

зовать для изготовления шпатлевочных смесей, штукатурных растворов, монтажного клея для гипсовых изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фосфогипс и его использование / В. В. Иваницкий, П. В. Класен, А. А. Новиков [и др.] – М.: Химия, 1990 – 224 с.
2. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности: учебно-справочное пособие / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 368 с.
3. Воробьев, Х. С. Гипсовые вяжущие и изделия / Х. С. Воробьев. – (Зарубежный опыт). – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.

УДК 691.328.32

УСАДКА ПРИ ВЫСЫХАНИИ, АУТОГЕННАЯ И КАРБОНИЗАЦИОННАЯ УСАДКА ЛЕГКОГО БЕТОНА: ОБЗОР

РЖЕВУЦКАЯ В. А., МОСКАЛЬКОВА Ю. Г.

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Введение. Различают усадку при высыхании, аутогенную и карбонизационную усадку.

Возникновение сил капиллярного сжатия приводит к уменьшению объема бетона, т. е. наблюдается усадка, обусловленная высыханием. Этот вид усадки составляет около 70 % полной усадки. Деформации усадки при высыхании могут оказать влияние на долговечность конструкции. Величина деформаций влажностной усадки определяется параметрами поровой структуры цементного камня [1].

При отсутствии дополнительного внешнего увлажнения проявляется очевидное уменьшение объема (т. н. «самовысыхание» бетона), которое называется аутогенным изменением объема или аутогенной усадкой [2]. При водоцементном отношении В/Ц < 0,42 величина аутогенной усадки незначительна по сравнению с полной усадкой (составляет до 10 % от полной усадки) и, как правило, не

учитывается. Однако при уменьшении В/Ц величина аутогенной усадки возрастает. Для высокопрочных бетонов при В/Ц = 0,30 величина деформаций аутогенной усадки сравнима с усадочными деформациями при высыхании [3], причем значительный рост деформаций аутогенной усадки наблюдается в первые 24 ч.

Карбонизационная усадка составляет до 20 % от полной усадки, и она необратима по своей природе. Она вызывается химической реакцией, протекающей между гидроксидом кальция CaOH_2 и диоксидом углерода CO_2 , т. е. степень карбонизации зависит от влажности бетона и окружающей среды, а также от размеров поперечного сечения конструкции.

Усадка при высыхании. Основные факторы, влияющие на усадку, обусловленную испарением влаги: класс бетона, тип цемента, форма образца, условия внешней среды, осадка конуса, содержание воздуха в образце [4, 5]. Усадка при высыхании также зависит от степени гидратации цемента и от типа и содержания заполнителей, поскольку сдерживающее действие частиц заполнителя существенно влияет на интенсивность движения влаги в микроструктурах цементной пасты [4, 6, 7]. Если влажность среды, в которой находится бетонный образец, ниже содержания влаги в бетоне, то это приводит к испарению структурно связанной воды и воды из капилляров и мелких пор. В свою очередь, потеря воды из мелких пор и капилляров находится в непосредственной зависимости от размеров образца [8].

В работе [9] указано, что для керамзитобетона основным фактором усадки, обусловленной испарением влаги, является водопоглощение керамзита, модуль упругости и снижение внутренней относительной влажности бетона. В результате исследований предложена формула для определения усадки при высыхании:

$$\Delta \varepsilon^{sh} = \alpha^{sh} \cdot \Delta h^{avg}, \quad (1)$$

где α^{sh} – коэффициент усадки;

h^{avg} – изменение внутренней влажности бетона.

В работе [8] эмпирически установлено, что чем выше модуль упругости керамзитобетона, тем ниже деформации усадки, обусловленной высыханием.

В [10] предложено коэффициент усадки легкого бетона в момент времени t определять следующим образом:

$$\alpha^{sh}(t) = \frac{E_{c(t\infty)}}{E_{c(t)}} \cdot \Delta\varepsilon_{\infty}^{sh}, \quad (2)$$

где $E_{c(t\infty)}$ – модуль упругости легкого бетона;

$E_{c(t)}$ – модуль упругости легкого бетона в момент времени t ;

$\Delta\varepsilon_{\infty}^{sh}$ – предельная усадочная деформация, определенная экспериментами.

Аутогенная усадка. Эта усадка не вызывает существенных внутренних напряжений в бетоне и протекает в раннем периоде при возникновении новообразований продуктов гидратации, объем которых меньше, чем абсолютные объемы исходного негидратированного цемента и воды [2]. В гидратирующей цементной пасте образуется пространство в виде пустот. Чем ниже водоцементное отношение, тем меньше диаметр образующихся пор и тем больше капиллярное натяжение.

Аутогенную усадку можно разделить на четыре стадии. Для I стадии характерно уравнивание температуры образца с температурой окружающей среды в первые десять часов после заливки, что сопровождается понижением температуры после интенсивного перемешивания бетонной смеси в результате механической энергии, передаваемой от бетономешалки. В результате исследований I стадии аутогенной усадки [11, 12], опытные данные показали небольшое расширение керамзитобетона в течение первых пяти часов.

Стадия II – нейтральная стадия. Как только образец охлаждается до температуры окружающей среды, термическое сжатие прекращается, и развивается незначительное напряжение, в то время как смесь все еще находится в состоянии покоя, который длится около пяти часов.

Окончание периода покоя свидетельствует о быстром и резком снижении усадки в течение короткого периода времени, характерного для III стадии. Эта недолгая стадия генерирует 58 % всей деформации аутогенной усадки до 7 дней и совпадает с повышением температуры. Это указывает на то, что значительная деформация является результатом интенсивной гидратации цемента, которая

потребляет поровую влагу и вызывает уменьшение внутренней относительной влажности. Возникает отрицательное капиллярное давление, оказывающее сжимающее напряжение на стенки пор [13]. Капиллярный эффект связан с тем, что поры, образующиеся в цементной матрице, меньше чем поры в керамзите [11].

В IV стадии усадочная деформация переходит в устойчивую стадию, сопровождающуюся снижением температуры образца. Эта стадия распространяется на более поздний период, до 50 часов, с почти постоянной скоростью деформации.

Авторы [14] описывают аутогенную усадку тремя стадиями в течение первого дня после смешивания бетона, а именно: жидкая, скелетообразующая и фаза упрочнения. Во время жидкой фазы все объемные изменения происходят в вертикальном направлении. Эта стадия характеризуется отсутствием напряжения внутри бетона. Во время фазы формирования скелета вследствие жесткости цементной пасты образуется жесткая структура, и бетон оказывает сопротивление некоторым химическим напряжениям усадки. Примерно через четыре часа бетон входит в третью фазу, где он развивает достаточную жесткость и становится устойчивым к деформациям химической усадки.

С появлением высокопрочных легких бетонов с низким водоцементным отношением и с применением сверхпластичных химических добавок, аутогенная усадка проявляется гораздо значительнее, особенно в очень раннем периоде. Влияние изменения влажности окружающей среды на аутогенную усадку было рассмотрено авторами [15, 16]. В работе [13] исследовались деформации усадки опытных образцов в течение первых 24 часов при влажности 40 %, 100 % и при ветре 2 м/с (рисунок 1, 2). Результаты исследований показали увеличение деформаций усадки до 15 % при уменьшении влажности воздуха от 100 % до 40% в первые часы измерений аутогенной усадки. При использовании предварительно увлажненного керамита значение аутогенной усадки керамзитобетона снизилось на 35 % по сравнению с эталонным керамзитобетонным образцом в работе [17]. Также результаты исследований показали, что с уменьшением прочности керамзитового гравия, увеличивается значение деформаций аутогенной усадки. Применение предварительно увлажненного керамзита в течение 24 суток позволило максимально снизить деформации аутогенной усадки керамзитобетона [6,22].

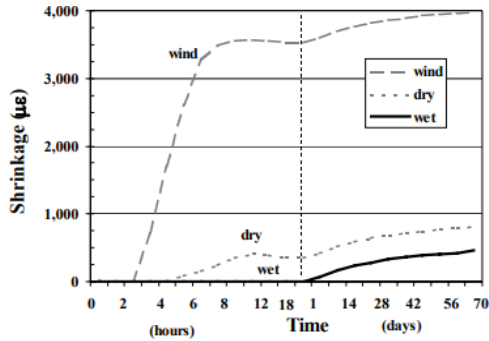


Рис. 1. Влияние влажности на относительные деформации аутогенной усадки (shrinkage, µε) в первые 24 часа (time, часы) [15]:
 а) wind – при ветре 2 м/с; б) dry – при влажности 40 %;
 в) wet – при влажности 100 %

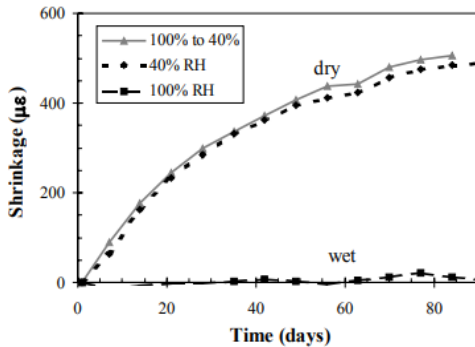


Рис. 2. Влияние влажности на относительные деформации аутогенной усадки (shrinkage, µε) в течение 80 дней (time, дни) [15]:
 а) dry – при влажности 40 %; б) wet – при влажности 100 %

Карбонизационная усадка. Карбонизация происходит в результате взаимодействия углекислого газа (CO_2) с гидратированным цементом (гидроокисью кальция). При наличии влаги CO_2 образует угольную кислоту, которая реагирует с кристаллами гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) с образованием карбоната кальция (CaCO_3), который осажается в пустых порах. Сопутствующим процессом карбониза-

ции является сжатие бетона, происходит уменьшение в объеме цементного камня, называемое карбонизационной усадкой.

Карбонизация идет от поверхности бетона внутрь, однако протекает очень медленно. Фактическая скорость карбонизации зависит от проницаемости бетона, его влажности, содержания CO_2 и относительной влажности окружающей среды. Бетон с высоким водоцементным отношением и в тоже время недостаточно затвердевший будет более подвержен карбонизации. В работах [18, 19] анализировались карбонизационная и усадка при высыхании в зависимости от влажности окружающей среды на открытом воздухе (рисунок 3). По результатам испытаний отмечено, что карбонизационная усадка больше у образцов, защищенных от дождя, но подвергнутых воздействию влажного воздуха, чем периодически находящихся под дождем.

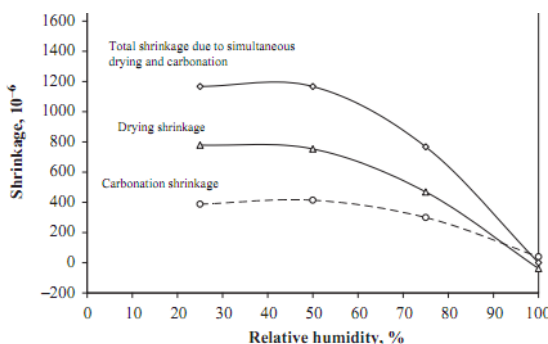


Рис. 3. Зависимость относительных деформаций усадки (shrinkage, 10^{-6}) от влажности окружающей среды (relative humidity, %) [19]

- а) drying shrinkage – усадка при высыхании; б) carbonation shrinkage – карбонизационная усадка; в) total shrinkage – полная усадка (усадка при высыхании и карбонизационная)

Заключение. Негативное воздействие усадки бетона при высыхании проявляется в виде усадочных трещин на поверхности конструкций. Усадочные трещины вследствие усадки, обусловленной испарением влаги, появляются в первую очередь у ребер, в местах быстрого высыхания, в местах резкого перепада сечений по высоте [20].

Если аутогенная усадка достигает 1мм/м в раннем периоде, то высок риск трещинообразования [15].

Влияние карбонизационной усадки более велико у меньших по объему образцов или у образцов с меньшей поверхностной площадью [21]. Окончательный эффект от карбонизационной усадки для оценки долгосрочной усадки полноразмерных бетонных элементов следует учесть при экстраполяции данных, определенных на небольших образцах в лаборатории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмитько, Е. И. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок / Е. И. Шмитько [и др.] // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2020. – Т. 1. – № 42. – С. 128–135.

2. Technical committee report on autogenous shrinkage of concrete : proceedings of international workshop / ed.: E. Tazawa. – Hiroshima ; Japan : Japan Concrete Institute, 1996. – P. 1–63.

3. Майоров, А. В. Аутогенная усадка бетона / А. В. Майоров, Д. Е. Мандрико // Академическая публицистика. – 2019. – № 12. – С. 59–61.

4. Каримов, И. Ш. Механизм усадочных деформаций бетона и факторы, влияющие на них (обзор) : Часть 1 / И. Ш. Каримов // Технологии бетонов. – 2010. – № 5–6. – С. 22–24.

5. Test for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete : ASTM C 157/C 157M–08. – Publ. date. 01.10.2008. – West Conshohocken : ASTM International, 2008. – 7 p.

6. Fujiwara, T. Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete / T. Fujiwara // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2008. – Vol. 6, iss. 1. – P. 31–44.

7. Rzhnevskaya, V. A. Shrinkage of expanded clay concrete: A review / V. A. Rzhnevskaya // AlfaBuild. – 2020. – Vol. 15, iss. 3. – 6 p.

8. A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes / P. Shafiqh [et al.] // Materials & Design. – 2014. – Vol. 60. – P. 320–327.

9. Choi, S. Internal relative humidity and drying shrinkage of hardening concrete containing lightweight and normal-weight coarse aggregate

gates: A comparative experimental study and modeling / S. Choi // *Constructions and Buildings materials*. – 2017. – Vol. 148. – P. 288–296.

10. Bazant, Z. P. Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms / Z. P. Bazant, Y. Xi // *Materials and Structures*. – 1994. – Vol. 27, iss. 1. – P. 3–14.

11. Bentur, A. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates / A. Bentur, Sh. Igarashi, K. Kovler // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31. – P. 1587–1591.

12. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete / K. Kohno [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29, iss. 4. – P. 611–614.

13. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers / A. A. Ramezani pour [et al.] // *Constructions and Buildings materials*. – 2013. – Vol. 44. – P. 411–418.

14. Effect of prewetting degree of ceramsite on the early-age autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete / T. Ji [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 98. – P. 102–111.

15. Holt, E. E. Early age autogenous shrinkage of concrete / E. E. Holt. – Espoo ; Finland : Finland Technical Research Centre of Finland, 2001. – 197 p.

16. Tazawa, E. I. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste / E. I. Tazawa, S. Miyazawa // *Cement and Concrete Research*. – 1995. – Vol. 25, iss. 2. – P. 281–287.

17. Effect of lightweight aggregate type on early-age autogenous shrinkage of concrete / Y. Zhuang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 120. – P. 373–381.

18. Neville, A. M. Properties of concrete. / A. M. Neville. – 4th ed. – Harlow ; UK : Pearson Prentice Hall, 2006. – 844 p.

19. Verbeck, G. J. Carbonation of hydrated Portland cement / G. J. Verbeck // *ASTM International. Special Publication*. – 1958. – Vol. 205. – P. 17–36.

20. Бондаренко, В. М. Железобетонные и каменные конструкции / В. М. Бондаренко, Д. Г. Суворкин. – М. : Высшая школа, 1987. – 386 с.