

## РОЛЬ МИКРОСТРУКТУРЫ В ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БЕТОНА

**Коробко О.А., к.т.н., доц., Выровой В.Н., д.т.н., проф.**

*Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, Украина*

### **Введение**

Бетоны можно представить как гетерогенные многофазные сложно-организованные материалы полиструктурного строения с характерными уровнями структурных неоднородностей, под которыми понимают отдельные объемы сложной системы, взаимодействующие через границы раздела и качественно отличающиеся по механизмам структурообразования [1, 2]. В данной работе для анализа выделены неоднородности на уровне «заполнители – матричный материал» (макроструктура), на уровне частиц вяжущего (микроструктура) и на уровне продуктов новообразований (наноструктура). Каждый уровень включает индивидуальный набор составляющих их элементов, одни из которых закладываются в период подготовки и формирования бетонной смеси, а условия возникновения и развития других определяются особенностями организации и взаимодействия подструктур на тех или иных этапах и уровнях структурообразования материала. Исходя из представления бетона как полиструктурного материала с выделением отдельных уровней неоднородностей его структуры и учетом отличия их структурных элементов по виду, размерам, составу, конфигурации и прочим характеристикам, можно предположить, что изменение начальных характеристик структурной организации одного уровня вызовет направленные изменения условий организации и параметров образующихся структурных элементов других уровней. Это, в свою очередь, должно привести к изменению исходных подструктур и отразиться на параметрах их новых структурных составляющих. По нашему мнению, основополагающее значение при формировании общей структуры бетона имеют процессы и явления, протекающие на микроуровне его структурной организации, задавая начальные условия образования наноструктур и инициируя преобразования макроуровня. Поэтому была поставлена задача исследований – проанализировать роль микроструктуры в организации интегральной структуры бетона с учетом взаимовлиянии уровней структурных неоднородностей.

### **Выбор модели микроструктуры бетона.**

Для решения поставленной задачи была принята модель микроструктуры бетона как полиминеральной гетерогенной высококонцентрированной грубодисперсной лиофобной системы с лиофильной границей раздела фаз [2] при следующих предположениях. В составе вяжущего обеспечено сосуществование моно- и полиминеральных частиц различной дисперсности. Это связано с особенностями разрушения гранул клинкера при помоле [3], при которых возможно высвобождение в качестве самостоятельных зерен как отдельных кристаллов клинкерных минералов, так и их разнообразных совокупностей. Каждая частица дисперсной фазы находится в силовых полях соседних частиц на расстояниях дальней или ближней коагуляции [4], что обусловлено их высокой концентрацией в объеме системы. Силы взаимодействия между зёрнами вяжущего, относящихся в силу своих размеров и массы к грубодисперсным частицам, больше или равны силе их тяжести. Организация микроструктуры происходит путем самопроизвольного распределения дисперсных частиц по кластерным структурам под влиянием неуравновешенных сил межчастичных взаимодействий при одновременном протекании физико-химических процессов и явлений с модификацией поверхностей раздела фаз.

Микроструктура бетона, согласно [5, 6], может быть представлена в качестве сложной самоорганизующейся (динамичной) открытой системы. Сложность микроструктуры бетона обеспечивается как многообразием составляющих ее компонентов, так и образованием сложной совокупности отдельных, но взаимосвязанных подсистем, через сложные взаимодействия которых проявляются свойства самой микроструктуры как целостности и определяются условия развития макро- и наноразмерной структуры бетона. Открытость микроструктуры предполагает возможность постоянного обмена веществом, энергией и информацией ее собственных отдельных подсистем и их структурных элементов с подструктурами других уровней неоднородностей бетона. Динамичность микроструктуры как системы, в которой развитие последующих состояний предопределяется начальными условиями, проявляется в способности спонтанно осуществлять структурные изменения под влиянием внутрисистемных процессов и внешних воздействий.

Предлагаемая модель микроструктуры позволяет проанализировать механизмы ее организации с выделением отличительных структурных элементов и оценить взаимовлияние параметров различных уровней неоднородностей бетона.

## **Выделение структурных параметров микроструктуры бетона и их взаимосвязь с параметрами макро- и наноуровней.**

Движущей силой начальной организации микроструктуры бетона является спонтанное стремление термодинамически неравновесной системы к снижению избыточной поверхностной энергии, наличие которой обусловлено образованием развитой поверхности раздела между отдельными частицами дисперсной фазы или между ними и дисперсионной средой [2, 4]. Результатом является уменьшение площади (в лиофобных системах) и поверхностного натяжения (в лиофильных системах) межчастичных и межфазной границ раздела, соответственно. Это достигается путем самонаправленного объединения первично разупорядоченных в дисперсионной среде частиц дисперсной фазы в периодически организованные структурные агрегаты (кластеры) и лиофилизации их поверхности.

В принятой модели микроструктура бетона представлена как дисперсная система [7]. Это предполагает, что физико-механические процессы имеют доминирующее значение при структурообразовании микроуровня, предопределяя условия и кинетику протекания реакций гидратации. Физико-механические особенности формирования микроструктуры проявляются в неуравновешенных межчастичных взаимодействиях в зависимости от соотношения размеров частиц дисперсной фазы, расстояний между ними и их природы [2, 8]. При этом возможно образование определенного набора отдельных, но взаимосвязанных подсистем. Потенциально вероятные формы организации кластерных структур задаются как собственными функциями сложной системы, так и внешними воздействиями, что обусловлено представлением микроструктуры как открытой системы. Под внешними воздействиями предлагается понимать параметры макроструктуры бетона, изменение которых может выступать управляющим фактором направленной организации микроструктуры. Это допустимо в том случае, когда микроструктура бетона рассматривается уже в качестве структурной составляющей макроуровня, представляемого неоднородностью «заполнителя – матричный материал».

К внутренним структурообразующим факторам, направляющим формирование микроструктуры, следует отнести степень наполнения, дисперсность и природу частиц вяжущего [2]. Рациональный подбор качественного и количественного составов вяжущих позволяет посредством обеспечения требуемых условий кластерообразования получать требуемую совокупность кластерных структур заданных параметров.

В качестве структурных параметров микроструктуры бетона можно выделить состав структурных агрегатов, их размеры, конфигурацию,

компактность, ориентирование и типы межчастичных контактов. Составы кластерных структур отличаются большим многообразием вследствие полиминеральности и полидисперсности исходных зерен вяжущего. При этом количество флуктуаций вещественного состава в системе регулируется природой взаимодействующих частиц, что связано с проявлением аккомодационного механизма организации структурных блоков [8, 9]. Также начальный состав вяжущего определяет образование структурных блоков разнообразных форм при различной их взаимной ориентации в объеме системы [10].

Влияние внутренних структурообразующих факторов на параметры микроструктуры бетона обусловлено ее представлением как сложной системы. Вместе с тем, задавать начальные условия организации микроуровня как открытой системы можно путем направленного изменения определенных характеристик макроструктуры, выделив их в качестве внешних управляющих факторов.

Макроструктура бетона может быть представлена структурной неоднородностью «заполнители – матричный материал». При этом матрица принимается как целостная неоднородная среда со сложной внутренней организацией, в которой произвольно распределены заполнители – дискретные частицы с размерами, позволяющими им при межфазных взаимодействиях создавать собственные поля деформаций и напряжений. Можно предположить, что таким образом строительные материалы, оформленные в конструкцию или изделие, представляют собой неповторимую совокупность макроструктур с индивидуальными микроструктурами, отличающихся уникальным составом и строением, а также природой и геометрией внешних границ.

Внешние пространственные, физические и объемные параметры микроструктур макроуровней бетона определяются видом упаковки заполнителей, их поверхностной активностью, расстояниями между ними и соотношением адгезионно-когезионных сил связи на границах раздела между заполнителями и вяжущим. Опыты с использованием физических моделей макроструктуры бетона как содружества структурных ячеек показали, что размеры, форму, компактность и распределение структурных составляющих микроструктур можно задавать, целенаправленно назначая параметры макроуровня [11].

Микроструктура как открытая система не только воспринимает воздействия других уровней структурных неоднородностей бетона, но и сама оказывает влияние на них. Для анализа предположим, что микроструктура является составной частью макроструктуры бетона, представляемой в виде набора структурных ячеек, под которыми понимают отдельные части матричного материала, окруженные группой заполни-

телей с различными расстояниями и ориентированием друг относительно друга [12]. Матрица (микроструктура) принимается как неоднородная анизотропная среда, организованная уникальным содружеством кластерных структур, неповторимых по составу, размерам и распределению образующих их частиц, и включающая в себя в качестве структурной составляющей – наноструктуру, представленную неоднородностью «частицы вяжущего – продукты новообразований».

Организация структуры наноуровня осуществляется в результате проявления термофлуктуационных эффектов перемещения ионов с возникновением стабильных зародышей новой фазы, участвующих как в формировании упорядоченных кристаллических новообразований, так и гелевидной составляющей, которую представляют в виде взвеси субмикрорекристаллов [13]. Концентрация ионов новой фазы различного вида, образующихся при растворении клинкерных минералов, зависит от распределения исходных частиц вяжущего по составу и размерам в кластерных структурах микроуровня, а также распределения самих кластеров в объеме микроструктуры. Это позволяет предположить, что условия организации и параметры структуры бетона на наноуровне должны определяться характеристиками микроуровня, от которых будут зависеть вид и количественное соотношение кристаллических и аморфных гидратов; состав, размеры, конфигурация, количество и распределение нанокластеров – блоков из продуктов новообразований, не задействованных в образовании кристаллических сростков; тип аморфной структуры гелевидной составляющей, а, значит и ее поведенческие особенности как содружества взаимосвязанных подструктур с аномально высокими поверхностными свойствами, и др.

Флуктуации вещественного состава на микроуровне предполагают индивидуальные условия протекания физико-химических процессов в наноструктуре, что предопределяет градиенты объемных деформаций ( $\Delta V$ ), возникающих в твердеющем материале. Проявление деформационных процессов изменения объема реагентов при межфазных взаимодействиях отражается на структурообразовании микроуровня и служит причиной инициации последующих физико-механических процессов и явлений организации его структуры. Это сопровождается возникновением градиентов собственных деформаций микроуровня, что возвратной волной влияет на условия формирования наноструктуры, определяя кинетику физико-химических процессов в ее объемах через локальные изменения плотности с возбуждением новых деформационных волн, вызывающих очередную виток структурных преобразований микроуровня и, как следствие, ответную волну объемных деформаций на уровень, который их инициировал.

В силу соподчиненности взаимодействия уровней структурных неоднородностей бетона можно предположить, что периодические изменения объема микроструктуры, обусловленные возвратными деформационными процессами на наноуровне, будут предопределять структурообразование макроструктуры и параметры ее структурных составляющих.

Микроструктура, выступающая в качестве матричного материала при организации структуры макроуровня, осуществляемой, по мнению [12], за счет взаимодействия матрицы и заполнителей, представлена как сложная система. Это означает, что условия структурообразования бетона на макроуровне будут определяться не только геометрическими особенностями макроструктуры как набора структурных ячеек, рельефом заполнителей, соотношением величин когезии и адгезии матрицы к поверхности включений, но и структурной организацией микроуровня с учетом уникальности состава и строения его локальных объемов, определяемых параметрами как самой микроструктуры, так и характеристиками макроуровня.

Результатом структурообразования макроструктуры является зарождение и развитие несплошностей в твердеющем матричном материале, способных трансформироваться во внутренние поверхности раздела или технологические трещины, а также трещин сцепления на границах раздела между заполнителями и матрицей и полей остаточных напряжений, причиной возникновения, роста или преобразования которых служат градиенты локальных и интегральных объемных деформаций [2]. Проявление градиентов  $\Delta V$  определяется взаимовлиянием деформационных процессов на всех уровнях неоднородностей бетона, спровоцированных начальными этапами их структурообразования с организацией межкластерных поверхностей раздела различного вида и масштабного уровня как источников зарождения и путей развития технологических трещин.

Начальный этап проявления объемных деформаций реализуется на уровне наноструктуры, параметры которой, заданные микроуровнем, определяют вероятность образования границ раздела со значительной поверхностью и их рост. При выходе объемных изменений на уровень микроструктуры обеспечивается развитие еще более значительных площадей поверхностей раздела, которые, являясь составной частью макроструктуры, предопределяют условия протекания ее собственных объемных деформаций в матричном материале и на границах раздела между матрицей и заполнителями. Организация структуры бетона происходит поэтапно, с развитием во времени, что позволяет предположить ответные воздействия изменения объема и параметров структур-

ных составляющих макроуровня на физико-механические процессы формирования микроструктуры. Это, в свою очередь, должно отразиться на условиях межфазных взаимодействий наноуровня и, тем самым, вызвать отдачу проявления деформационных волн с возвратным переходом на более высокие масштабные уровни.

Таким образом, взаимовлияние выделенных неоднородностей бетонов обеспечивает возможность управления процессами и явлениями формирования их структуры на различных уровнях ее организации для получения материалов с заданными структурными параметрами и требуемым уровнем свойств.

### ***Выводы***

Проведенный анализ позволяет заключить, что:

1. Бетоны представляют собой сложноорганизованные материалы полиструктурного строения с характерными макро-, микро- и наноуровнями структурных неоднородностей. Каждая неоднородность выделяется индивидуальностью состава и строения, что обусловлено качественно отличными механизмами организации их структуры вследствие различия исходных компонентов по размерам. В результате на всех уровнях происходит образование собственного уникального набора отдельных, но взаимосвязанных подструктур с неповторимым распределением составных элементов, взаимодействующих через границы раздела как друг с другом, так и подструктурами других уровней. Это предполагает возможность обеспечения направленного взаимовлияния различных уровней структурных неоднородностей для обеспечения требуемых параметров интегральной структуры бетонов.

2. При структурообразовании бетонов как сложносоставленных материалов доминирующее значение имеет неоднородность на уровне микроструктуры как открытая сложная динамичная система в силу ее взаимосвязи с другими уровнями неоднородностей, многообразия состава и строения, способности к самопроизвольным структурным перестройкам под влиянием внешних и внутренних факторов. Условия организации микроуровня определяются их начальным составом и определенными характеристиками макроструктуры. В свою очередь, микроуровень инициирует образование необходимых структур на уровне продуктов новообразований, вызывая проявление объемных деформаций, возвратные волны которых через изменение условий организации микроструктуры определяют формирование макроуровня и параметры его структурных составляющих.

## Summary

**It has been shown formation of integrated structure of concrete at interference of various levels structural heterogeneities in view of the organization of a microstructure as open complex dynamical system.**

## *Литература*

1. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. Бетон в условиях ударных воздействий. – Одесса: Внешрекламсервис, 2004. – 270с.
2. Композиционные строительные материалы и конструкции сниженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. – К.: Будівельник, 1991. – 144с.
3. Теория цемента / Под ред. А. А. Пащенко. – К.: Будівельник, 1991. – 167с.
4. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1982. – 400с.
5. Хакен Г. Синергетика: иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах. – М.: Мир, 1985. – 423с.
6. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: «Синтег», 2000. – 519с.
7. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320с.
8. Коробко О.А., Выровой В.Н., Виноградский В.М., Дорофеев А.В. Анализ механизмов организации структуры цементных композиций как полиминеральных и полидисперсных систем // Вестник ОГАСА. – Одесса: Изд-во «Город мастеров». – 2006. – Вып.24. – С.144-150.
9. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 312с.
10. Выровой В.Н., Герега А.Н., Коробко О.А. Направленная организация и анализ структуры полимерсодержащих композитов // Вісник ДонНАБА «Сучасні будівельні матеріали». – Вип. 2010 – 1 (81). – Макіївка: Вид-во ДонНАБА. – 2010 – С. 250-257.
11. Хотынюк Е.И. Коробко О.А. Эффективные способы направленной организации структуры бетонов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві» – Одеса: Вид-во ОДАБА. – 2012. – С.156-160.
12. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. – Одеса: Вид-во «ТЕС», 2010. - 169с.
13. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высш. шк., 1989. – 384с.