

## БЕТОН КАК САМОРАЗВИВАЮЩАЯСЯ СИСТЕМА

**Коробко О.А.**, к.т.н., доц., **Выровой В.Н.**, д.т.н., проф.,  
**Суханов В.Г.**, к.т.н., доц., **Тофанило В.Ю.**, аспирант

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
Украина*

### **Введение**

Строительные конструкции могут быть представлены как сложные самоорганизующиеся системы, что предполагает их существование в виде совокупности взаимосвязанных подсистем [1]. Вместе с этим, строительные конструкции можно представить в виде материала определенной геометрической формы, очертание внешней границы которого как целостного объекта задается одновременно с началом его структурообразования. Конструктивные особенности строительных изделий в значительной мере определяют параметры их структуры и изменение свойств [2]. Это позволяет предположить, что внешняя граница конструкций является активным участником ее структурной организации как системы в качестве одного из элементов.

При декомпозиции строительной конструкции как системы можно выделить определенные подсистемы, обеспечивающие ее целостность и выполнение функций [3]. В виде одной из подсистем, оказывающей определяющее влияние на организацию интегральной структуры конструкций, может быть представлен бетон, сложность структурного оформления которого позволяет рассматривать его как систему, включающую определенный набор собственных подсистем. Учитывая полиструктурность строения бетона [4], в качестве подсистем можно выделить его структурные неоднородности [5], которые представляют собой отдельные объемы системы, различающиеся по механизмам структурообразования и взаимодействующие через границы раздела.

Формирование структуры бетона как подсистемы происходит в пределах внешней границы строительной конструкции, определяясь ее конфигурацией. При этом все структурные составляющие бетона динамически связаны в сеть непрерывных взаимодействий, которая их создает и ими же производится, включая в процесс своей реализации границы уровней его неоднородностей. Это позволяет предположить особый порядок организации структуры бетона, осуществляемый по принципу аутопоэза [6]. Исходя из этого, была определена задача –

проанализировать генезис структуры бетона как саморазвивающейся системы.

### **Выбор моделей структурных неоднородностей бетона**

Для решения поставленной задачи были выделены структурные неоднородности бетона на уровне «заполнители – матричный материал» (макроструктура), уровне частиц вяжущего (микроструктура) и уровне продуктов новообразований (наноструктура) при некоторых допущениях и предположениях.

Макроструктура бетона была представлена как грубогетерогенная система, состоящая из матрицы, в которой определенным образом распределены заполнители. Размеры заполнителей позволяют им при межфазных взаимодействиях создавать собственные поля деформаций и напряжений. Матричный материал принимается как неоднородная среда со сложной внутренней организацией, проявляющая себя как единое целое. Формирование структуры макроуровня осуществляется путем взаимодействия матрицы с заполнителями [7].

Микроструктуру бетона можно представить неоднородностью типа «частицы дисперсной фазы – дисперсионная среда» в виде многофазной гетерогенной высококонцентрированной лиофобной системы с лиофильной границей раздела фаз [5, 8]. Организация структуры микроуровня осуществляется путем самопроизвольного распределения дисперсных частиц по упорядоченным структурным агрегатам при одновременной модификации межфазных поверхностей раздела. В результате образуется совокупность кластерных структур как уникальных содружеств с неповторимым набором элементов, находящихся между собой во взаимоотношениях и взаимодействиях [9]. Микроструктура является подсистемой макроструктуры, что предполагает образование ее внешних границ поверхностями раздела между заполнителями и матричным материалом.

Наноструктура бетона может быть представлена уровнями структурных неоднородностей типа «продукты новообразований – дисперсионная среда» и «продукты новообразований – частицы дисперсной фазы» [5]. Структурообразование наноуровня происходит в результате термофлуктуационных эффектов перемещения ионов с возникновением стабильных зародышей новой фазы, участвующих в формировании как кристаллических образований, так и гелевидной составляющей [10, 11, 12]. Наноструктура в качестве подсистемы включена в состав микроструктуры, поэтому ее внешними границами как структурной неоднородности будут выступать межчастичные и межкластерные поверхности раздела.

Заполнители в бетонной смеси располагаются по отношению друг к другу в произвольной ориентации и на различных расстояниях. При этом группы заполнителей и заключенный между ними матричный материал образуют структурные ячейки, которые отличаются между собой: - формой, определяемой способами укладки заполнителей; - размерами, которые зависят от расстояний между включениями; - соотношениями адгезионно-когезионных сил связи на границах раздела между матрицей и заполнителями [3]. Можно предположить, что материал, оформленный в конструкцию, представляет собой совокупность уникальных макроструктур с различными физическими, геометрическими и пространственными характеристиками. При этом в зависимости от конфигурации внешняя граница конструкции как ее целостности определяет спектр возможных форм макроструктурных составляющих бетона.

Микроструктура является составной частью макроуровня и в качестве матрицы входит в состав структурных ячеек, что предполагает влияние их параметров на формирование ее внешних границ. В свою очередь, от состояния и морфологии внешней границы микроструктурной неоднородности зависят условия организации как ее собственной структуры, так и структуры наноуровня.

Таким образом, структура бетона как подсистема строительной конструкции представляет собой определенную иерархию уровней структурных неоднородностей, которые выступают подсистемами для самого бетона, но системами для своих структурных составляющих. Взаимодействие и организация уровней происходит посредством их внешних и внутренних поверхностей раздела вследствие проявления на них объемных деформационных процессов. При этом уровни сами формируют свои границы в процессе собственной организации, тем самым определяя динамику ее реализации. Внешние границы одних уровней являются внутренними границами неоднородностей, в состав которых они включены [5].

### **Взаимообусловленность структурных трансформаций бетона как саморазвивающейся системы**

Согласно положениям работ У. Матураны и Ф. Варелы, анализ систем, структурообразование которых осуществляется в результате саморазвития при участии границ, определяющих их целостность, может проводиться с применением концепций теории аутопоэза. Под термином «аутопоэзис» [6] понимается процесс самосозидания, самостроения. Такое представление предполагает, что организация аутопоэзных систем происходит путем развития нелинейных сетей

взаимоотношений на некотором множестве элементов. При подобном способе структурообразования систем компоненты сети постоянно порождают и преобразуют друг друга, реализуя сеть процессов, которые их производят. Отличительной особенностью аутопоэзной сети является создание границы этой сети как активного компонента, участвующего в ее реализации, обозначающего сферу операций сети и определяющего ее как единое целое.

Представление бетона как аутопоэзной системы исключает жесткое подчинение одних его составных частей другим. Все подсистемы бетона сосуществуют в общей согласованности взаимодействий.

В работе показано [13], что формирование общей структуры бетона во многом определяется взаимовлиянием уровней структурных неоднородностей бетона. Это проявляется в том, что изменение параметров одного уровня отражается на условиях организации структуры других уровней с изменением параметров их структурных составляющих. Реализованные изменения служат причиной изменения уже исходных структур, что провоцирует дальнейшую взаимную инициацию структурообразования различных уровней. Участие каждого уровня неоднородностей и его отдельных составных частей в структурной организации друг друга является характерным признаком аутопоэзных систем.

Сосуществование внешних границ предполагает организационную замкнутость (автономность) [6] структурных неоднородностей бетона как систем, что предполагает не прямые (возмущающие) воздействия при их взаимовлиянии. Каждый из уровней может лишь инициировать структурные изменения других уровней, но не управлять ими. При этом неоднородности реагируют на внешние влияния определенными преобразованиями своего структурного оформления только исходя из внутренних возможностей. Обусловленность структурообразования уровней собственным структурным потенциалом позволяет им самостоятельно организовывать себя, используя неспецифическую активацию своего окружения, с которым они находятся в отношениях взаимной причинности.

При формировании интегральной структуры бетона как сложноорганизованной системы доминирующее положение занимают процессы и явления, которые протекают на уровне частиц вяжущего. Это связано с тем, что организация микроструктуры инициирует все последующие структурные преобразования бетона на всех уровнях неоднородностей.

Структурообразование микроуровня происходит в соответствии с характерными особенностями организации аутопоэзных систем, что

обусловлено его автономностью как определенной целостности, а также присущими ему свойствами инактивации и итерации.

Понятие инактивации предполагает, что побуждение (толчок) к началу организации системы исходит не от внешних воздействий, а провоцируется внутренними причинами. Для микроструктуры такой причиной служит ее стремление вследствие неравновесного состояния к снижению избыточной поверхностной энергии. Свойство итерации проявляется в незамкнутости цикла организации микроструктуры, в постоянном его самообновлении и самодополнении, что позволяет выстраивать новые уровни структурной сложности системы. Исходя из этого, можно выделить процессы кластерообразования на микроуровне в качестве основополагающих, предопределяющих как организацию самой микроструктуры, так и формирование интегральной структуры бетона.

Физико-механические особенности самоорганизации микроуровня проявляются в неуравновешенных межчастичных взаимодействиях в зависимости от соотношения размеров частиц дисперсной фазы, расстояний между ними и их природы [8, 14]. При этом происходит образование определенного набора отдельных, но взаимосвязанных подсистем. Потенциально вероятные формы организации кластерных структур задаются внутренними характеристиками микроструктуры, включая состояние и форму ее внешних границ, лишь в начальный период определяемых параметрами структурных ячеек макроуровня.

Межчастичные и межкластерные взаимодействия проявляются как не прямые воздействия, оказываемые частицами или кластерами друг на друга, избирательно реагируя на источник волнения. Свобода откликов на возмущающие воздействия заложена в самой аутопоэзной сети и диктуется параметрами ее составляющих. Это позволяет предположить, что микроструктура как автономная система самостоятельно регулирует флуктуации вещественного состава, предопределяя индивидуальные условия протекания физико-химических процессов своей организации.

Процессы и явления гидратации вяжущего провоцируют появление достаточного количества ионов новой фазы, самопроизвольное перераспределение которых по поверхности дисперсных частиц и в объеме жидкой фазы инициирует организацию новой структурной неоднородности бетона на уровне продуктов новообразований. Нанометрический размер гидратных веществ позволяет представить новую неоднородность как наноструктуру с характерными для нее механизмами структурообразования и совокупностью подструктур (стабильных структурных образований – нанокластеров). Учитывая,

что наноструктура является составной частью микроуровня, можно предположить, что ее внешними границами как целостности будут выступать межчастичные и межкластерные поверхности раздела. Существование внешних границ и протекание в их пределах и непосредственном участии процессов и явлений самовоспроизводства собственных компонентов обуславливает аутопознную организацию наноуровня структурных неоднородностей бетона.

Межфазные взаимодействия, протекающие в наноструктуре, сопровождаются проявлением градиентов объемных деформаций, вызывающих формоизменение ее внешних границ как системы. Это провоцирует изменение условий реализации последующих обменных реакций и процессов организации нанокластеров, что отражается на их структурных формах и распределении в объеме наноуровня, определяя изменение параметров внутренних границ раздела наноструктуры. Этим инициируется новая волна деформаций с формоизменением внешних поверхностей системы и, как следствие, очередной виток структурных преобразований.

В силу иерархической соподчиненности уровней структурных неоднородностей бетона, внешние границы наноструктуры являются структурными составляющими микроуровня, что предполагает их активное участие в процессах его организации. Градиенты объемных деформаций при выходе на уровень микроструктуры влияют на условия продолжающих спонтанно реализовывать себя межчастичных и межкластерных взаимодействий и, тем самым, определяют кинетику дальнейшего структурообразования наноуровня и проявления в нем объемных деформационных процессов. Таким образом, происходит взаимная инициация возвратных волн перехода объемных деформаций с уровня на уровень, что позволяет структурным неоднородностям бетона создавать себя в виде определенных целостностей.

Градиенты объемных деформаций, проявляющиеся на внутренних поверхностях раздела микроструктуры, определяют организацию ее структуры как подсистемы (матрицы) макроуровня. Неаддитивная передача деформаций на внешние границы твердеющего матричного материала ведет к самопроизвольному формоизменению поверхностей раздела между матрицей и заполнителями, уникальному для каждой структурной ячейки в зависимости от ее параметров. Индивидуальное распределение градиентов деформаций на внешних для матричного материала границах инициирует формирование неповторимой возвратной волны деформационных воздействий на уровни микро- и наноструктур, вызывая взаимообусловленные отклики их структурных

трансформаций. Это приводит к перераспределению деформаций и их градиентов в макроструктуре.

Результаты взаимовлияния процессов структурообразования всех неоднородностей бетона как подсистемы строительной конструкции определяют организацию ее структуры как системы. При этом следует учитывать, что реализованные структурные особенности уровней были предопределены заданной формой конструкции. Градиенты локальных и интегральных объемных деформаций бетона, проявляясь на внешних границах конструкции, ведут к изменению плотности материала и, тем самым, формируют поля остаточных напряжений. Это предполагает, что организация структуры, как отдельных уровней неоднородностей бетона, так и самой конструкции, будет происходить под постоянным действием формирующихся полей их собственных деформаций. Кроме того, объемные изменения провоцируют возникновение и развитие на всех уровнях неоднородностей различных несплошностей, которые в качестве новых элементов автоматически включаются в организацию их структуры, участвуя в проявлении и перераспределении градиентов объемных деформаций. При этом возникают предпосылки для самозарождения и роста таких структурных составляющих бетона как технологические трещины и внутренние поверхности раздела, которые совокупно с остаточными напряжениями определяют гетерогенность материала конструкции, а, значит, и безопасность ее эксплуатации.

### ***Выводы***

Проведенный анализ позволяет заключить, что:

1. Строительная конструкция может быть представлена в виде определенной целостности, в которую в качестве равноправных составляющих входят как сама конструкция, так и материал, из которого она изготовлена. Это предполагает, что все особенности структурного оформления материала становятся неотъемлемой частью структуры конструкции.

2. Бетон как подсистема строительной конструкции представляет собой сложноорганизованную систему полиструктурного строения с характерными уровнями структурных неоднородностей. Каждый уровень отличается индивидуальной структурной организацией и может быть представлен как уникальная совокупность подструктур с неповторимым сочетанием структурных элементов.

3. Структурообразование уровней неоднородностей происходит в результате взаимной инициации формирования их подструктур. Это позволяет представить бетон как саморазвивающуюся систему, организация структуры которой предопределяется участием всех его структурных составляющих, включая границы уровней как целого, в реализации сети процессов, которые обеспечивают их генезис.

### **Summary**

**This article presents an analysis of genesis of structure of concrete as a self-sustaining system at interference of various levels of its structural heterogeneities using conceptions of the theory autopoiesis.**

### *Литература*

1. Выровой В.Н. Строительные изделия и конструкции как открытые сложные самоорганизующиеся системы / Выровой В.Н., Коробко О.А., Суханов В.Г., Пархоменко Р.В. // Сборник статей по материалам 7-й международной науч. конф. – Воронеж: ВГАСУ. – 2013. – Т.1. – С.107-115.

2. Выровой В.Н. Влияние формы изделия на изменение свойств материала. / В.Н. Выровой, А.С. Чернега, А.В. Елькин, В.Г. Суханов, Т.В. Острая // Вісник ОДАБА. – Одеса: Вид-во «Зовнішрекламсервіс». – 2012. – Вип.46. – С.158-164.

3. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Монография / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. – 169с.

4. Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Монография / Соломатов В.И., Выровой В.Н., Бобрышев А.Н. и др. – Ташкент: ФАН, 1991. 345с.

5. Соломатов В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Монография / Соломатов



В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. – К.: Будівельник, 19991. – 144с.

6. Матурана У. Древо познания: Биологические корни человеческого понимания. Монография / Матурана У., Варела Ф. – М.: Изд-во «Прогресс - Традиция», 2001. – 224с.

7. Выровой В.Н. Бетон в условиях ударных воздействий. Монография / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. – Одесса: Изд-во «Внешрекламсервис», 2004. – 270с.

8. Урьев Н.Б. Высококонтрированные дисперсные системы. Монография / Урьев Н.Б. – М.: Химия, 1980. – 320с.

9. Соломатов В.И. Кластерообразование композиционных строительных материалов / Соломатов В.И., Выровой В.Н. // Технологическая механика бетона. – Рига: РПИ, 1985. – С.5-21.

10. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. Монография / Дельмон Б. – М.: Мир, 1972. – 554с.

11. Будников П.П. Реакция в смесях твердых веществ. Монография / Будников П.П., Гистлинг А.М. – М.: Стройиздат, 1971. – 488с.

12. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Под ред. Л.Г. Шпыновой. – Львов: Вища школа, 1981. – 160с.

13. Коробко О.А. Роль микроструктуры в организации интегральной структуры бетона / Коробко О.А., Выровой В.Н. // Вісник ОДАБА. – Одеса: Вид-во «Зовнішрекламсервіс». – 2012. – Вип.47. – Ч.1. – С.174-181.

14. Соломатов В.И. Интенсивная технология бетона. Монография / Соломатов В.И., Тахиров Н.К., Шахех Шах. – М.: Стройиздат, 1989. – 284с.

