

## СВОЙСТВА БЕТОНА КАК ФУНКЦИЯ СТРУКТУРНОГО РАЗНООБРАЗИЯ

**Коробко О.А.**, к.т.н., доц., **Тофанило В.Ю.**, аспирант,  
**Кусова Е.П.**, студ., **Стус А.Э.**, студ.

*Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, Украина*

### **Введение**

Сохранение нормативных свойств строительных конструкций в течение проектного срока службы в различных условиях эксплуатации определяется взаимосвязью и взаимодействием их составных частей. При этом основополагающее значение в обеспечении надежности конструкций имеет структурное оформление материала, из которого они изготовлены [1]. Бетон как подсистема строительной конструкции отличается впечатляющим разнообразием составов и структурных особенностей на всех уровнях неоднородностей [1, 2]: нано-, микро- и макроуровнях и уровне изделия. Формирование общей (интегральной) структуры материала, проявление его нормированных свойств в конструкции и способность к адаптации зависит от возможности реализации согласованных взаимоотношений между разноуровневыми структурами и подструктурами. Это требует создания сложной сети взаимообусловленных связей, объединяющих составляющие бетона в систему и отвечающих за ее изменчивость и устойчивость на всех этапах жизненного цикла. В структуре бетона нет абсолютного доминирования одних уровней неоднородностей над другими, но в силу его иерархически соподчиненного строения, в системе можно выделить макроструктуру как подсистему, которая инициирует, оперируя исключительно своим внутренним потенциалом, начальные условия организации нано- и микроструктур, включенных в ее состав. Тем самым определяются последующее поведение и функциональные резервы всего материала. Исходя из представления макроуровня как системной целостности с подчеркнутой гетерогенностью состава, была определена задача - показать разнообразие макроструктуры бетона и проанализировать индивидуальность проявления ее свойств в отдельных объемах.

### **Выбор модели макроструктуры и организация эксперимента**

Анализ структурного разнообразия макроуровня неоднородностей бетона проводили на образцах-кернах с различным составом бетона на

гранитном щебне, взятых из реальных конструкций. Было определено, что для всех образцов, независимо от их состава, характерно ярко выраженное отличие заполнителей по способам взаимного ориентирования, форме, размерам и расстоянию между ними (рис. 1, а). Несмотря на то, что заполнители располагаются произвольно по отношению друг к другу, в объеме образцов можно выделить своеобразно-упорядоченные структурные ячейки, образованные группами заполнителей, ограничивающих часть матричного материала. Ячейки различаются формой, определяемой типом укладки заполнителей, а также размерами, которые зависят от расстояний между заполнителями, и соотношениями адгезионно-когезионных сил связи на границах раздела между заполнителями и матрицей. Анализ показал, что объем каждого из образцов-керна на уровне макроструктуры включает неповторимый набор структурных ячеек с различным сочетанием параметров.

В работе [1] предлагается представлять макроструктуру бетона как структурную неоднородность материала конструкций в виде грубогетерогенной системы, состоящей из матричного материала, в котором определенным образом распределены заполнители. При этом матричный материал может быть принят как неоднородная среда со сложной внутренней организацией, осуществляемой в результате неуравновешенных межчастичных взаимодействий с образованием кластерных структур и развитой сети поверхностей раздела [3]. Формирование макроструктуры происходит путем взаимодействия матрицы с заполнителями.

Структурные ячейки в качестве элементов включены в оформление макроструктуры, которая, являясь системой для своих составных частей, связывает их в единое целое. Это означает, что организация структуры макроуровня неоднородностей бетона выполняется одновременно во всех ячейках, но ее реализация индивидуальна для каждой отдельной ячейки. Таким образом, для решения поставленной задачи была принята модель макроструктуры, представляющая собой взаимосвязанную совокупность различных по пространственным, геометрическим и физическим характеристикам структурных ячеек как уникального содружества самостоятельных макроструктур.

Для определения свойств материала в отдельных структурных ячейках и в изделии были изготовлены модели бетонных образцов на основе цемента с имитаторами заполнителей в виде призм и цилиндров, которые располагали таким образом, чтобы получить ячейки кубической и гексагональной формы при различном ориентировании заполнителей. Изменение состояния поверхности имитаторов осуществляли путем их обмазки поверхностно-активным веществом с повы-

шенной адгезией к цементу. По этому признаку образцы были разделены на контрольные (без обработки ПАВ) и аппретированные (с обработкой ПАВ).

### **Влияние разнообразия параметров макроструктуры на свойства материала в изделиях**

Результаты исследований показали, что все образцы-керна характеризуются определенной иерархией строения микроструктуры, организованной по принципу самоподобия (фрактальности) [4]. Это обусловлено значительным различием размеров заполнителей и особым порядком их взаимного распределения, при котором гранулы меньшего размера оказываются расположенными внутри структурных ячеек, образованных гранулами большего размера (рис. 1, б). Следовательно, макроструктура может быть представлена как сложная совокупность структурных ячеек в структурных ячейках, что предполагает взаимосвязь и взаимообусловленность взаимодействия ее составляющих, как на отдельных уровнях организации, так и между ними.

Многоуровневое оформление макроструктурной неоднородности позволяет предположить возникновение сложноорганизованной сети поверхностей раздела, в которой сети одного уровня включают сети других уровней. Учитывая, что каждая структурная ячейка неповторима по конфигурации и объему матричного материала, а также рельефу и состоянию поверхности заполнителей, параметры внутренних и внешних границ раздела уровней макроструктуры будут отличаться существенным разнообразием. Кроме того, заполнители при взаимодействии с матричным материалом самопроизвольно создают в нем собственные поля деформаций и напряжений [3]. Эти поля возникают локально, но в силу сложной взаимообусловленной организации макроструктуры, они объединены в единую сеть и совместно с деформациями, проявляющимися на поверхностях раздела макроуровня, определяют его структурообразование и свойства.

Таким образом, по мере становления структуры бетона на уровне неоднородности «матричный материал - заполнители» происходит увеличение степени ее структурного многообразия. Структурные ячейки не инвариантны друг другу с момента формирования изделия, и их непохожесть только усугубляется с возникновением и развитием новых для макроструктуры элементов – технологических трещин, внутренних поверхностей раздела и остаточных деформаций. Вместе с этим, неповторимость ячеек также определяется индивидуальностью строения и состава матричного материала, в качестве которого выступает микроструктура, являющаяся подсистемой макроуровня. Это предполагает влияние параметров макроструктуры на образование со-

ставляющих структуры бетона на уровне неоднородности «частицы вяжущего – дисперсионная среда» [5]. В каждой структурной ячейке происходит организация собственного содружества взаимосвязанных кластеров из частиц вяжущего и неповторяемой сети поверхностей раздела между ними. Проявление градиентов деформаций различного вида на межкластерных границах раздела провоцирует их развитие в начальные трещины и внутренние поверхности раздела на уровне микроструктуры, которые включаются в структуру макроуровня.

На рис.1, в, показано, что сети трещин и внутренних поверхностей раздела в структурных ячейках различных параметров отличаются по протяженности, ориентированию и количеству составных элементов. Оценить различие ячеек по параметрам начальных дефектов можно через коэффициент технологической поврежденности  $K_p$  по методике, позволяющей определить суммарную длину трещин на фиксированной площади поверхности. Опыты показали, что значения  $K_p$  структурных ячеек различных параметров могут отличаться до 3,5 раз.

Для определения индивидуального влияния способов укладки заполнителей, их взаимного ориентирования и состояния поверхности на поврежденность матричного материала исследования проводили на моделях структурных ячеек. Результаты показали, что при кубической упаковке заполнителей значения  $K_p$  изменялись до 2 раз, при гексагональной укладке – до 2,5 раз, а при различном состоянии поверхности заполнителей – до 40%.

Следует отметить, что состояние поверхности и тип упаковки имитаторов заполнителей в виде цилиндров практически не вызвали изменение поврежденности образцов, в отличие от имитаторов в виде призм. Это указывает на активное участие рельефа поверхности заполнителей в формировании градиентов локальных деформаций, что способствует структурному усложнению всей системы.

Изменение поврежденности матричного материала в структурных ячейках свидетельствует об определяющем влиянии их параметров на кинетику процессов структурообразования бетона на микроуровне. Начальные условия должны отразиться на периодах организации микроструктуры и величине объемных деформаций твердеющей матрицы вследствие изменения форм и размеров составляющих ее подструктур. Исследования на моделях структурных ячеек показали, что при различных типах укладки заполнителей сроки схватывания матричного материала изменяются в среднем на 2 часа, при изменении состояния поверхности заполнителей – на 1,5 часа (рис. 2, а). Было определено, что в разных зонах одной структурной ячейки периоды формирования матричного материала могут отличаться до 30-45 минут. Изменение

величины объемных деформаций в зависимости от параметров ячеек составило в среднем 45%.

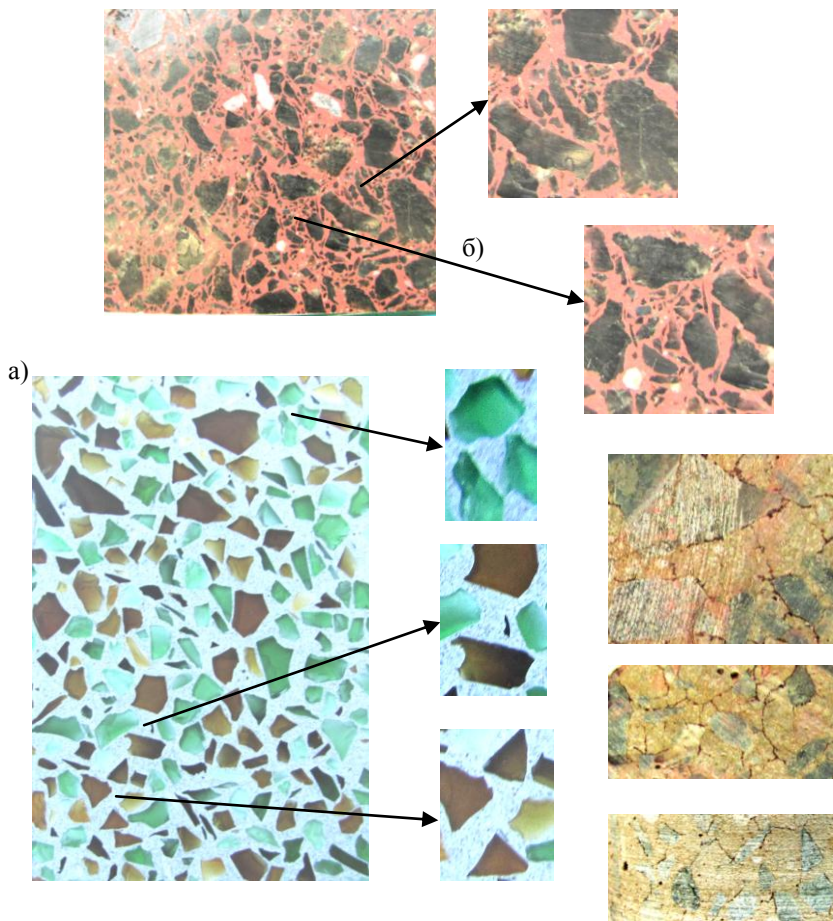


Рис. 1. Структурное разнообразие бетона как подсистемы строительной конструкции:

- а – структурные ячейки на уровне макроструктуры;
- б – иерархия строения макроструктуры по принципу самоподобия;
- в – влияние параметров структурных ячеек на сети трещин и внутренних поверхностей раздела

Анализ полученных результатов показал, что одни и те же свойства в различных объемах твердеющей матрицы количественно проявляют себя сугубо индивидуально, что позволяет говорить о неповторимости организации структуры бетона на макроуровне при переходе от одной структурной ячейки к другой. Исключительность локальных условий начального формирования макроструктуры должна отразиться общей гетерогенности всего материала и его способности противостоять разрушающим нагрузкам.

Опыты показали (рис. 2, б), что характер разрушения моделей образцов бетона уникален для каждого принятого типа упаковки заполнителей, способа их ориентирования и соотношения адгезионно-когезионных сил связи на границах раздела между ними и матрицей. В зависимости от расположения заполнителей прочность образцов на сжатие может изменяться до 2 раз, в зависимости от укладки – до 45%; при изменении состояния поверхности заполнителей – до 27%.

Экспериментальные исследования подтверждают избирательность формирования и проявления свойств в отдельных объемах структуры бетона, как на уровне неоднородности «матричный материал - заполнители», так и на уровне «частицы вяжущего – дисперсионная среда». Это свидетельствует о том, что разнообразие структурного оформления материала определяет возможности его функционального потенциала в период работы в конструкциях.

### ***Выводы***

Проведенный анализ позволяет заключить, что отличительной особенностью сложносоставленной структуры бетона как подсистемы строительной конструкции является разнообразие пространственно-геометрических форм и соотношений сил связи на границах раздела между отдельными составляющими различных уровней структурных неоднородностей. На уровне макроструктуры к таким формам можно отнести структурные ячейки, образованные группами заполнителей в матричном материале. Способы укладки и взаимное ориентирование заполнителей, расстояния между ними и их различное сочетание по состоянию поверхности определяют состав, конфигурацию и размеры ячеек. Все ячейки в силу индивидуальности их параметров проявляют себя как самостоятельные элементы макроструктуры, но вместе с тем они являются ее подсистемами как некой системной целостности. Это предопределяет взаимообусловленность и неповторимость локальной и интегральной структурной организации макроуровня. Уникальность оформления структурных ячеек инициирует разнообразие параметров

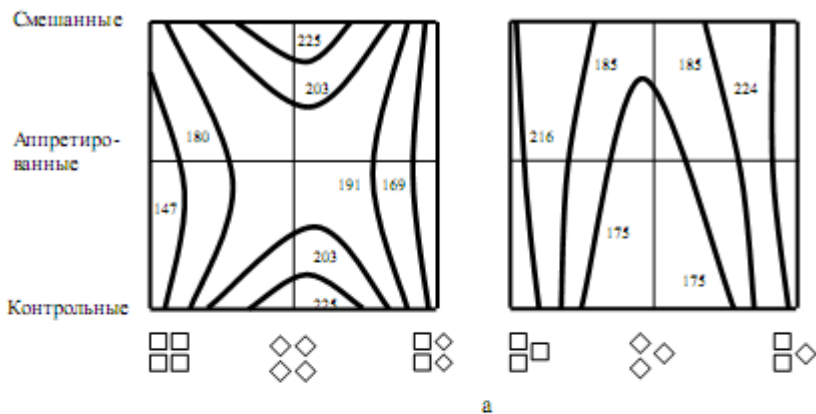
новых элементов макроструктуры в виде сетей трещин и внутренних поверхностей раздела, что повышает стойкость всего материала при действии разрушающих нагрузок. Это подтверждается изменением коэффициента поврежденности образцов в зависимости от форм ячеек до 3,5 раз и повышением их прочности на сжатие до 2 раз. Таким образом, структурное разнообразие составляющих структуры бетона следует признать необходимым условием надежной работы материала в конструкциях.

## SUMMARY

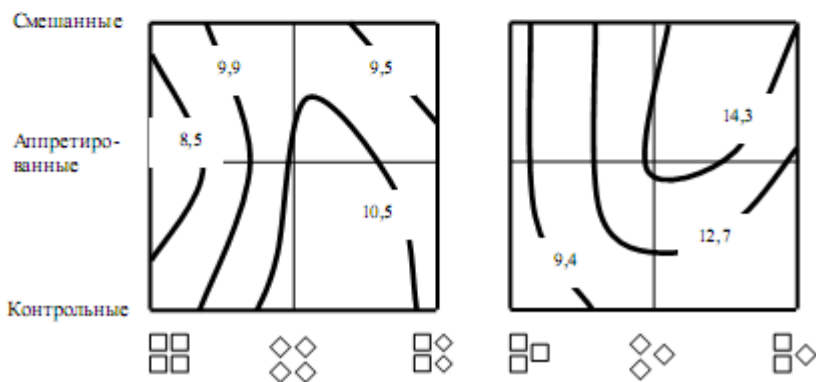
**The analysis of a variety of a macrostructure of concrete and identity of occurrence of its properties in local volumes is presented in paper. Structural complexity of components of structure of concrete it is necessary to recognize as an important condition of reliable work of material in constructions.**

## *Литература*

9. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. – 169с.
10. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / Прангишвили И.В. – М.: «Синтег», 2000. – 519 с.
11. Композиционные строительные материалы и конструкции сниженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
12. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Мандельброт Б. – М.: ИКИ, 2002. – 656 с.
13. Тофанило В.Ю. Роль собственных деформаций в обеспечении работы конструкций / В.Ю. Тофанило, О.А. Коробко, В.Н. Выровой // Вісник ОДАБА. – 2014. – Вип.54. – С. 370-376.



а



б

Рис.2. Влияние параметров макроструктуры на свойства бетона:  
 а – начало схватывания матричного материала в структурных ячейках, мин; б – прочность моделей образцов с различными параметрами структурных ячеек, (МПа).