

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.162

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В БЕТОНЕ

Е.С. БОРОВКОВА, канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Представлены исследования механики разрушения бетона, в котором деформационные процессы происходят самосогласованно на разных масштабных уровнях. Показано, что энергия внутренних связей между структурными элементами в твердом теле является основой его прочности и целостности. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформационного состояния бетонных образцов методом акустической эмиссии (АЭ) и установлена связь между сигналами АЭ и энергетическими характеристиками материала. Приведенные закономерности могут послужить основой для создания критерия процесса разрушения бетона и оценки степени опасности повреждений на объектах различного назначения.

Ключевые слова: *структурообразование бетона, мезомеханика, энергия связи, акустическая эмиссия.*

Введение. В условиях стремительного развития новых технологий в строительстве и усовершенствования строительных материалов изготовление и применение изделий из бетона уже не первое десятилетие занимают одно из лидирующих мест в данной области. Бетон как искусственный конгломерат представляет научный интерес тем, что структурно развивается на протяжении всей своей «жизни», т.е. от начала взаимодействия компонентов портландцемента с водой до момента потери эксплуатационных характеристик строительных конструкций. Поэтому данный строительный материал претерпевает изменения, которые оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на структуру бетона на разных масштабных уровнях. Информация о поведении материалов на этих уровнях является крайне важной для оценки надежности, долговечности и эксплуатационных характеристик строительных конструкций, а также для создания новых материалов и технологий с заданными прогнозируемыми свойствами. Изучением данных вопросов занимается физическая мезомеханика. В данном разделе науки твердые тела рассматриваются как иерархические системы, в которых деформационные процессы происходят самосогласованно на разных масштабных уровнях.

Основная часть. *Физические свойства бетона на этапах структурирования.* Структура твердеющего бетона как композиционного материала на основе неорганических связующих (гидросиликатов кальция) состоит [1]:

- из твердой фазы, включающей гель гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, обладающих свойствами коллоидов, относительно крупные кристаллы этtringита, а также непрореагировавшие зерна клинкера, содержание которых уменьшается по мере гидратации цемента;
- пор (поры геля размером менее 100 нм, капиллярные поры размером от 100 нм до 10 мкм, воздушные поры и пустоты размером от 50 мкм до 2 мм).

Принято выделять четыре основных периода в процессе структурообразования бетона [2]:

- надмолекулярный (диаметр частиц d лежит в интервале $10^{-9} < d \leq 5 \cdot 10^{-9}$ м);
- субмикроскопический ($5 \cdot 10^{-9} < d \leq 10^{-7}$ м);
- микроскопический ($10^{-7} < d \leq 5 \cdot 10^{-4}$ м);
- макроскопический ($d > 10^{-4}$ м).

Для более детального изучения вопроса рассмотрим основные силы и связи, возникающие на различных масштабных уровнях и зависящие в основном от заряда, размеров частиц и расстояний между ними. Процесс производства бетона начинается с бетонной смеси, которую получают при затворении водой смеси цемента и заполнителей. Вода наравне с частицами портландцемента участвует на всех этапах структурирования цементного камня, и от ее свойств зависит конечный продукт. Между частицами твердой и жидкой фазы возникают различные силы [3]:

- механические (силы внутреннего трения) – возникающие между частицами размером 1–4 мм;
- межмолекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса). Энергия определяется теплотой испарения молекулярных веществ и лежит в интервале 0,1–40 кДж/моль;
- капиллярные (силы поверхностного натяжения в водных менисках) – между частицами размером 0,1–1 мм;
- флокулообразующие (электрические силы) – между частицами размером 0,1– $2 \cdot 10^{-4}$ мм. Это силы притяжения между молекулами воды и зарядами кристаллов цемента вследствие концентрации на поверхности частиц свободных электронов (радикалов) и положительно заряженных поверхностных атомов;

– коллоидные – между частицами размером $2 \cdot 10^{-4} - 10^{-6}$ мм. Это силы взаимодействия между частицами через возникающую на их поверхности оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы.

Помимо сил между частицами различных уровней возникают динамические связи [1]:

- ковалентные – действующие на расстоянии 0,1–0,2 нм и имеющие энергию 209–6270 кДж/моль;
- ионные, радиус действия которых 0,2–0,3 нм, а энергия – 4857 кДж/моль;
- водородные – на расстоянии 0,24–0,32 нм, обладающие энергией ~ 62,7 кДж/моль;
- криогидратные – на расстоянии 0,2–0,3 нм, их энергия составляет ~ 20,9 кДж/моль;
- дальнодействия – действующие на расстоянии 2–300 нм с энергией 4,18 кДж/моль.

Внутренняя энергия бетона с точки зрения физики делится на две составляющие:

- кинетическую энергию (поступательное, колебательное, вращательное движения атомов и молекул).

Само тепловое движение, хоть и незначительно, вносит нарушения в упорядоченное расположение атомов в кристалле, т.к. мгновенное расположение атомов будет отличаться от последующего из-за их колебаний;

- потенциальную (силы притяжения и отталкивания между атомами и молекулами). Величину потенциальной энергии межатомных связей принимают как один из основных критериев оценки прочностных свойств твердого тела.

Энергия связи – это энергия между частицами системы, которая равна работе, затраченной на разделение этой системы на ее составляющие и удаление их друг от друга на такое расстояние, на котором их взаимодействием можно пренебречь [4]. Между различными минералами в бетоне возникают различные энергии связи по своей величине (рисунки 1, 2), вследствие чего возникают локальные места с более высокими прочностными характеристиками и наоборот.

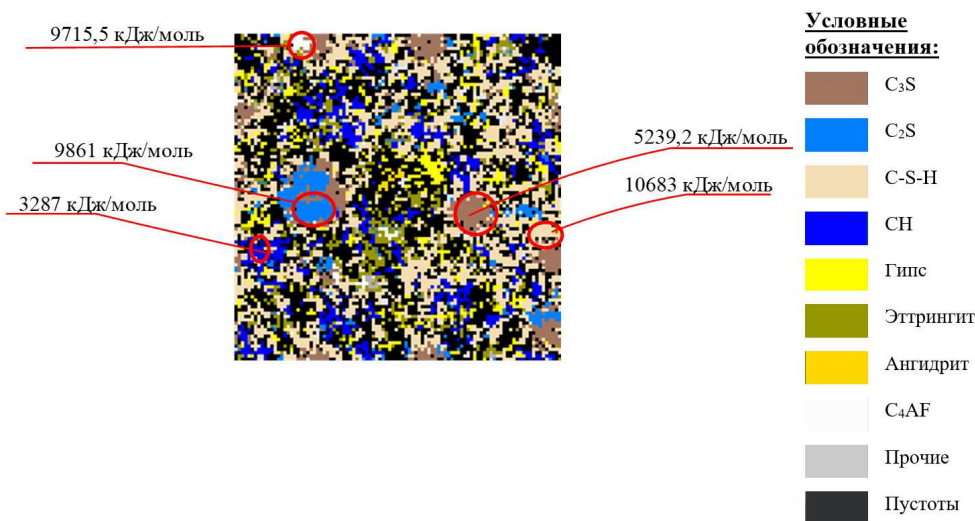


Рисунок 1. – Энергия связи минералов на виртуальной модели исследуемого цементного композита, возраст которого 72 ч

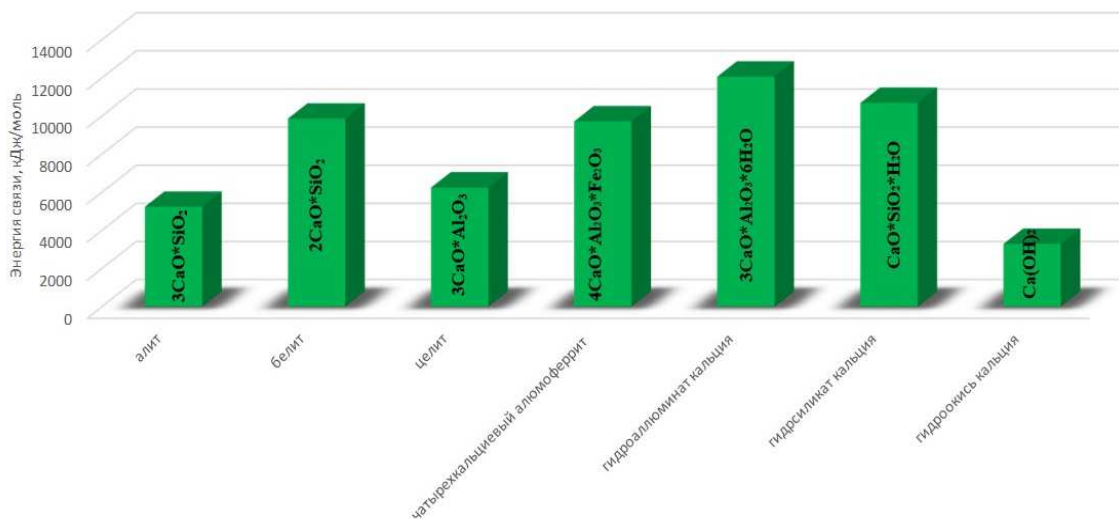
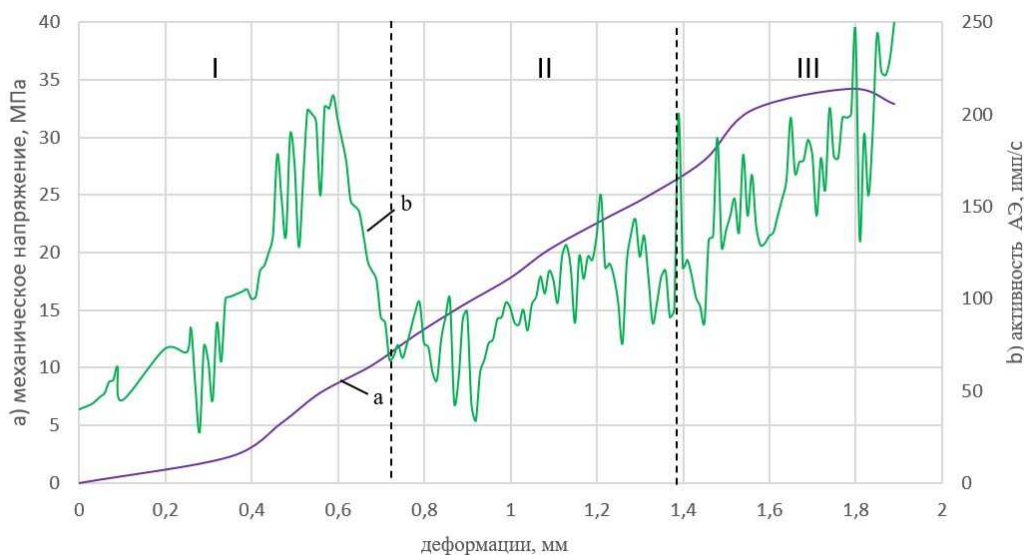


Рисунок 2. – Энергия связи минералов

Первоначально энергетический подход механики разрушения был предложен А.А. Гриффитсом. Данная концепция заключается в накоплении потенциальной энергии твердого тела в процессе деформации и превращении ее в поверхностную энергию образующихся новых поверхностей. Распространение трещины происходит в том случае, если при этом понижается полная энергия системы [4]. Основное влияние на деструктивные явления оказывают прочность связей, поры и дефекты в цементном камне, т.к. с ростом прочности связей и уменьшением пористости в нем аккумулируется больше упругой энергии и снижаются пластические свойства [3].

Исследование разрушения бетона. Одним из наиболее перспективных методов изучения структурных изменений и определения ресурса прочности природных и искусственных конгломератов является метод АЭ. Этот метод неразрушающего контроля основан на генерации упругих волн при структурных изменениях материала. Достаточно быстрые физические процессы структурных изменений в ограниченном объеме материала (пластическая деформация, разрушение, образование и рост трещин, движение дислокаций, фазовые превращения, трение и др.) сопровождаются излучением акустических волн [5]. В данной работе был проведен ряд экспериментальных исследований по испытанию образцов при их циклическом нагружении с заданной скоростью вплоть до разрушения. В качестве экспериментального образца использовался бетонный камень кубической формы размером $100 \times 100 \times 100$ мм. При испытаниях бетонного образца одновременно запускаются две программы: одна для регистрации сигналов АЭ, вторая – механических величин. В процессе нагружения образца в его материале происходят локальные изменения структуры, эти физические явления сопровождаются излучением АЭ сигналов (рисунок 3).



а – зависимость механической нагрузки от относительной деформации;
б – зависимость активности АЭ от деформации.

Рисунок 3. – Зависимость прочностных и АЭ характеристик образца бетона

На начальном этапе циклических испытаний происходит разрушение слабых межзатомных связей, т.к. для их разрыва требуется приложение наименьшей нагрузки. Разрушение происходит в результате концентрации механических напряжений в областях, в которых возникла наименьшая энергия связи между отдельными структурными элементами, зависящая от их взаиморасположения и объемного содержания. В результате возникновения очагов перенапряжений происходит разрушение межзатомных связей с перераспределением нагрузки на соседние элементы. Упругая сила внутри материала, ранее приходящаяся на область решетки, занятую трещиной, обходит ее по самому краю. В результате возникают неупругие деформации, что сопровождается значительной активностью акустической эмиссии (I область, см. рисунок 3).

По мере дальнейшего увеличения нагрузки количество прочных межзатомных связей также увеличивается из-за разрушения слабых связей между структурными элементами образца при меньших нагрузках, а вследствие этого активность АЭ уменьшается (II область, см. рисунок 3). Структурные неоднородности и области с различными энергиями связи между составляющими произвольно распределены по всему объему образца, что приводит к разбросу значений пределов прочности при их испытаниях [8]. В связи с этим вероятность встретить в образце «слабое звено» оказывается тем больше, чем больший объем оно занимает. Поэтому разрушающее напряжение выше для областей с меньшим занимаемым объемом и для малых образцов.

Если нагрузка меньше порогового значения, способного вызвать образование дефектов, то процесс будет затухающим. При превышении механического напряжения на образец некоторого порогового значения проис-

ходит образование новых трещин в данном микрообъеме, разрыв более прочных межзатомных связей с перераспределением нагрузки. Этот процесс носит лавинообразный характер, приводящий к полному разрушению, разделению образца на части и сопровождающийся ударной волной [3]. В результате растет активность АЭ (III область, см. рисунок 3).

Заключение. Таким образом, проведенные исследования расширяют представления об энергии внутренних связей в бетоне, а также о физической сущности процесса разрушения неоднородного материала. Применение мезомеханических моделей структурирования, процессов разрушения материала, взаимосвязанных с ними параметров акустической эмиссии позволяет предложить информативные и физически обоснованные критерии оценки надежности, долговечности и эксплуатационных характеристик строительных конструкций, а также для создания новых материалов и технологий с заданными прогнозируемыми свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернигорова, В.Н. Химия композиционных материалов на неорганических вяжущих / В.Н. Вернигорова, К.Н. Махамбетова, С.М. Саженко. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 163 с.
2. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 103 с.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
4. Гуртов, В.А. Физика твердого тела для инженеров : учеб. пособие / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко. – Изд. второе. – М. : Техносфера, 2012. – 560 с.
5. Морозов, Н.Ф. Проблемы динамики разрушения твердых тел / Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 1997. – 132 с.
6. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии : учеб. пособие / С.А. Бехер, А.Л. Бобров. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2013. – 145 с.
7. Кучеренко, А.А. Трансформация энергии межзатомных связей цементного вяжущего / А.А. Кучеренко // Вісн. ОДАБА. – 2011. – № 40. – С. 183–187.
8. Федоров, Б.В. Элементы физики твердого тела : учеб. пособие / Б.В. Федоров, Д.Ф. Нерадовский. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 236 с.
9. Параметры сигналов акустической эмиссии и их применение при мониторинге состояния структуры бетона / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
10. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А.Н. Серьезнов [и др.] ; под ред. Л.Н. Степановой. – М. : Радио и связь, 2000. – 280 с.
11. Nosov, V.V. Automated Evaluation of the Service Lives of Specimens of Structural Materials on the Basis of a Micromechanical Model of the Time Dependences of Acoustic Emission Parameters / V.V. Nosov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50, № 12. – P. 719–729.
12. Aitcin, P.-C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete / P.-C. Aitcin / Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. – June 2003. – P. 69–88.
13. Di Maio, A.A. Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments / A.A. Di Maio, L.J. Lima, L.P. Traversa // Structural Concrete. – 2004. – № 1. – P. 1–4.
14. Нарышкин, Д.А. Особенности акустико-эмиссионного корреляционного контроля разрушения горных пород / Д.А. Нарышкин // Сб. тр. Всерос. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения А.В. Римского-Корсакова, Москва, 10–11 нояб. 2010 г. – М. : ГЕОС, 2010. – С. 139–142.

Поступила 15.06.2021

PHYSICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL CHANGES IN CONCRETE

D. SHABANOV, E. BOROVKOVA

The paper presents studies of the mechanics of concrete destruction, in which the deformation processes occur self-consistently at different scale levels. It is shown that the energy of internal connections between structural elements in a solid is the basis of its strength and integrity. The results of experimental studies of the stress-strain state of concrete samples by acoustic emission (AE) are presented and the relationship between the AE signals and the energy characteristics of the material is established. These patterns can serve as a basis for creating a criterion for the process of concrete destruction and assessing the degree of damage risk at various facilities.

Keywords: concrete structure formation, mesomechanics, binding energy, acoustic emission.