

УДК 666: 519.8

**РОЗВИТОК ВЛАСНИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ПЕРІОД  
ОРГАНІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ БЕТОНУ**

**РАЗВИТИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В  
ПЕРИОД ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ БЕТОНА**

**DEVELOPMENT OWN DEFORMATION PROCESSES IN PERIOD OF  
ORGANIZATION STRUCTURE OF CONCRETE**

**Коробко О.О., к.т.н., доц., Вировой В.М., д.т.н., проф., Тофанило В.Ю.,  
аспірант (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса),  
Пархоменко Р.В., к.т.н., доц. (Львівський державний університет безпечної  
життєдіяльності МНС України, м. Львів)**

**Коробко О.А., к.т.н., доц., Вировой В.Н., д.т.н., проф., Тофанило В.Ю.,  
аспірант (Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Одесса), Пархоменко Р.В., к.т.н., доц. (Львовский государственный  
университет безопасной жизнедеятельности МЧС Украины, г. Львов)**

**Korobko O. A., candidate of technical sciences, docent, Vyrovoy V. N., doctor  
of technical sciences, professor, Tofanilo V.U., post-graduate student (Odessa  
State Academy Civil Engineering and Architecture), Parkhomenko R., V.,  
candidate of technical sciences, docent (Lviv State University Life Safety, Lviv)**

**В статті представлено аналіз розвитку власних деформацій при  
структуруванні бетону як складноорганізованого матеріалу з  
урахуванням взаємовпливу рівнів його структурних неоднорідностей.**

**В статье представлен анализ развития собственных деформаций при  
структурообразовании бетона как сложноорганизованного материала с  
учетом взаимовлияния уровней его структурных неоднородностей.**

**In this article is analyzed development of own deformations during formation  
structure of concrete as complex organized material based on interference of  
levels of its structural heterogeneities.**

**Ключові слова:**

Конструкція, бетон, рівні структурних неоднорідностей, власні деформації.  
Конструкция, бетон, уровни структурных неоднородностей, собственные  
деформации.  
Construction, concrete, levels of structural heterogeneities, own deformations.

### **Введение.**

В работе [1] предложено рассматривать строительные конструкции как системы, что предполагает, помимо других признаков [2], выполнение ими функций в виде сложноорганизованной совокупности взаимосвязанных подсистем. В качестве одной из подсистем можно выделить бетон, который, по мнению проф. Соломатова В.И. и др. [3], является материалом полиструктурного строения. Это позволяет представить бетон как систему, состоящую из определенного содружества собственных подструктур, которыми выступают уровни его структурных неоднородностей.

Представление неоднородностей как подсистем более сложной системы предполагает, что структурные уровни бетона сосуществуют и реализуют себя в общей согласованности взаимодействий. Это позволяет рассматривать интегральную структуру бетона как результат возмущающих воздействий определенных процессов структурообразования его отдельных составных частей, инициирующих их взаимообусловленные структурные изменения. К таким процессам можно отнести собственные деформации бетона.

Источником возникновения деформаций в бетоне являются физико-химические процессы и явления организации его начальной структуры на уровне частиц вяжущего. Объемные изменения передаются на другие уровни неоднородностей, что предопределяет условия их структурного оформления. С выходом градиентов деформаций на уровень конструкции нелинейно изменяются геометрические характеристики ее внешних границ. Тем самым провоцируется возвратная волна деформационных процессов на уровень, который их инициировал, что отражается на дальнейших преобразованиях его структуры, вызывая новый виток проявления объемных деформаций. Это обуславливает необходимость выявления параметров структурных элементов уровней, изменение которых позволяет организовывать структуру бетона путем направленного формирования деформационных потоков. Исходя из этого, была определена задача – проанализировать развитие собственных деформаций при организации структуры бетона как сложноорганизованного материала.

### **Модели структурных неоднородностей бетона.**

Уровни структурных неоднородностей в [4] предлагается различать по механизмам их структурообразования и представлять в виде индивидуальных составляющих бетона. Каждый уровень включает свой комплекс уникальных подсистем с неповторимым набором элементов, находящихся друг с другом в определенных взаимоотношениях и взаимосвязях.

Для анализа были выделены неоднородности структуры бетона на уровне частиц вяжущего (микроструктура), на уровне «заполнители – матричный материал» (макроструктура) и на уровне изделия. При выборе моделей неоднородностей приняты определенные предположения и допущения.

Микроструктура бетона может быть представлена неоднородностью типа «частицы дисперсной фазы – дисперсионная среда» как многофазная гетерогенная высококонцентрированная грубодисперсная лиофобная система с лиофильной границей раздела фаз [4]. В начальный момент организации структуры подобных систем частицы вяжущего произвольно распределяются в дисперсионной среде на расстояниях ближней и дальней коагуляции [5, 6]. Структурообразование микроуровня неоднородностей происходит путем реализации сложного комплекса физико-механических и физико-химических процессов со спонтанной организацией упорядоченных агрегатов из дисперсных частиц и модификацией межфазных поверхностей раздела.

Макроструктуру бетона можно представить как грубогетерогенную систему, состоящую из матрицы, в которой распределены заполнители. Группы заполнителей с заключенной между ними частью матричного материала образуют набор структурных ячеек, неодинаковых по свойствам и параметрам [7]. Это обусловлено тем, что заполнители в матрице располагаются на различных расстояниях и в произвольной ориентации друг к другу, а матричный материал принят как неоднородная среда со сложной внутренней организацией. Вследствие этого, структурные ячейки могут отличаться по размерам, форме и соотношению величин когезии матрицы и ее адгезии к поверхности заполнителей. Представление матричного материала в виде сложноорганизованной системы основано на предположении, что в качестве матрицы выступает микроструктура как составная часть макроуровня в силу принятого полиструктурного строения бетона. Организация макроструктуры происходит путем взаимодействия матричного материала с заполнителями, что позволяет предположить влияние ее параметров на структурообразование микроуровня.

Структура бетона на уровне изделия выделена как целостность, в которую на правах равноправных элементов входят собственно сама конструкция и материал, из которого она изготовлена [1]. Это означает, что структурные особенности материала включены в структуру конструкции. Таким образом, материал, оформленный в конструкцию, можно представить в виде проявляющей себя как единое целое совокупности макроструктур, уникальных по своим характеристикам.

Организация структуры на всех выделенных уровнях неоднородностей сопровождается развитием объемных деформаций, которые инициируются в микроструктуре, участвуют в организации макроструктуры и проявляются на уровне изделия.

#### **Развитие собственных деформационных процессов при организации структуры бетона.**

Принятые предположения и допущения позволяют представить бетон как определенную иерархию уровней его структурных неоднородностей, взаимодействующих через поверхности раздела, на которых проявляются

деформационные процессы. Объемные деформации воспринимаются и передаются через границы раздела уровней, что обеспечивает их взаимообусловленное участие в структурообразовании бетона как сложноорганизованного материала.

При формировании интегральной структуры бетона основополагающими являются процессы и явления, которые реализуются на уровне частиц вяжущего. Это обусловлено тем, что последующие структурные преобразования бетона на всех уровнях неоднородностей зависят от особенностей организации микроструктуры. В свою очередь, начальное структурообразование микроуровня определяется его внутренними характеристиками и параметрами макроструктуры, подсистемой которой он является. При этом доминирующее положение занимают процессы, связанные с распределением дисперсных частиц по периодически организованным структурным агрегатам под влиянием неуравновешенных сил межчастичных взаимодействий [5].

Все частицы объединены сложной паутиной взаимосвязей, проявляющих себя в зависимости от расстояния между ними, их размеров и природы. В результате происходит образование кластеров смешанных и однородных составов, различных форм и размеров, что определяет особенности взаимообусловленного протекания как межкластерных взаимодействий, так и физико-химических процессов организации микроструктуры. Это позволяет предположить индивидуальные условия гидратации частиц вяжущего в локальных объемах микроуровня и возможность их направленного обеспечения путем наведенного действия внутренних и внешних структурообразующих факторов.

Поверхности раздела сначала между отдельными зернами и водой затворения, а затем между поверхностью структурных агрегатов и дисперсионной средой насыщаются продуктами гидратации зерен вяжущего. Частицы новой фазы, в силу своего нанометрического размера, не могут сосуществовать разобрано в среде с себе подобными, и через межчастичные взаимодействия формируют достаточно стабильные соединения – нанокластеры, которые вступают во взаимодействия друг с другом. При этом образуются структуры следующего уровня структурной сложности. Вся совокупность новообразований связана определенного рода отношениями, что позволяет представить новую фазу как наноструктурную неоднородность бетона в виде самоорганизующейся системы с характерными для нее механизмами структурообразования и уникальным набором подструктур.

Организация наноструктуры осуществляется в пределах межчастичных и межкластерных границ раздела микроуровня, в состав которого она включена. Поверхности раздела между отдельными частицами и агрегатами микроструктуры по своим характеристикам отличаются значительным разнообразием, что связано с неповторимостью распределения по составу и размерам как зерен вяжущего в структурных блоках, так и самих блоков в

объеме микроуровня. Это предопределяет уникальность условий образования отдельных наноструктурных составляющих и изменения их объема, что провоцирует проявление градиентов объемных деформаций на границах раздела микроструктуры. Тем самым задаются вероятные пути дальнейшего протекания деформационных процессов в структуре бетона.

Принципиальная схема развития собственных деформаций в период структурообразования бетона приведена на рис.1.

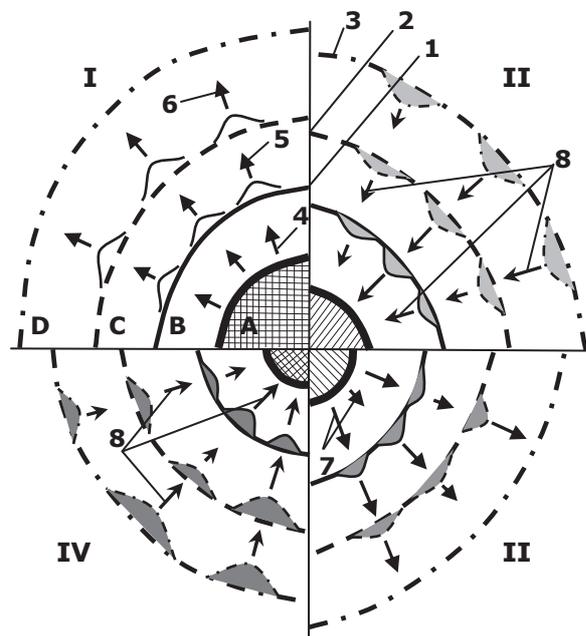


Рис.1. Схема развития собственных деформационных процессов в период организации структуры бетона как сложноорганизованного материала:

I, II, III, IV – этапы развития собственных деформаций.

A – источник возникновения объемных деформаций; B – уровень микроструктуры бетона; C – уровень макроструктуры бетона; D – уровень изделия;

1 – поверхность раздела «микроструктура - заполнители»; 2 – поверхность раздела «макроструктура - изделие»; 3 – внешние границы изделия; 4, 5, 6 – деформации соответствующих уровней неоднородностей бетона; 7 – градиенты деформаций, вызванные дальнейшим протеканием ф/х процессов структурообразования бетона; 8 – разновеликие и разнонаправленные возвратные деформации.

Распределение частиц вяжущего по структурным агрегатам обеспечивает образование взаимосвязанной совокупности межкластерных границ раздела на микроуровне. Одновременно с этим образуются поверхности раздела между микроструктурой как матричным материалом и заполнителями, которые в качестве структурных составляющих входят в структуру материала на уровне изделия. Следует учитывать, что границы раздела всех структурных неоднородностей бетона принимают непосредственное участие в процессах организации как собственной структуры, так и структуры других уровней.

Возникновение и развитие наноструктурной неоднородности инициирует проявление объемных деформаций, которые воспринимаются внутренними поверхностями раздела микроструктуры. При этом формируется начальная деформационная волна, в результате которой градиенты объемных изменений микроуровня, обусловленные флуктуациями его вещественного состава, передаются на уровень макроструктуры, определяя градиенты ее собственных деформаций. Это ведет к самопроизвольному формоизменению поверхностей раздела между матрицей и заполнителями, неповторимому для каждой структурной ячейки в зависимости от ее параметров.

Градиенты объемных деформаций макроструктуры бетона определяют деформационные процессы материала на уровне конструкции (изделия), уникальность протекания которых в отдельных ее объемах обуславливает неравномерное распределение полей остаточных напряжений, вызванных локальными изменениями плотности в материале. Это служит причиной перераспределения градиентов деформаций и вызывает возвратную волну их воздействия на уровни макро- и микроструктур.

Проявление разновеликих и разнонаправленных объемных деформаций структуры бетона на уровне изделия инициирует дальнейшее формоизменение поверхностей раздела макроструктуры. Это отражается на продолжающихся физико-механических процессах структурообразования микроструктурной неоднородности и ведет к еще большему разнообразию ее структурных составляющих. Как результат, изменяются условия протекания физико-химических процессов организации структуры микроуровня. Это влияет на кинетику структурообразования наноструктуры с возбуждением в ней новой волны деформаций, градиенты которых воспринимаются и передаются внутренними и внешними границами микроструктуры на поверхности раздела макроуровня и структуры бетона на уровне изделия. Таким образом, происходит взаимная инициация возвратных волн перехода объемных деформаций с уровня на уровень, что позволяет структурным неоднородностям обуславливать структурную организацию друг друга в зависимости от своих внутрисистемных характеристик.

Для экспериментального подтверждения взаимовлияния параметров неоднородностей при формировании общей структуры бетона были приняты плоские модели структурных ячеек с гексагональной и кубической упаковкой

имитаторов заполнителей в виде прямоугольных параллелепипедов, имеющих различную адгезию к дисперсной фазе (частицы неорганической природы) и дисперсионной среде (водопроводная вода).

Анализ результатов исследований показал, что параметры структурных составляющих микроуровня зависят от пространственно-геометрических и физических характеристик макроструктуры бетонов. В результате изменения способа упаковки заполнителей протяженность границ агрегатов изменялась на 17-39%, а их площадь – на 27-35%. В зависимости от ориентации включений возможно образование кластеров, отличающихся по размерам в среднем на 30%, с различной плотностью и разнообразных конфигураций.

При однородном составе структурных ячеек, включающих заполнители гидрофобной природы, матричный материал отличается упорядоченным расположением подструктур и немонотонным изменением своей внешней границы. В структурных ячейках с заполнителями гидрофильной природы частицы дисперсной фазы не вступают в непосредственный контакт с имитаторами включений, что ведет к повышению плотности центральных участков и граничных слоев матрицы в ячейках. При сосуществовании в одной структурной ячейке разнородных по составу заполнителей независимо от их ориентации создаются условия для организации разупорядоченных по строению систем с различной плотностью удельных объемов.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности направленного обеспечения требуемых параметров составляющих микроструктуры бетона, что должно отразиться на свойствах твердеющего и затвердевшего матричного материала в структурных ячейках. Для этого, при тех же вариантах упаковки, формы и природы заполнителей, в качестве матрицы использовали цементное тесто с  $V/C=0,25$ .

Анализ показал, что объемные деформации твердеющих систем при различных характеристиках структурных ячеек отличаются по величине (до 27%), скорости и периодам их проявления. Сроки схватывания изменялись в среднем на 15-35 минут. Это указывает на индивидуальность организации микроструктуры каждой ячейки бетона, что обуславливает уникальные пути развития деформаций на поверхностях раздела как внутри матрицы, так и на границах с заполнителями с выходом на уровень изделия.

Неповторимость формоизменения поверхностей раздела макроструктуры определяется характером распределения в матрице градиентов начальных деформаций, которые могут различаться по величине от  $\epsilon=1,13$  до  $\epsilon=3,95$ . Взаимовлияние параметров микро-и макроуровней также подтверждается изменением значений водопоглощения затвердевших образцов до 18% и коэффициента их технологической поврежденности [8] до 40% как характеристик, позволяющих оценить гетерогенность матричного материала через совокупность различного рода несплошностей, образующихся при организации его структуры.

### **Выводы.**

Проведенный анализ позволяет заключить, что бетон как подсистема строительной конструкции представляет собой материал полиструктурного строения с характерными уровнями структурных неоднородностей. В свою очередь, каждый уровень может быть выделен в виде совокупности отдельных, но взаимосвязанных подструктур с неповторимым набором элементов. Неоднородности взаимодействуют друг с другом через границы раздела, а взаимовлияние их параметров определяет организацию как их собственной структуры, так и интегральной структуры бетона. Взаимообусловленность структурного оформления уровней неоднородностей является следствием взаимной инициации проявления объемных изменений, сопровождающих процессы структурообразования систем на минеральных вяжущих. Возникновение деформаций на уровне наноструктуры в результате физико-химических процессов и явлений гидратации вяжущего вызывает зарождение деформационных волн, развитие которых оказывает влияние на организацию структуры макроуровня и формоизменение границ бетона на уровне изделия. В зависимости от геометрических параметров конструкции происходит перераспределение градиентов деформаций. Это инициирует возвратные деформационные процессы на уровне макро- и микроструктур, что ведет к очередным изменениям их структурной организации и возбуждению новых разновеликих и разнонаправленных деформаций. Взаимозависимость условий протекания объемных изменений уровней обеспечивает возможность их направленного структурообразования путем изменения составов вяжущего, характеристик макроструктуры и начальной конфигурации внешних границ конструкции для получения строительных материалов с требуемыми свойствами.

1. 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. 2. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. Монография / Прангишвили И.В. – М.: «Синтег», 2000. – 519с. 3. Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Монография / Соломатов В.И., Выровой В.Н., Бобрышев А.Н. и др. – Ташкент: ФАН, 1991. – 345с. 4. 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, 1991. – 144с. 5. Соломатов В.И. Интенсивная технология бетонов. Монография / Соломатов В.И. и др. – М.: Стройиздат, 1989. – 260с. 6. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. Монография / Урьев Н.Б. – М.: Химия, 1980. – 320с. 7. Выровой В.Н. Бетон в условиях ударных воздействий. Монография / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. – Одесса: Внешрекламсервис, 2004. – 270с. 8. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Монография / Дорофеев В.С., Выровой В.Н. – Одесса: ИМК «ГОРОД МАСТЕРОВ», 1998. – 165с.