

УДК 691.32 : 620.193/.199

А. С. ЧУГУНОВА, магистр технических наук, А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КАРБОНИЗАЦИИ ПО СЕЧЕНИЮ БЕТОНА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ

Приведены результаты исследования карбонизации бетона (карбонатной составляющей и степени карбонизации) по сечению бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$. Показано, что в условиях воздействия морозной деструкции степень карбонизации бетона в поверхностных слоях значительно повышается (с уменьшением по сечению бетона). Так, после 150 циклов замораживания-оттаивания образцов бетона, степень карбонизации на поверхности бетона (по сравнению с контрольными образцами, хранившимися такое же время в лабораторных условиях) достигает критических значений, свидетельствуя о его полной деградации.

Введение. Основным фактором, оценивающим структурные изменения бетона под воздействием агрессивности эксплуатационной среды и определяющим техническое состояние железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в условиях открытой атмосферы, является карбонизация бетона. Она нейтрализует бетон и способствует возникновению и развитию в нем коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности [1–3]. Развиваясь во времени, деграционные процессы в бетоне и арматуре приводят к потере ЖБЭ и ЖБК несущей способности и возникновению аварийной ситуации. Таким образом, от развития процессов карбонизации в бетоне, напрямую зависит изменение технического состояния и, как следствие – долговечность ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в открытой атмосфере.

В условиях открытой атмосферы значительное влияние на долговечность ЖБЭ и ЖБК оказывают повреждения бетона вследствие размораживания. Процессы, проходящие при замораживании бетона на воздухе и оттаивании в воде, систематизированы в зависимости от наиболее распространенных условий замораживания, определяющих механизм разрушающего процесса [4]. При этом выделяются четыре основных вида процессов: быстрое замораживание и оттаивание на воздухе с разрушением бетона вследствие различий в коэффициентах температурного расширения; медленное одностороннее замораживание бетона ограждающей конструкции (при положительной температуре внутреннего помещения) с постепенным продвижением фронта вглубь бетона; быстрое всестороннее замораживание бетона тонкостенных конструкций с образованием льда в поверхностных слоях, что приводит к «закупорке» воды внутри конструкции и при достаточно высокой степени водонасыщения – к разрушению бетона; одностороннее замораживание пористого материала, в котором возможна миграция воды в парообразном состоянии к холодной поверхности и образование линз льда – аналогично процессу пучения грунта.

Механизм воздействия мороза на бетон и морозостойкость бетона изучался различными авторами. Существует множество теорий о механизме воздействия мороза и разрушения, вследствие этого бетона. Однако они носят противоречивый характер [1]. Обобщая разнообразные гипотезы, авторы [5] констатируют, что механизм нарушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, чрезвычайно сложен. Он

представляет собой сочетание ряда деструктивных факторов, включая: давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамику ее перемещения под влиянием градиента тепла и влагосодержания; гидростатическое давление заземленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня; усталостные дефекты структуры от многократно повторяющихся знакопеременных деформаций; понижение со временем концентрации растворенных в «поровой» жидкости продуктов гидролиза цемента, как за счет образования нерастворимых гидрокристаллов, так и из-за «подсоса» жидкости развивающимися дефектами структуры в период оттаивания образцов и др.

Понятно, что, разрушая поверхностный слой бетона защитного слоя, размораживание ускоряет воздействие агрессивной среды на глубинные слои бетона. Однако влияние морозной деструкции на ускорение карбонизации бетона оценивают преимущественно только вероятно [6, 7].

Результаты экспериментов и их обсуждение. Для количественной оценки влияния морозной деструкции на карбонизацию бетона исследовали распределение по сечению бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ образцов, находившихся в различных атмосферных условиях, карбонатной составляющей (показателя КС), поскольку именно он характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона и его влияние на изменение показателя pH, являющегося основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты под воздействием внешней среды, и служащего универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре.

Были заформованы по 6 образцов (две серии: № 1 и 2 – по три образца) бетона (кубики сеч. $100 \times 100 \times 100$ мм) класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$. Для подбора состава бетона использовался многофакторный метод проф. В. В. Бабицкого. Состав бетона приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ серий № 1 и 2

В/Ц	Осадка конуса, см	Состав смеси, кг/м ³			
		Ц	П	Щ	В
0,866	2	237	832	1072	205

Заформованные образцы набирали прочность в камере нормального твердения 28 суток.

Отбор проб и определение карбонатной составляющей по сечению образцов выполняли по [3], в соответствии с разработанным экспресс-анализом определения показателя КС. Сверление осуществляли с двух противоположных граней каждого кубика. Для каждой грани получили кривые l -КС. На рисунке 1 представлена усредненная кривая l -КС₂₈ для образцов серий 1 и 2 (сразу после изготовления).

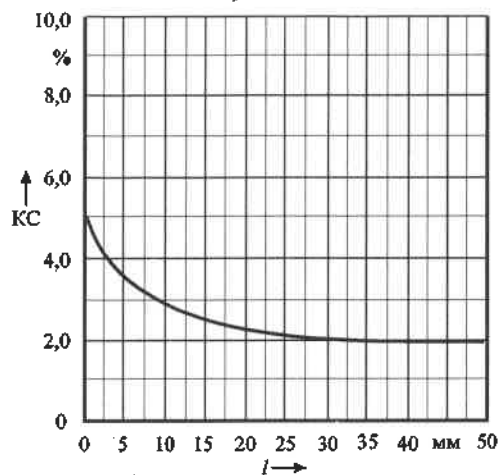


Рисунок 1 – Усредненная экспериментальная зависимость l -КС₂₈ для серий образцов № 1 и 2

Поскольку абсолютные значения карбонизации бетона зависят от количества использованного цемента, а определенный класс бетона по прочности на сжатие можно получить различными составами (причем их значительным количеством), для объективной оценки карбонизации (не зависящей от количества использованного цемента), ее определяли по показателю степени карбонизации (показателю СК, оценивающему процент гидроксида кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона). Показатель СК рассчитывается из пропорции

$$\begin{aligned} \% \text{КС}_{\max} &= 100 \% \text{СК}_i; \\ \% \text{КС}_i &= X \% \text{СК}_i; \\ X \% \text{СК}_i &= \frac{\% \text{КС}_i \cdot 100}{\% \text{КС}_{\max}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где СК_i и КС_i – соответственно, значения степени карбонизации и карбонатной составляющей, %, в рассматриваемом сечении бетона.

Предлагаемый показатель не имеет никакого отношения к общепринятому понятию степени карбонизации, в соответствии с которым степень карбонизации бетона определяется количеством поглощенного бетоном CO_2 воздуха.

На рисунке 2 приведена расчетная кривая l -СК₂₈ для образцов серий 1 и 2.

Для оценки влияния морозной деструкции на карбонизацию образцы бетона разделили на две группы по три штуки. После чего образцы группы 1 подвергли процессу попеременного замораживания в водонасыщенном состоянии, при температуре -18°C , и оттаивания в воде, при температуре $+18^\circ\text{C}$. Время оттаивания в ванне с водой составило не менее 2,5 часов, замораживания в водонасыщенном состоянии – не менее этого же времени.

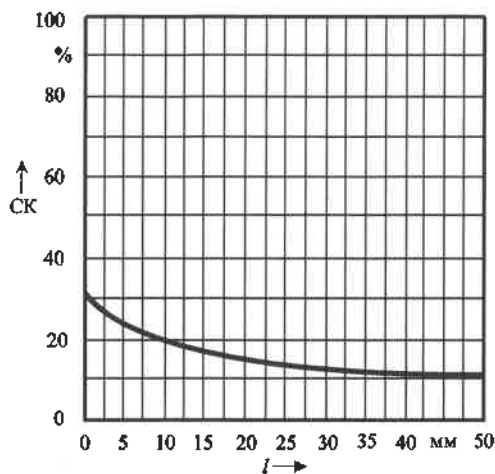


Рисунок 2 – Усредненная экспериментальная зависимость l -СК₂₈ для серий образцов № 1 и 2

Было проведено 150 циклов замораживания-оттаивания. В этот же период образцы серии 2 хранились в условиях лаборатории ($t = 18 \pm 2^\circ\text{C}$; $W = 45 \dots 55\%$). Срок хранения составил, аналогично сроку испытания образцов серии 1, 360 суток.

По окончании эксперимента в образцах серий 1 и 2 были отобраны пробы цементно-песчаной фракции по сечению кубиков (с двух противоположных граней) и определены показатели КС и СК. Усредненные кривые l -КС для образцов серий 1 и 2 представлены на рисунке 3, расчетные l -СК – на рисунке 4.

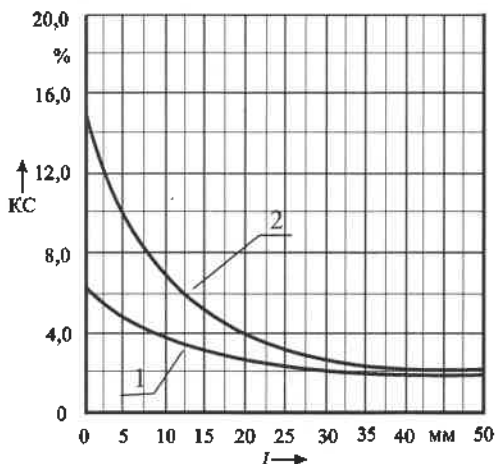


Рисунок 3 – Усредненная экспериментальная зависимость l -КС для серий образцов № 1 и 2:
1 – l -КС₃₆₀ – для образцов серии 1;
2 – l -КС₁₅₀ – для образцов серии 2

На основании выполненных исследований карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие и расчетов в [3] предложена усредненная регрессионная зависимость изменения показателя СК во времени по сечению бетона класса по прочности на сжатие $\text{C}^{12}/_{15}$ для условий эксплуатации открытой атмосферы области повышенной карбонизации

$$\text{СК}(l,t) = \frac{2,39 + (0,500 + 0,962\sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{t+100}{3,05}\right)^{0,85}\right)}}{19,5\alpha}, \quad (2)$$

где t – срок эксплуатации ЖБЭ (годы); l – сечение бетона, мм; α – степень гидратации цемента.

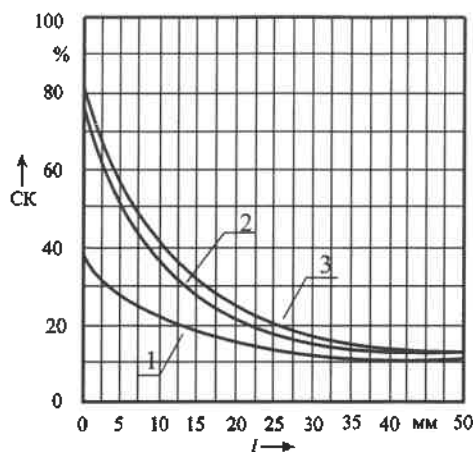


Рисунок 4 – Усредненная экспериментальная зависимость l -СК для серий образцов № 1 и 2:
 1 – I -СК₃₆₀ – для образцов серии 1;
 2 – I -СК₁₅₀ – для образцов серии 2;
 3 – I -СК_{4,5} – для прогнозного значения 4,5 года

Степень гидратации цемента, определяли по методике проф. Бабицкого В. В.

Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток твердения, %,

$$\alpha_{28}^{20} = 60X - \sqrt[3]{(1,65X)^2 e^{1,65X}}, \quad (3)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста. Для исследуемого бетона принимали $X_{cp} = 1,25$.

Увеличение степени гидратации цемента с течением времени

$$\alpha = \alpha_{28}^{20} [1 + 0,21lg \tau (X - 0,63)(\varphi - 0,6)], \quad (4)$$

где τ – время твердения цементного камня (бетона), мес.; φ – относительная влажность воздуха среды, доли единицы. Для области ускоренной карбонизации эксплуатационной среды открытой атмосферы принимали $\varphi = 0,85$.

Полученные зависимости показывают, что за 150 циклов морозная деструкция значительно увеличивает показатель степени карбонизации в поверхностных слоях и в поверхностном слое показатель СК после циклов замораживания-оттаивания в процентном отношении выше на 85 % (с уменьшением по сечению бетона) по сравнению с бетоном образцов, хранившихся в лабораторных условиях.

С учетом того, что в соответствии с [8] для Гомельской области среднее число перепадов температуры через 0 °С составляет 68, можно принять среднее число циклов замораживания-оттаивания – 34. Таким образом, 150 циклов испытания бетона можно приравнять к четырем с половиной годам эксплуатации бетона в условиях открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации.

Для бетона возраста 4,5 года, эксплуатирующегося в условиях открытой атмосферы, зависимость l -СК_{4,5} полу-

чен по выражению (2), в графическом виде представлена на рисунке 4 (кривая 3). Из графической зависимости видно, что кривые 2 и 3 достаточно хорошо коррелируют между собой. Это указывает достаточно хорошую точность прогнозирования карбонизации для бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$.

Полученные зависимости позволяют оценить состояние бетона по предложенным в [3] критериям оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона. Так, после 150 циклов замораживания-оттаивания в поверхностном слое бетона СК = 78 %, что соответствует V степени карбонизации бетона (полной деградации бетона). При хранении образцов в лабораторных условиях тот же период времени, в поверхностном слое бетона СК = 38 %, что соответствует III степени карбонизации бетона (деградации бетона средней степени интенсивности).

Проведенные исследования показывают, что морозная деструкция оказывает значительное влияние на скорость карбонизации бетона, изменение его защитных свойств по отношению к стальной арматуре и, как следствие, долговечность железобетонных элементов и конструкций.

Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 2 Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
- 3 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
- 4 Textbook on behavior, design and performance, Structural Concrete, December 2009. – Bulletin 53. – 2nd ed. – Fid. 3. – 2010. – Vol. 3. – 381 p.
- 5 Батыновский, Э. И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э. И. Батыновский, А. И. Бондарович // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. трудов. – Минск : Стринко, 2007. – Ч. 2. – С. 72–90.
- 6 Бородай, Д. И. Прогноз долговечности типовых железобетонных пролетных строений автодорожных мостов / Д. И. Бородай // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2011. – Вып. 87. – С. 169–176.
- 7 Васильев, А. А. К вопросу оценки влияния морозной деструкции на карбонизацию бетона / А. А. Васильев, А. А. Такунов, А. С. Чугунова // «European Scientific Conference» : сб. статей XV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение. – 2019. – С. 59–62.
- 8 СНБ 2.04.02–2000. Строительная климатология. – Введ. 2001-07-01. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2001. – 37 с.

Получено 25.09.2020

A. S. Chugunova, A. A. Vasilyev. Study of carbonization variation in concrete cross section taking into account frost degradation effects.

The results of the study of concrete carbonation (carbonate component and carbonization degree) on the cross section of concrete of compression strength class $C^{12}/_{15}$ are provided. It has been shown that under conditions of frost destruction, the degree of concrete carbonation in surface layers increases significantly (with a decrease in the concrete cross-section). So, after 150 cycles of freezing-thawing of concrete samples, the degree of carbonation on the surface of concrete (compared to control samples stored the same time in laboratory conditions) reaches critical values, indicating its complete degradation.