

УДК 658.562.64

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ

С.А. ТЕРЕХОВ, В.А. ХВАТЫНЕЦ

(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

Целью исследования являлось определения степени завершенности структурообразования как функции приращения пористости, а так же получение зависимости между водонасыщением от сложившейся капиллярно-поровой структуры и ее влияние на механические характеристики.

Введение. Эксплуатационные характеристики материалов зависят от показателя капиллярного всасывания и могут быть определены прямым (высушиванием) и косвенным (диэлькометрическим, кондуктометрическими) методами [1–3].

Попеременное увлажнение и высыхание материала как при положительных, так и при отрицательных температурах вызывает в материале дополнительные напряжения, которые в ряде случаев могут оказаться разрушающими (развитие трещин и пр.)

Результаты опытов [4–7] влияния характера высыхания образцов на их усадку. Опыты проводились на бетонных призмах сечением площадью 25 см^2 длиной 11,5 см, часть которой высыхала с боковой поверхности при гидроизолированных торцах, а часть – с открытых торцов при гидроизолированной боковой поверхности [8–11].

Деформации, развивающиеся на поверхности образцов, высыхающих с поверхности, вследствие неравномерного распределения влажности по их поперечному сечению [12, 13], существенно искажают ход развития и величины усадочных деформаций. Различными оказываются также предельные величины усадки сравниваемых образцов.

Реальное пористое тело имеет поры и капилляры различных диаметров, поэтому жидкость по ним течет с различными скоростями. Кроме того, капилляры в реальном пористом теле имеют разную извилистость, форму и шероховатость.

Экспериментальное определение зависимости $p = f(r)$ позволяет рассчитать функцию распределения пор по размерам в пористом теле.

Для учета неправильной форме капилляров [14, 15] вводят коэффициент извилистости ξ . Пористость пористого тела или порозность порошка с учетом коэффициента извилистости представляют следующим соотношением:

$$\Pi = \frac{V_n}{V_{\text{общ}}} = \frac{\pi N s r^2 l \xi}{s l} = \pi N r^2 \xi, \quad (1)$$

где N – число пор (капилляров) на единицу поверхности пористого тела (порошка);

s – сечение образца;

r – радиус пор (капилляров);

l – длина образца;

$\xi = 1,4–1,6$ – для неуплотненных слоев порошка при порозности от 0,35 до 0,43.

В других случаях, коэффициент извилистости δ рассчитывается из следующего выражения:

$$\xi = P \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin(2P-1)}{3} \right] \right\}^{-2}, \quad (2)$$

где P – вес образца.

Поскольку пористость Π определяется количеством испаряемой воды [16, 17], то рассмотрим, нельзя ли выразить степень завершенности структурообразования η через влажностные характеристики системы. Выразим сперва через испаряемую воду конечную пористости Π_k затвердевшего камня. Для этого мы должны довести его до максимального насыщения [18]. При максимальном насыщении капиллярно-пористого тела влагой его влагосодержание и соответствующее (равновесное) этому влагосодержанию значение потенциала оводнения определяется общим относительным давлением равновесного пара воды $\phi = 1,12$.

Следовательно,

$$\Pi_k = \Pi_{\alpha\theta\tau_0} = \Pi \cdot u_a = \Pi \cdot u_{\text{мн}}. \quad (3)$$

Приращение пористости определится избытком влагосодержания исследуемой системы над влагосодержанием типичного капиллярно-пористого тела.

Следовательно, поставленная задача – выразить степень завершенности структурообразования через влажностные характеристики – решена. В полученном соотношении переменной величиной является избыток влагосодержания u_{η} . Так как именно вода, содержащаяся в структурообразующей системе и образующая этот избыток влагосодержания (как следует из полученного соотношения), управляет процессом структурообразования, то ее можно называть структурной водой. Эта структурная вода участвует в создании переменной части пространства.

Капиллярная диффузия имеет место при частичном заполнении капилляра, когда влага сосредотачивается в боковых, наиболее узких местах. Перемещение влаги происходит лишь по микроскопическим открытым каналам (рис. 1). Это явление называется капиллярной диффузией в отличие от капиллярного всасывания, при котором влага перемещается по капилляру, заполняя все его пространство.

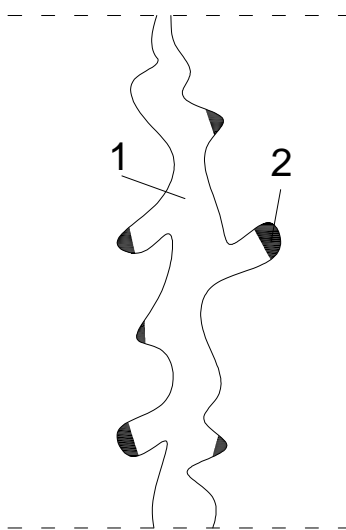


Рис. 1. Схема частичного заполнения капилляра при капиллярной диффузии:
1 – капилляр; 2 – вода

Капиллярная диффузия в материалах неорганического происхождения протекает более интенсивно, чем в органических материалах. Если показатель капиллярной диффузии силикатного бетона – 0,5. Так, бетон имеет относительно высокие показатели всасывания и диффузии влаги в капиллярах, а это свидетельствует также и об интенсивности процесса высыхания бетона, обусловленного скоростью перемещения влаги в его капиллярах.

Изменения, вызванные адсорбцией и десорбцией паров воды в кристаллической структуре искусственного камня, приводят к изменению микrorазмеров всей структуры. При адсорбции паров воды структурные элементы набухают, а вследствие десорбции они претерпевают усадку. При этом только 20% микродеформаций кристаллов превращаются в макродеформацию, остальная часть гасится внутри. Отсутствие прямой пропорциональности между количеством адсорбированной воды и деформаций искусственного камня является следствием изменения пористости структуры в процессе усадки и набухания.

Долговечность бетонов, эксплуатируемых в условиях воздействия влажной среды, в значительной степени обусловлены капиллярными явлениями, имеющими место в тонких порах этих материалов. Явление капиллярного впитывания жидкости можно оценить, используя коэффициент сорбции воды, характеризующий способность материала впитывать воду при контакте с ней, который для каждого конкретного материала определяется по экспериментальным данным. Процесс увеличения влагосодержания образцов с некоторыми погрешностями может быть описан уравнениями двух прямых, имеющих разные тангенсы угла наклона и соответственно разделен на два основных этапа. На первом основном этапе изучаемого процесса, имеющего практическое значение, происходит довольно быстрое капиллярное поднятие жидкости, которое прекращается после того, как фронт воды достигает верхней грани образца. При этом масса воды, поглощенная единицей объема сухого материала, в результате капиллярного подсоса распределяется в нем и займет объем, который будет характеризовать активную прочность, участвующую в капиллярном всасывании воды. Несложно предположить, что образцы материала, имеющие одинаковую пористость и различные значения коэффициентов сорбции воды (A), будут иметь различную долговечность.

Немаловажную роль в формировании оптимальной структуры играет регулирование режимов автоклавной обработки, позволяющее получать материал высокого качества за счет направленного синтеза продуктов гидратации, характеристик твердой фазы и межпорового пространства.

Основной определяемой эмпирически числовой характеристикой структуры капиллярно-пористого материала является функция распределения объема пор по радиусу.

Для оценки коэффициента влагопроводности были использованы опытные данные о кинетике одномерного водопоглощения, полученные на образцах в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами 4x4x16 см из материала, в котором вместо кварцевого песка использовалась отработанная формовочная смесь и ваграночный шлак. Использовались образцы с плотностью $\rho_0 = 1690 \text{ кг/м}^3$, у которых боковые стороны были покрыты водонепроницаемой замазкой. Вертикально подвешенный образец нижней гранью соприкасался с поверхностью воды, и с помощью весов отслеживалось изменение его массы во времени $m(t)$.

Постановка задачи состоит в определении коэффициента влагопроводности материала $\beta(\omega)$ (таблица).

Таблица

Численные значения высоты поднятия жидкости в образце H и коэффициента ξ .

H , см	t_c , с	ξ
8,11	126960	2,347
7,628	144060	2,344
8,126	181500	2,414
8,02	126960	2,330
8,69	384000	2,448
8,80	110940	2,228
8,98	216000	2,138
8,342	138240	2,246
8,18	912600	2,427
11,03	486000	2,245

Анализ результатов таблицы позволяет оценить влияние поровой структуры образцов на кинетику водопоглощения.

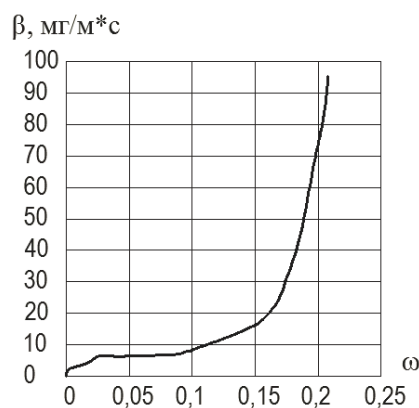


Рис. 2. Коэффициент влагопроводности материала с плотностью 1690 кг/м^3 в зависимости от его весовой влажности, полученной в результате численного анализа

При небрежении сорбционным увлажнением эта зависимость имеет вид:

$$\beta(\omega) = \frac{\rho_0 \sigma \cos \varphi \omega_v^3}{\rho_{ж} \xi(\omega_v) S_v^2(r_\omega) f_v(r_\omega) r_w^2}, \tag{4}$$

- где ρ_0 – объемная масса материала;
 $\rho_{ж}$ – плотность жидкости;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;
 ν – вязкость жидкости;

φ – краевой угол смачивания материала жидкостью;

ω_v – объемная влажность материала;

ξ – коэффициент извилистости;

S_v – удельная поверхность соприкосновения жидкости с веществом материала;

f_v – дифференциальная функция распределения объема пор по радиусам;

r_{ω} – критический радиус (радиус капилляров, содержащих мениски).

Величины ω_v и $\xi(\omega_v)$ определяются из соотношений:

$$\omega_v = \int_0^{r_{\omega}} f_v(r) dr, \quad (5)$$

$$\xi(\omega_v) = \omega_v \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin(2\omega_v - 1)}{3} \right] \right\}^{-2}, \quad (6)$$

Таким образом, мы смогли выразить степень завершенности структурообразования через влажностные характеристики, исследовали зависимость коэффициента стойкости материала от коэффициента сорбции. Проследили влияние характера высыхания образцов на их усадку. Проследили закономерность влияния водонасыщения на прочность образцов. Чем больше водонасыщение, тем меньше прочность. Также мы отметили, что после проведения испытаний масса образцов уменьшается, что может существенно повлиять на качество готового изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. De Donder Th, von Rysselbeghe P.L' Affinite. – Paris, 1938.
2. Цимерманис, Л.Б. Термодинамическое развитие открытой системы, в которой химическая реакция сопряжена с процессами структурообразования / Л.Б. Цимерманис, Д.И. Штакельберг, А.Р. Генкин // Изв. АН ЛатвССР. Сер. физико-техническая. – 1974. – № 6. – С. 55–63.
3. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г.И. Горчаков, М.М. Капкин, Б.Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
4. Горчаков, Г.И. Специальные строительные материалы для теплоэнергетического строительства / Г.И. Горчаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 304 с.
5. Вяжущие вещества, бетоны и изделия из них / Г.И. Горчаков [и др.]. – М.: Высш. шк., 1976. – 145 с.
6. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
7. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
8. Шейкин, А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А.Е. Шейкин. – М.: Стройиздат, 1974. – 191 с.
9. Powers, T.C. Studies of the Physical Properties of Hardend Portland Cement Paste / T.C. Powers, T. L. Brownyard // ACSJ Journal. – Vol. 43. – March, 1947.
10. Дибров, Г.Д. Изменения объема (усадка) цементного камня / Г.Д. Дибров, М.С. Остриков, Т.П. Петренко. – ДАН СССР, 1963. – С. 648.
11. Цимерманис, Л.Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел / Л.Б. Цимерманис. – Челябинск: Ю.-У. кн. изд-во, 1970.
12. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1972. – 351 с.
13. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В.И. Бабушкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 187 с.
14. Бабушкин, В.И. Термодинамика в процессах гидротации и коррозии цемента: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Бабушкин. – Харьков: ХПИ, 1972.
15. Шабанов, Д.Н. Оценка параметров влажопроводности строительных материалов для теплотехнических расчетов / Д.Н. Шабанов, А.В. Афонин, В.И. Никитин // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Воднохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2003. – № 2. – С. 98–100.
16. Александровский, С.В. Производство железобетонных ферм / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1968. – 188 с.
17. Мчедлов-Петросян, О.П. Термодинамика и термохимия цемента / О.П. Мчедлов-Петросян, В.И. Бабушкин // VI Междунар. конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Т. II, кн. I. – С. 6–16.
18. Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров / С. Брунауэр. – М.: ИЛ, 1948. – Т. I. – 784 с.