного и деструктивного процессов на примере изменения структурно-механических характеристик цементного камня.



Рис. 1. Изменение характеристик материала в процессе эксплуатации



Рис. 2. Зависимость структурных и физико-механических характеристик цементного камня от количества циклов замораживания и оттаивания n

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служил цементный камень, который получали из цементного теста с водоцементными отношениями 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 и 0,40. Для проведения исследований использовали образцы цементного камня пяти серий размерами 20x20x20 мм. В каждой серии было принято по 33 образца из условия получения не менее 10 экспериментальных точек при их замораживании и оттаивании, включая контрольные образцы. В каждой намеченной экспериментальной точке количество образцов, которые подвергали исследованию, составляло не менее трех. Промежутки времени для отбора образцов, выраженные в циклах замораживания и оттаивания (насыщения и высушивания), принимали на основании предварительного прогноза максимальной морозостойкости (коррозионной стойкости).

Цементное тесто в формах, в зависимости от пластичности, уплотняли на лабораторной виброплощадке и/или на встряхивающем столике. В качестве вяжущего использовали портландцемент ПЦ-500-Д0 ОАО "Красносельскстройматериалы" со следующими характеристиками: активность 52,3 МПа; нормальная густота 28,5 %; плотность 3180 кг/м³; удельная поверхность (по ПСХ-2) 318 м²; содержание C₃S, C₂S, C₃A и C₄AF — 56,2 %, 20,5 %, 3,8 % и 17,5 % соответственно.

Образцы твердели 28 суток в нормально-влажностных условиях, после чего подвергались циклическим испытаниям.

Степень гидратации α , %, определяли по соотношению количества химически связанной воды W_c на данном этапе испытаний цементного камня к количеству воды, которое связывается при полной гидратации вяжущего W_n [6]:

$$\alpha = \frac{W_c}{W_n} \cdot 100. \quad (1)$$

Количество воды W_n , которое связывается при полной гидратации вяжущего, на основании [7, 8] принято равным 23 % от массы вяжущего.

В качестве характеристики поровой структуры цементного камня использовали показатель среднего размера капиллярных пор. Поскольку в использованной методике [9] базовыми являются образцы размерами 70x70x70 мм, предварительно был определен переходный коэффициент к образцам размерами 20x20x20 мм. За критерий, по которому оценивается изменение механических характеристик цементного камня при циклических воздействиях, была принята прочность образцов на сжатие. Этот показатель является универсальным критерием, способным косвенно отражать процессы, происходящие в структуре материала при циклических воздействиях, а также — основной характеристикой материала, по изменению которой судят о его морозостойкости и коррозионной стойкости. Прочность цементного камня определяли по методике 10. При расчете значения прочности на сжатие масштабный коэффициент не учитывали, поскольку сравнивали результаты испытаний образцов одного размера.

Для проведения исследований использовали циклические внешние воздействия на цементный камень: стандартный режим замораживания и оттаивания [11], режим насыщения и высушивания образцов [12]. При-

нятые режимы уточняли исходя из размеров опытных образцов.

Кинетику изменения характеристик исследуемого материала, оцениваемых по степени гидратации цемента α , среднему размеру капиллярных пор λ и прочности на сжатие цементного камня f , устанавливали по показателям:

$$\begin{aligned} k_\alpha &= \frac{\alpha_n}{\alpha_0}, \\ k_\lambda &= \frac{\lambda_n}{\lambda_0}, \\ k_f &= \frac{f_n}{f_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где α_n , λ_n , f_n — текущее значение степени гидратации цемента, среднего размера капиллярных пор, прочности на сжатие цементного камня к n -му циклу испытаний соответственно; α_0 , λ_0 , f_0 — начальное значение степени гидратации цемента, среднего размера капиллярных пор, прочности на сжатие цементного камня соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характер изменения показателя степени гидратации цемента k_α (рис. 3) при циклическом замораживании и оттаивании происходит по определенному закону, а именно: с увеличением количества циклов n степень гидратации цемента повышается, достигая максимального значения. Количественное значение предельного уровня k_α определяется начальным значением водоцементного отношения цементного теста В/Ц и степени гидратации цемента α_0 . С повышением водоцементного отношения максимальное значение предельного уровня k_α снижается. При прочих равных условиях максимальными значениями k_α характеризуются образцы с В/Ц = 0,2, а минимальными — с В/Ц = 0,4. Характер влияния начальной степени гидратации α_0 на значение k_α аналогичен влиянию водоцементного отношения, т. е. с увеличением α_0 значение k_α снижается (при прочих равных условиях).

Изменение показателя среднего размера капиллярных пор k_λ (см. рис. 3) при циклическом замораживании и оттаивании подтверждают ранее полученные

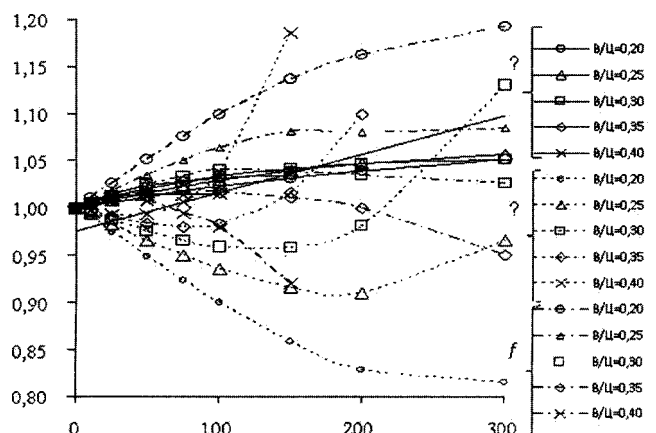


Рис. 3. Характер изменения показателей степени гидратации k_α , среднего размера капиллярных пор k_λ и прочности на сжатие цементного камня k_f при замораживании и оттаивании

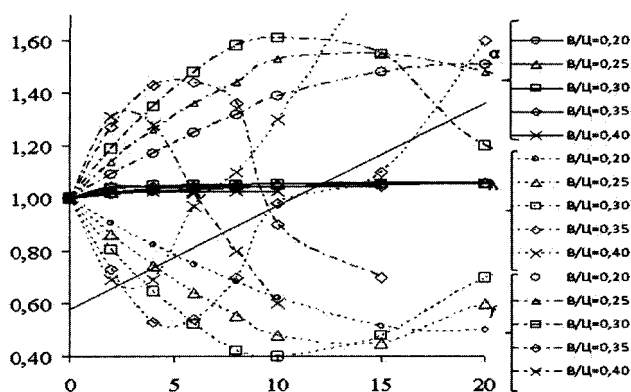


Рис. 4. Характер изменения показателей степени гидратации k_α , среднего размера капиллярных пор k_λ и прочности на сжатие цементного камня k_f при насыщении и высушивании

результаты по изменению степени гидратации цемента. Характер кривых свидетельствует о протекании как конструктивного, так и деструктивного процессов при циклическом замораживании и оттаивании. Начиная с первых циклов, за счет продолжающейся гидратации вяжущего происходит изменение структуры — значение показателя k_λ снижается, достигая минимума. Минимальное значение k_λ зависит от значения предельного уровня показателя степени гидратации цемента k_α — чем оно выше, тем ниже при прочих равных условиях значение k_λ . Характер изменения k_λ определяется теми же факторами, что и изменение k_α при циклическом замораживании и оттаивании. Минимальными значениями k_λ характеризуются образцы с $В/Ц = 0,2$, а максимальными — с $В/Ц = 0,4$. При снижении начальной степени гидратации цемента α_0 значение k_λ уменьшается. Дальнейшее циклическое замораживание и оттаивание приводит к деструкции материала, о чем свидетельствует характер кривых (значение показателя k_λ увеличивается, стремясь к максимуму).

Характер изменения показателя прочности на сжатие образцов цементного камня k_f (см. рис. 3) при циклическом замораживании и оттаивании согласуется с данными по изменению показателей степени гидратации цемента k_α и среднего размера открытых капиллярных пор k_λ . При снижении значений k_λ показатель прочности на сжатие образцов k_f закономерно увеличивается. Тенденции изменения прочности на сжатие определяются характером изменения показателей степени гидратации цемента k_α и среднего размера капиллярных пор k_λ . Увеличение прочности цементного камня происходит параллельно с ростом показателя степени гидратации цемента k_α и снижением показателя k_λ .

Количество циклов, когда достигается максимальное значение k_f , совпадает с числом циклов, необходимых для достижения предельного уровня показателя степени гидратации k_α и минимального значения k_λ . Характер изменения прочности на сжатие цементного камня при циклическом замораживании и оттаивании зависит от начального водоцементного отношения и начальной степени гидратации цемента α_0 . С повышением водоцементного отношения количество циклов, когда наблюдается рост прочности цементного камня, снижается. Максимальными значениями k_f характеризуются образцы с $В/Ц = 0,2$. Скорость разру-

шения образцов и величина значений k_f к определенному циклу замораживания и оттаивания зависят от скорости изменения значений k_λ . Чем интенсивнее происходит нарушение структуры материала ($k_\lambda \rightarrow \max$), тем быстрее снижается показатель прочности на сжатие k_f при циклическом замораживании и оттаивании.

Изменение показателя степени гидратации цемента k_α при циклическом насыщении и высушивании (рис. 4) как и при замораживании и оттаивании, происходит по определенному закону, а именно: с увеличением количества циклов n показатель степени гидратации цемента k_α повышается, стремясь к максимальному значению.

Количественное значение предельного уровня k_α по аналогии с замораживанием и оттаиванием зависит от начального значения водоцементного отношения $В/Ц$ и степени гидратации цемента α_0 . Максимальное значение k_α для образцов при циклическом насыщении и высушивании значительно ниже значений, полученных при замораживании и оттаивании. В работах [13, 14] это связывают с влиянием отложения и кристаллизации солей в поровой структуре на кинетику протекания процессов гидратации.

Сравнение характера изменения показателя k_λ при насыщении и высушивании образцов с характером изменения этого же показателя при замораживании и оттаивании выявило существенные отличия. При циклическом насыщении и высушивании показатель k_λ с первых циклов начинает интенсивно снижаться, причем скорость этого процесса зависит от водоцементного отношения. С повышением $В/Ц$ значение k_λ снижается более интенсивно. Это подтверждает, что в структуре цементного камня происходит накопление и кристаллизация солей [14]. Интенсивность этого процесса определяется прежде всего величиной открытой капиллярной пористости λ [13, 14]. Характер изменения значений k_λ позволяет судить не столько о влиянии конструктивных процессов, сколько о влиянии механизма соленакопления на структуру цементного камня. Однако все же существует связь между изменением значений показателей k_α и k_λ . Снижение значений k_λ наблюдается приблизительно до момента, когда величина k_α достигает максимального значения. Характер изменения k_λ также зависит от начального значения степени гидратации цемента α_0 . Скорость изменения показателя k_λ при циклическом насыщении и высушивании косвенно определяется скоростью изменения показателя k_α , однако больше зависит от объема и размера капиллярных пор.

Сравнение характера изменения показателя прочности на сжатие k_f при насыщении и высушивании со значениями этого же показателя при замораживании и оттаивании выявило, что насыщение и высушивание приводят к более интенсивному росту прочности на сжатие. Высокая скорость изменения прочности ведет к повышению максимальных значений k_f . Рост прочности цементного камня происходит практически до момента достижения предельного уровня показателя степени гидратации цемента k_α . В отличие от циклического замораживания и оттаивания при насыщении и высушивании образцов значение прироста прочности увеличивается с повышением водоцементного отношения с 0,2 до 0,3 при одновременном снижении количества положительных влияющих циклов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 При циклическом замораживании и оттаивании либо насыщении и высушивании параллельно протекают два процесса — конструктивный и деструктивный. Оба процесса оказывают влияние на характер изменения структурно-механических характеристик цементного камня.

2 Выявленные закономерности кинетики протекания конструктивного и деструктивного процессов и влияние их на структурно-механические характеристики цементного камня позволят разработать систему прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости, базирующуюся на модели результирующего процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блещик, Н. П. Структура, температурные деформации и методика ускоренного определения морозостойкости бетона / Н. П. Блещик, О. В. Лазаренко // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. тр.; под ред. Д. Н. Лазовского. — Минск: Технопринт, 2001. — С. 30–35.
2. Блещик, Н. П. Предпосылки к ускоренному определению морозостойкости бетона структурно-механическим методом / Н. П. Блещик, О. В. Лазаренко // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений; материалы II межвуз. науч.-технич. конф., Брест, 21–22 апр. 1998 г.; под ред. Н. П. Блещика [и др.] / Брестский политехнический институт. — Брест, 1998. — С. 30–36.
3. Добролюбов, Г. В. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г. В. Добролюбов, В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг; под общ. ред. Г. В. Добролюбова. — М.: Стройиздат, 1983. — 212 с.
4. Коломиец, В. И. К механизму морозного разрушения бетона / В. И. Коломиец // Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы Междунар. конф., Москва, 25–27 мая 1999 г. / НИИЖБ; редкол. А. И. Звездов [и др.]. — М., 1999. — С. 157–166.
5. Мощанский, Н. А. Плотность и стойкость бетонов / Н. А. Мощанский. — М.: Госстройиздат, 1951. — 175 с.
6. Методы исследования цементного камня и бетона. Под ред. З. М. Ларионовой. — М.: Издательство литературы по строительству, 1970.
7. Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня / Т. Пауэрс // В кн. "Четвертый Международный конгресс по химии цемента". — М.: Стройиздат, 1964. — С. 402–438.
8. Пауэрс, Т. К. Физическая структура портландцементного теста / Т. К. Пауэрс // В кн. "Химия цемента"; под ред. Х. Ф. У. Тейлора. — М.: Стройиздат, 1969.
9. Бетоны. Методы определения показателей пористости: ГОСТ 12730.4-78.
10. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90.
11. Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости: ГОСТ 10060.1-95.
12. Исследование долговечности железобетонных конструкций и разработка технологических приемов ее повышения на предприятиях минеральных удобрений: отчет о НИР (промежут.) / Лаборатория антикоррозионной защиты БПИ; рук. темы А. А. Барташевич. — Минск, 1972. — 161 с. — № ГР 75058286.
13. Станишевская, И. В. Механизм разрушения и способы повышения коррозионной стойкости бетона при диффузии и кристаллизации растворов солей сильвинита: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И. В. Станишевская; Белорус. политех. институт. — Минск, 1969. — 28 с.
14. Ахвердов, И. Н. Технология железобетонных конструкций специального назначения / И. Н. Ахвердов. — Минск: Наука и техника, 1993. — 240 с.

Статья поступила в редакцию 05.11.2009.