

УДК 666: 519.8

**СПОНТАННА ПЕРЕБУДОВА СТРУКТУРИ БЕТОНУ ПРИ  
ЗНАКОПЕРЕМІННИХ ВПЛИВАХ**

**СПОНТАННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ БЕТОНА ПРИ  
ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**SPONTANEOUS STRUCTURAL REORGANIZATION OF CONCRETE  
AT SIGN-VARIABLE INFLUENCES**

**Коробко О.О., к.т.н., доц., Вировой В.М., д.т.н., проф., Непомнящий О.М.,  
аспірант, Шевченко В.В., аспірант (Одеська державна академія  
будівництва та архітектури, м. Одеса)**

**Коробко О.А., к.т.н., доц., Вировой В.Н., д.т.н., проф., Непомнящий А.Н.,  
аспірант, Шевченко В.В., аспірант (Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, г. Одесса)**

**Korobko O. A., candidate of technical sciences, docent, Vyrovoy V.N., doctor  
of technical sciences, professor, Nepomnyashchy A.N., post-graduate student,  
Shevchenko V.V., post-graduate student (Odessa State Academy Civil  
Engineering and Architecture, Odessa)**

**В конструкції бетон проявляє себе як підсистема, що самоорганізується,  
яка змушена реагувати на зовнішні впливи структурними змінами.  
Багатоваріантність макроструктури бетону поліпшує його здатність  
адаптуватися до зовнішніх умов.**

**В конструкции бетон проявляет себя как самоорганизующаяся  
подсистема, которая вынуждена реагировать на внешние воздействия  
структурными изменениями. Многовариантность макроструктуры  
бетона улучшает его способность адаптироваться к внешним условиям.**

**In the construction the concrete manifests itself as self-organizing subsystem,  
which is forced to respond to external influences structural changes. Diversity  
concrete macrostructure improves its ability to adapt to external conditions.**

**Ключові слова:**

Конструкція, відкрита система, структурні зміни, пошкодженість.

Конструкция, открытая система, структурные изменения, поврежденность.

Construction, open system, structural changes, damage.

### **Введение.**

В работах [1, 2, 3] показано, что любые объекты, включая строительные конструкции, рационально представлять в виде открытых сложных самоорганизующихся систем. Это предполагает, что в процессе эксплуатации конструкция способна воспринимать воздействия окружающей среды и противостоять им путем компенсирующих структурных изменений. Как правило, работая в среде, периодически меняющей параметры, конструкции вынуждены постоянно адаптироваться к череде внешних воздействий с установлением между конструкцией как открытой системой и ее окружением особого вида взаимоотношений – непрерывного структурного связывания [4]. В ответ на каждое действие среды конструкция должна откликаться определенной перестройкой структуры, что ведет к изменению ее поведения и, следовательно, условий взаимодействия со средой.

Основополагающее значение в процессах адаптации конструкции к изменчивым внешним обстоятельствам имеет структурный потенциал материала, из которого она изготовлена. Это особенно актуально для бетона, сохранение целостности и возможность выполнения функций которого обеспечиваются многовариантностью его структуры [5]. При одном и том же составе в бетоне на уровне макроструктуры можно выделить разнообразные по форме и свойствам ячейки, образованные группами заполнителей в матричном материале. Совокупность таких структурных ячеек проявляет себя как единое целое, а их различие повышает способность бетона в конструкции приспосабливаться к внешним факторам без катастрофического нарушения своей целостности. Это возможно только путем своевременных изменений структуры материала при отрицательном влиянии окружающей среды. Исходя из этого, была определена задача – проанализировать структурные преобразования бетона в ответ на периодически повторяющиеся внешние воздействия с учетом многовариантности его строения.

### **Влияние структурного разнообразия на изменение свойств бетона в условиях попеременного увлажнения и высыхания.**

Строительная конструкция как открытая система воспринимает внешние воздействия, и материал вынужден откликаться на них путем структурных изменений. Спонтанные изменения структуры материала конструкции в период ее функционирования являются результатом изменения параметров структурных элементов, способных адекватно реагировать на внешние и внутренние воздействия. До эксплуатации в структуре конструкции уже присутствует определенный набор таких активных элементов, к числу которых относят трещины и внутренние поверхности раздела, сосуществующие на всех уровнях структурных неоднородностей [3]. Суммарное количество трещин и внутренних поверхностей раздела определяет гетерогенность и поврежденность материала конструкции начальными дефектами. Воздействие среды эксплуатации на конструкцию

вызывает локальные и интегральные изменения массы и объема материала, что инициирует избирательные перестройки его блочной структуры с соответствующим изменением параметров начальных трещин и внутренних поверхностей раздела. Таким образом, по изменению протяженности этих элементов можно количественно оценить вынужденные структурные преобразования материала конструкции под действием внешних факторов.

В конструкции бетон выступает как самоорганизующаяся подсистема, которая связана с окружающей средой через повторяющиеся акты периодичных взаимодействий. Каждый такой акт ведет к очередным структурным преобразованиям, вид которых определяется предыдущим и влияет на последующее. При этом ответ системы на внешнее воздействие зависит только от возможностей ее структуры. Среда может лишь инициировать структурные перестройки, но не определять каким способом и какими путями они будут происходить.

К началу функционирования конструкция приобретает конкретную структуру и присущий исключительно ей набор активных элементов. Многовариантность структуры бетона на уровне «заполнители – матричный материал» предполагает, что в каждой структурной ячейке выполняются собственные условия структурообразования матричного материала, и формируется своя неповторимая сеть наследственных трещин и внутренних поверхностей раздела. При этом сочетание ячеек в объеме бетона любой конструкции сугубо индивидуально, что еще в большей мере усложняет структурное разнообразие и интегральную поврежденность материала. Поэтому даже при одинаковом составе бетона внутренний потенциал конструкций отличается, что определяет несовпадение возможных поведенческих реакций их структуры под действием среды эксплуатации. Это было подтверждено результатами экспериментальных исследований на образцах-кубах и моделях структурных ячеек, которые подвергались попеременному увлажнению и высушиванию.

Модели структурных ячеек представляли собой затвердевшие образцы размером 160x90x40 мм, изготовленные на основе цементного вяжущего одного состава, с имитаторами заполнителей в виде призм, расположенных таким образом, чтобы получить ячейки кубической и гексагональной формы. Каждая модель включала по три ячейки, объединенных в одно изделие. Модели отличались способом укладки заполнителей и соотношением сил связи на границах раздела между матричным материалом и заполнителями:  $R_A > R_K$ ;  $R_A < R_K$ ;  $R_A = R_K$ , где  $R_A$  – величина адгезии матричного материала к поверхности заполнителя,  $R_K$  – величина когезионной прочности матричного материала. Изменение состояния поверхности призм осуществляли путем их обмазки веществом с пониженной адгезией к цементной составляющей.

Структурные изменения структуры образцов под действием внешних факторов оценивали через коэффициент интегральной поврежденности  $K_p = \sum L_i / L$ , который определяли как соотношение фактической длины

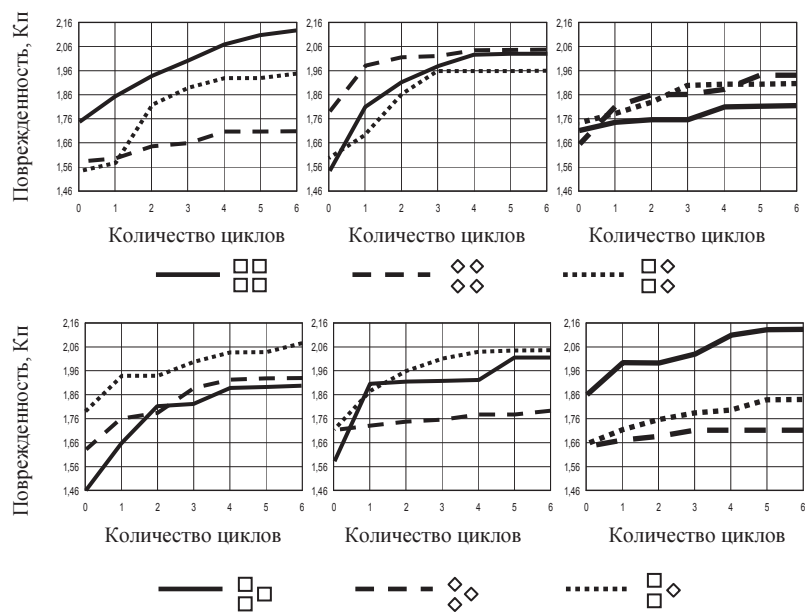
трещины  $\Sigma L_i$  к длине геодезической линии  $L$  (кратчайшее расстояние между точками выхода фактической трещины на торцевые поверхности образца) [3]. Измерение проводили по двум боковым (ложковым) сторонам каждой модели, вычисляя  $K_p$  как среднее арифметическое из двух значений.

Периодическое изменение условий внешней среды осуществляли путем попеременного увлажнения и высушивания моделей в течение 6 циклов. Предварительная подготовка образцов выполнялась по стандартной методике. Высушенные до постоянной массы образцы погружали в раствор танина на 4 часа, что обеспечивало в среднем 85-90% их водонасыщения от водонасыщения образцов за 24 часа. Затем образцы высушивали при  $T=100\pm 5^\circ\text{C}$  в течение 12 часов до требуемого показателя и давали остыть до  $T=35-40^\circ\text{C}$ . После этого цикл повторялся с увлажнением образцов в новом растворе танина.

Фотофиксацию и оценку изменения поврежденности моделей проводили после каждого цикла увлажнения и высушивания.

Развитие трещин при увлажнении и высушивании материала с блочной структурой можно представить как дискретно-непрерывный процесс, что связано с цикличностью воздействий и постоянным увеличением длины каждой отдельной трещины, как при увлажнении, так и при высушивании [3]. При увлажнении материала происходит развитие начальных трещин (проявление «эффекта Ребиндера»). Полное насыщение трещины водой приостанавливает ее рост, но при этом на весь период увлажнения сохраняется метастабильное состояние трещины, являющейся потенциально «чувствительной» к возможному изменению внешних условий. Удаление воды из трещины провоцирует проявление капиллярных эффектов, на которое сразу реагирует трещина, изменяя свои геометрические характеристики. При полном удалении воды из объема трещины ею достигается очередное метастабильное состояние, при котором замедляется ее развитие. Следующий цикл увлажнения и высушивания приводит к повторению поведенческих реакций объекта, но их реализация будет теперь определяться новыми структурными параметрами. Вынужденные отклики структуры на повторяющуюся череду внешних воздействий зависят от нее самой, поэтому поведение материала при эксплуатации конструкции изначально непредсказуемо и неповторимо на всех этапах взаимодействия с внешней средой.

Результаты, полученные на моделях с различным сочетанием ячеек, показали (рис.1), что влияние структурных параметров на перестройку структуры сохраняется при каждом цикле воздействий. В условиях экспериментов коэффициент поврежденности  $K_p$ , косвенно отражающий самопроизвольное изменение структуры материала, через 6 циклов периодического увлажнения и высушивания повысился при различных способах укладки и ориентирования заполнителей на 10-24%, а при различном состоянии поверхности заполнителей в ячейках – на 7-19%.



**Модели структурных ячеек**

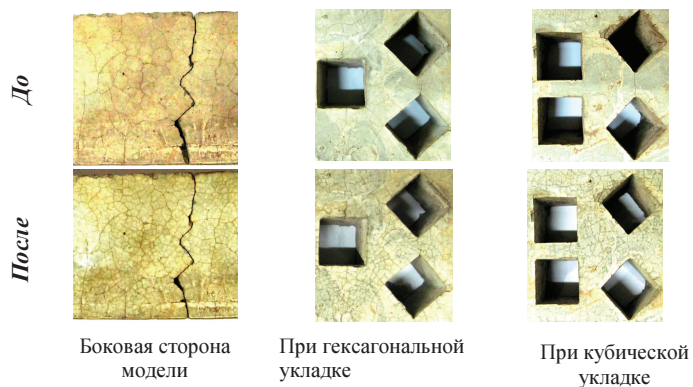


Рис.1. Влияние макроструктурных параметров на изменение поврежденности (Кп, см/см) бетона при многократном увлажнении и высушивании:  
 --- образцы без обработки ( $R_A > R_K$ ); — образцы с обработкой ( $R_A < R_K$ ); ..... образцы с избирательной обработкой ( $R_A = R_K$ ).

Изменение типа укладки заполнителей привело к снижению поврежденности образцов в среднем на 9-16%, изменение соотношения сил связи на границах раздела между заполнителями и матричным материалом – в среднем на 13%. Наиболее интенсивно преобразования структуры большинства образцов проявились после первого цикла воздействий, значения  $K_p$  изменились в среднем на 7%. После третьего цикла изменение  $K_p$  составило 11%, после шестого цикла – 13%. Изменение поврежденности образцов с ячейками, включавших заполнители с избирательной обработкой, происходило равномерно, без резких перепадов. Это может быть связано с обеспечением параметров активных элементов, улучшающих способность материала своевременно подстраиваться под изменяющиеся внешние условия путем соответствующих структурных перестроек. Влияние структурного разнообразия на поведение материала сохранялось при каждом цикле воздействий. Это может быть связано с обеспечением параметров ТТ и ВПР, улучшающих способность материала подстраиваться под внешние условия путем соответствующих структурных преобразований.

Характерный набор технологических трещин и внутренних поверхностей раздела, создавать который, как показали проведенные исследования [6], можно изменением параметров макроструктуры бетона, определяет неповторимый «структурный» портрет материала и по завершению основных процессов структурообразования отражает индивидуальность строительной конструкции перед началом ее функционирования. Способность материалов противостоять разрушающим нагрузкам зависит от их структурного потенциала, определяемого на момент функционирования преимущественно параметрами трещин и внутренних поверхностей раздела.

При действии внешних нагрузок на всех уровнях системы происходит преобразование их внутрискруктурных связей в результате передачи деформаций через сеть трещин и поверхностей раздела. Это обеспечивает самосохранение каждого уровня. При снижении внешнего воздействия структурная перестройка уровней завершается, а при усилении воздействия может произойти разрыв связей и постепенная потеря функций отдельного уровня. На соседние уровни информация о произошедших преобразованиях передается путем изменения параметров межструктурных связей. При действии внутренних факторов начальные деформации на уровне частиц вяжущего инициируют возникновение внутренних воздействий, которые вызывают изменение внутрискруктурных связей. Последующее развитие деформаций создает условия для проявления внутренних воздействий, способных привести к разрушению. Возникают необратимые структурные изменения с разрывом межструктурных связей. Таким образом, стойкость материала конструкций под действием эксплуатационных нагрузок должна определяться соотношением интенсивности структурных преобразований и скорости реакций на них составляющих его структуры. Деформации можно представить как индивидуальные отклики структуры материала на внешние и

внутренние воздействия. Внешние воздействия воспринимаются всеми уровнями неоднородностей бетона и провоцируют ответные структурные изменения. При этом следует учитывать, что стойкость материала конструкций под влиянием нагрузок должна определяться соотношением интенсивности структурных преобразований и скорости реакций на них составляющих его структуры.

Изделия из бетонов промышленных составов содержат разнообразный набор макроструктурных параметров, что способствует перераспределению возникающих реакций материала и повышению стабильности структуры на макроуровне. Это было подтверждено результатами экспериментальных исследований. В опытах использовали составы бетонов на гранитном щебне с различным состоянием поверхности зерен заполнителя. Анализировали три характерных случая формирования адгезионно-когезионных сил связи между твердеющей матричной составляющей и поверхностью заполнителей:  $R_A > R_K$  – на необработанном щебне;  $R_A < R_K$  – на щебне, обработанном ГКЖ-11;  $R_A = R_K$  – на смеси заполнителей, включавшей зерна с обработкой гидрофобизатором и без обработки.

Было определено, что повышение структурного разнообразия бетона на макроуровне за счет использования заполнителей с избирательной адгезией ( $R_A = R_K$ ) обеспечило увеличение: - прочности при сжатии образцов до 24%, - коэффициента поврежденности до 29%, - модуля упругости до 27%, - водопоглощения до 19%. Кроме того, при изменении состояния поверхности гранитного щебня объем открытых капиллярных пор изменялся в 2 раза, показатель среднего размера открытых капиллярных пор на 26%, показатель однородности размеров открытых капиллярных пор на 30%.

Разнообразие макроструктурных параметров бетона в одном образце-кубе подтвердилось широким диапазоном значений прочности, полученных с помощью прибора ИМС-МГ4.01. Количественные показатели прочностных характеристик отличались для бетона на необработанном заполнителе до 40%; для бетона на заполнителе, обработанном ГКЖ, до 30%; для бетона на заполнителе с различным состоянием поверхности заполнителей до 45%.

Скорость прохождения ультразвукового импульса в локальных объемах одних и тех же кубов-образцов принятых составов различалась в интервалах: при  $R_A > R_K$  – от  $U=3,32$  м/с до  $U=3,65$  м/с; при  $R_A < R_K$  – от  $U=3,31$  м/с до  $U=3,94$  м/с; при  $R_A = R_K$  – от  $U=3,35$  м/с до  $U=3,88$  м/с.

Разброс количественных значений, по нашему мнению, связан с тем, что в каждой ячейке, образованной заполнителями в матричной составляющей бетона, создается индивидуальная сеть активных элементов (начальных трещин и внутренних поверхностей раздела). Следовательно, можно предположить неаддитивность изменения параметров различных вида несплошностей в ячейках при периодических знакопеременных воздействиях. Об этом свидетельствуют результаты изменения водопоглощения  $W$  и пористости бетонных образцов принятых составов до и

после 10 циклов увлажнения-высушивания и замораживания-оттаивания. Наиболее стойкими в условиях попеременного изменения влажности и температуры оказались образцы с избирательной адгезией матричного материала к поверхности заполнителей, обеспечившей увеличение разнообразия параметров внутренних поверхностей раздела и начальных трещин. Благоприятные структурные изменения, связанные с самоподдержкой сети активных элементов, позволили материалу в изделии безопасно противостоять знакопеременным воздействиям.

#### **Выводы.**

Проведенные исследования и анализ позволяют заключить, что в период эксплуатации строительная конструкция как открытая самоорганизующаяся система способна адаптироваться к действиям внешних факторов путем спонтанных структурных преобразований. Это обусловлено присутствием в структуре материала конструкции активных элементов, которые своевременно реагируют, через изменение собственных параметров, на эксплуатационные воздействия. Бетон как подсистема конструкции-системы включает разнообразный набор макроструктурных форм с индивидуальными условиями их формирования. Многовариантность макроструктуры обеспечивает уникальность локальных структурных преобразований бетона как откликов на изменения внешней среды, улучшая его способность противостоять агрессивным воздействиям. Поэтому, для безопасного функционирования конструкции необходимо организовывать структуру материала с требуемым набором структурных составляющих, способных инициировать проявление эффектов адаптации.

1. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / Прангишвили И.В. – М.: «Синтег», 2000. – 519 с. 2. Могилевский В. Д. Методология систем: (вербальный подход) / В.Д. Могилевский – М.: Экономика, 1999. – 251 с. 3. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса: «ТЭС», 2010. – 169 с. 4. Матурана У. Древо познания / У. Матурана, Ф. Варела. – М.: «Прогресс-Традиция», 2001. – 224 с. 5. Выровой В.Н. Бетон в условиях ударных воздействий / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, С.Б. Фиц. – Одесса: «Внешрекламсервис», 2004. – 270 с. 6. Уразманова Н.Ф. Влияние взаимосвязи структурных уровней на технологическую поврежденность бетонов / Н.Ф. Уразманова, В.Ю. Тофанило, О.А. Коробко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – Вип.57. – С. 418-423.