

УДК 624.012

Ахметзянов Ф.Х. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: olegxxii@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

К эффекту торможения силовой трещины в цементном камне (бетоне) усадочным трещинообразованием

Аннотация

В работе предложен учёт торможения силовой трещины на пересечении с усадочной трещиной способом сопоставления энергии в вершине развивающейся трещины и энергии разрыва связей в усадочной, принимаемой в простейшем случае эквивалентной математическому разрезу.

Ключевые слова: цементный камень, бетон, усадка, торможение трещин.

Известно, что в цементном камне (бетоне) механическая нагрузка в зависимости от интенсивности и продолжительности действия приводит к деформациям материала, а при определённом их уровне происходит трещинообразование. На основе экспериментов исследователи едины во мнении, что процесс возникновения и развития трещин в цементном камне (бетоне) многостадийен и в общем случае включает масштабы субмикро-, микро-, мезо-, макротрещинообразования, также появление магистральной трещины.

Начальные стадии локального разрушения (на субмикро- и микроуровне) относительно далеки от глобального разрушения (т.е. образования магистральной трещины), охватывают достаточно малые участки и объёмы деформированного материала и отличаются малыми значениями параметров трещин (длин, раскрытий и заглублений). В настоящее время по этим стадиям имеется чрезвычайно мало опубликованных исследований в противоположность стадиям развития макро- и магистральных трещин.

Поэтому, учитывая, что в стадии эксплуатации в строительных элементах зданий с отработанной технологией изготовления зародыши субмикро- и макротрещин могут вырастать до макро- и магистральных трещин, в этой работе основное внимание уделяется субмикро- и макротрещинам. Для краткости – малым трещинам.

Очевидно, их появление и последующее развитие зависит от многих факторов (в работе [1] выявлено не менее 20 факторов), для которых возможны парные, тройные и др. комбинации взаимодействия. Следовательно, малые трещины будут иметь статистическое распределение параметров.

С другой стороны, они появляются в кристаллическом материале и потому размеры кристаллов цементного камня обуславливают параметры малых трещин. Стоит также отметить, что, возникнув в плоскости спаянности, трещина при переходе из одного кристалла в другой должна, как правило, изменять своё направление на каком-то отрезке своей траектории.

Сложность указанных явлений для аналитического рассмотрения событий деформирования и растрескивания материала вынуждает выделять прежде всего фактор размеров, как охватывающий при малых трещинах незначительный участок или объём и ограничиваться событиями в пространстве микроструктуры цементного камня (бетона) и субмикроструктуры. Это масштаб уровня кристаллической решётки и кристаллов цементного камня.

При исследованиях для фиксации и отображения развития малых трещин в образцах цементного камня использовался электронный микроскоп с увеличением до 20000 крат.

В нескольких цементных образцах с размерами 30×30×5 мм с помощью полиэтиленовой плёнки толщиной ≈0,1мм были образованы искусственные трещины длиной 10 мм: в трёх образцах по одной трещине, в других трёх таких же – по две трещины.

За время твердения (более 250 суток) в образцах образовались усадочные трещины случайного направления с длиной 1–3 мм, с раскрытием до 0,001–0,008 мм. Часть трещин, пересекаясь, образовывала замкнутые геометрические фигуры – треугольные и четырёхугольные с максимальными размерами между противоположными сторонами от 0,75–3,5 мм.

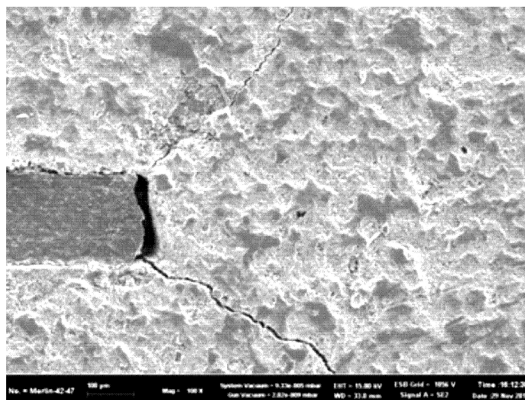


Рис. 1. Развитие усадочных трещин с началом в вершине искусственного надреза (увеличение 100×)

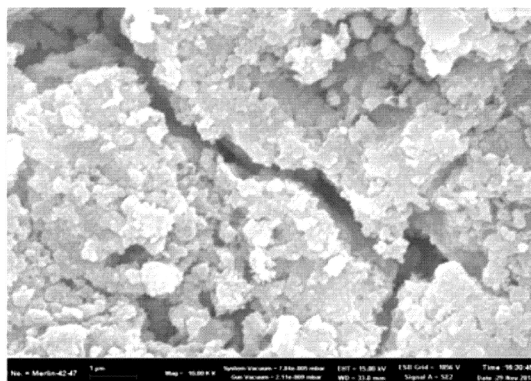


Рис. 2. «Рыхлая» кристаллическая структура поверхностного слоя цементного камня вблизи берегов развивающейся усадочной трещины (увеличение 10000×)

Следует отметить, что усадочное растрескивание в цементном камне является типичным при изготовлении бетонных и железобетонных изделий [2]. Даже при твердении в воде образуются случайные трещины усадки, что объясняется выделением теплоты при гидратации клинкера и возникновением неоднородного температурного поля.

В условиях твердения цементного камня наибольшие растягивающие напряжения возникают от давления насыщенного пара и влаги в капиллярах:

$$p = \frac{2\gamma}{r}, \quad (1)$$

здесь γ – поверхностное натяжение в цементном камне на поверхности капилляра; r – радиус капилляра.

Микропоры (геля, адсорбционные, внутрикристаллические по Пауэрсу, Фельдману, Кондо) в цементном камне имеют размер 6–15 Å (1 Å = 10⁻⁸ см), а межкристаллические и межслоевые – менее 6 Å.

По Витману удельная поверхностная энергия для цементного камня равна 0,4 Дж/м².

По формуле (1) значения напряжений для капилляров радиусом 3 Е равные $p = \frac{2 \cdot 0,4}{0,3 \cdot 10^{-9}} = 2,667 \cdot 10^9 \frac{H}{M^2} = 2,667 \cdot 10^3 MPa$, что превышает прочность цементного камня на растяжение.

По экспериментам Будникова П.П. линейное расширение цементного камня в образцах при $V/D=0,24$ через сутки твердения составляла 0,0014, и нарастало к возрасту 28 дней до 0,0031, а к 60 дням – оставалась неизменной.

Ещё в 1986 году была опубликована работа с оценкой длины усадочных трещин длиной l при растяжении цементного камня механической нагрузкой по методу механики разрушения [3]:

$$l = \frac{E\gamma}{R_{bt}^2}, \quad (2)$$

где E, R_{bt} – соответственно модуль упругости и прочность на растяжение цементного камня соответственно.

Полученное из выражения (2) длина трещин была использована для оценки количества трещин в 1 см^3 цементного камня и получено соответствие эксперименту, проведённому Цилосани З.Н.

Эти оценки показывают возможность использования выражений (1) и (2) как для определения напряжения в стенках микропор цементного камня, так и для определения длины усадочных микротрещин на поверхности цементного камня и стенках микропор.

Расстояние между этими трещинами r_{cr} исходя из случайности (равновероятности) усадочных микротрещин [4] и данных экспериментальных наблюдений в микроструктуре может составлять несколько микрон, то есть примерно равно размеру кристалла цементного камня.

В работе [5] в цементном камне на стенках поры размером 80×77 мкм находилось 24 трещины с длиной от 2,6 до 43,6 мкм (со средней длиной 19,7 мкм (0,0197 мм)).

Они наблюдались с помощью электронной микроскопии при 1000-кратном увеличении в суточном возрасте твердения.

Среднее отношение длины трещин к максимальной ширине раскрытия составляло 29,4 (от 2,63 до 43,6).

Представляют интерес данные по размерам структурных элементов и форме кристаллов (ЦК) в продолжении этой работы [6]. Эттрингит – $l=3230...4640 \text{ \AA}$ – в виде стержней гексагонально-призматической или игольчатой формы. Средние размеры $4100 \times 810 \text{ \AA}$ ($l \times b$).

Гидросиликат кальция С-S-H (I). Длина $1080...2080 \text{ \AA}$ – ширина $26...52 \text{ \AA}$ – в виде октаэдрических планок, иногда в виде волокнистых образований. Гель – сфероидальные шарообразные зёрна диаметром $290...320 \text{ \AA}$.

Отметим, что максимальное раскрытие усадочных трещин в микроструктуре ЦК [4, 5, 6] до приложения механической нагрузки в кристаллах цементного камня по рентгенограммам [7] равно нескольким ангстремам. Тогда раскрытие до 0,8 мкм (8000 \AA) эквивалентно смещению на несколько тысяч кристаллических решёток. Однако при этом следует заметить, что внедрение трещины вглубь материала создается сужением раскрытия и ориентировочно отношение длины трещины к заглублению составляет среднюю величину K_3 .

Выше изложенные данные позволяют рассмотреть события, когда силовая трещина (например, при воздействии растягивающих напряжений) касается трещины усадки (наиболее прострой случай) перпендикулярного направления такого же раскрытия.

При этом уместно оговорить, что термин «трещины усадки» можно понимать обобщённо, а при дальнейшем накоплении экспериментальных данных подразделять при необходимости трещины от различных причин (например, от расширения в процессе схватывания цементного теста в суточном возрасте [7], при отклонении режима тепловлажностной обработки бетона, кристаллизационном давлении, действии осмотических сил (капиллярном давлении), комбинации причин...).

Энергию псевдодеформирования, необходимую для образования усадочной трещины известного раскрытия на единицу длины обозначим \mathcal{E}_{cr}^* , а энергию развивающейся трещины (с известными параметрами) в этом же материале обозначим $\mathcal{E}_{cr,i}$. Условие торможения развивающейся трещины на пересечении с существующей запишется в виде:

$$\mathcal{E}_{cr,i} \leq \mathcal{E}_{cr}^*, \quad (3)$$

$$h_{cr,i} \leq h_{cr}^*, \quad (4)$$

где $h_{cr,i}$ – глубина внедрения (заглубления) развивающейся трещины в материал элемента; h_{cr}^* – глубина тормозящей трещины.

В простейшем случае подобия раскрытия трещин математическому разрезу удельное напряжение разрыва связей между ионами цементного камня в плоскости трещины равно числу ионов (атомов) на 1 см^2 N1 умноженному на осреднённую силу разрыва связей между двумя ионами (атомами) и с учётом координационного числа (коэффициента влияния) окружающих соседних ионов (атомов):

$$\sigma_{цкi} \leq Nn_1, \quad (5)$$

Кулоновская энергия взаимодействия между двумя ионами, имеющими заряд q и находящимися на расстоянии друг от друга равно $q^2/2$ [8], а с учётом взаимодействия с остальными ионами:

$$n_1 = \frac{Aq^2}{2}, \quad (6)$$

где A – постоянная Маделунга.

Полная внутренняя энергия кристалла U в случае учёта возможного частичного сжатия при взаимодействиях с остальными ионами (в равновесном состоянии):

$$U = \frac{Aq^2}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right). \quad (7)$$

Величина m определяется по измеренной сжимаемости кристалла в

$$U = \frac{Aq^2}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right). \quad (8)$$

Далее проверяем условие торможения трещины около пересечения с трещиной перпендикулярного направления:

$$\sigma_{кр} \leq \sigma_{цкi}, \quad (9)$$

где $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение страгивания трещины, определяемое по известному выражению механики разрушения:

$$\sigma_{кр} \leq \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}. \quad (10)$$

Список библиографических ссылок

1. Ахметзянов Ф.Х. Причины возникновения микроповреждаемости цементного камня и бетона в процессе твердения // Известия КГАСУ, 2013, № 4 (26). – С. 92-100.
2. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 230 с.
3. Ахметзянов Ф.Х. К оценке концентрации усадочных микротрещин в цементном камне // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – Новосибирск, 1986, № 11. – С. 55-56.
4. Ахметзянов Ф.Х. К особенностям деформирования, повреждаемости, изменения физико-механических характеристик бетона в конструкциях // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – Новосибирск, 1993. – С. 150-155.
5. Габидуллин М.Г., Хузин А.Ф., Рахимов Р.З., Габидуллина А.Н., Стоянов А.В. Структурная организация цементного камня // Известия КГТУ (КФУ), 2014, Т. 17, № 4. – С. 53-58.
6. Габидуллин М.Г., Хузин А.Ф., Рахимов Р.З., Габидуллина А.Н., Стоянов А.В. Микро и наноструктура цементного камня // Известия КГТУ (КФУ), 2014, Т. 17, № 4. – С. 70-74.
7. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.Н. Структура и свойство цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
8. Кузнецова Т.В., Кудряшов Ю.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – С. 13.
9. Будников П.П. Избранные труды. – Киев: Издательство АН УССР, 1960. – 575 с.

Ahmetzianov F.Kh. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: olegxxii@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

To the inhibition effect of the strength crack with shrinkage cracked at cement stone

Resume

The electronic microscope with a magnification of about 100...10000 times was used in this research. In several standard of mortar samples of size 30×30×5 mm were made of artificial cracks with polyethylene pellicle thickness of 0,1 mm, Length of cracks was ≈10 mm.

After hardening of more than 250 hours in samples appeared shrinkage. The attitude crack width to length amounted 0,001-0,008 width. Some cracks formed geometric shapes: triangles or quadrilaterals. The shrinkage cracks are typical in the ferroconcrete elements of constructions and appear before loading. This is due to thermal expansion in the hydration process and the emergence of a nonuniform temperature field and pressure of water vapor in pores and capillaries.

The possibility of using methods of fracture mechanics to determine the length of shrinkage cracks was shown in this work.

Keywords: cement stone, concrete, shrinkage, braking cracks.

Reference list

1. Ahmetzianov F.Kh. The reasons of occurrence of microdamageability cement stone and concrete in the course of hardening// News of the KSUAE, 2013, № 4 (26). – P. 92-100.
2. Tsilosani Z.N. Shrinkage and creep of the concrete. – Tbilisi: Metsniireba, 1979. – 230 p.
3. Ahmetzianov F.Kh. To the assessment of concentrations of shrinkage cracks in cement stone // News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture. – Novosibirsk, 1986, № 11. – P. 55-56.
4. Ahmetzianov F.Kh. To the peculiarities of deformation, damage, change of physico-mechanical characteristics of concrete in constructions // News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture. – Novosibirsk, 1993. – P. 150-155.
5. Gabidullin M.G., Khuzin A.F., Rakhimov R.Z., Gabidullina A.N., Stoyanov A.V. Structural organization of cement // Proceedings of the KSTU, 2014, Vol. 17, № 4. – P. 53-58.
6. Gabidullin M.G., Khuzin A.F., Rakhimov R.Z., Gabidullina A.N., Stoyanov A.V. Micro- and nanostructure of cement // Proceedings of the KSTU, 2014, Vol. 17, № 4. – P. 70-74.
7. Sheikin A.U., Chekhovsky J.V., Bruser M.N. Structure and properties of cement concrete. – M.: Stroiizdat, 1979. – 320 p.
8. Kuznetsova T.V., Kudryashov J.V., Timashev V.V. Physical chemistry binding materials. – M.: Vysshaya Shkola, 1989. – 13 C.
9. Budnikov P.P. Selected works. – Kiev: Publishing house of the AN USSR, 1960. – 575 p.