

УДК 666: 519.8

**РОЛЬ ЭНДО- И ЭКЗОДЕФОРМАЦИЙ В ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ БЕТОНА**

**THE ROLE OF ENDO- AND EXODEFORMATIONS IN OF CONCRETE STRUCTURE ORGANIZATION**

**Коробко О.А., к.т.н., доц., Тофанило В.Ю., аспирант, Выровой В.Н., д.т.н., проф.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

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

**Показана роль эндо- и экзодеформаций, инициируемых внутренними и внешними воздействиями, в сети процессов структурообразования и функционирования бетона как полиструктурного материала.**

**The role endo- and the exodeformations, initiated by internal and external influences, in the network of processes of the organization of structure and functioning of concrete as a polystructural material are submitted.**

**Ключевые слова:** конструкция-система, бетон, уровни структурных неоднородностей, эндо и экзодеформации, взаимосвязанная сеть (паутина).  
Construction-system, concrete, levels of structural heterogeneities, endo- and exodeformations, mutually coherent network (web)

**Введение.** Деформации являются ключевым понятием, принятым при описании и анализе процессов и явлений, происходящих в материалах различного вида и назначения, изделиях, конструкциях и других объектов, которые при образовании и функционировании способны претерпевать объемные изменения. В общем случае под термином «деформация» (лат. *deformatio* – изменение искажение) понимают изменение взаимного расположения точек твердого тела, при котором изменяется расстояние между ними в результате внешних воздействий [1, 2]. Проведенный терминологический анализ позволил предложить обобщенное определение термина «деформация» – изменение расстояния между отдельными точками тел с различными реологическими характеристиками и их возможное формоизменение (без и с изменением объема), возникающие в результате комплекса внешних воздействий, внутренних процессов и явлений, а также при изменении температуры и влажности.

Предложенное определение позволяет с единых методологических позиций проанализировать развитие деформаций от моментов получения материала до периодов его активного функционирования и гибели. Это

предполагает, что материал практически всех изделий и конструкций находится в постоянной динамике, интенсивность проявления которой определяется способностью структурных составляющих материала воспринимать, перераспределять, диссипатировать, трансформировать и релаксировать возникающие и развивающиеся локальные и интегральные деформации. В связи с этим, была поставлена задача определения роли деформаций различной природы на формирование сетевой организации структуры бетонов как грубогетерогенных материалов.

**Классификация деформаций.** В предложенном определении термина «деформация» подчеркивается, что причинами возникновения и развития деформаций могут быть внутренние и внешние факторы. Под внутренними факторами понимают совокупность физико-химических и физико-механических процессов, которые протекают в периоды становления материала и выполнения его служебных функций при эксплуатации. Деформации, инициированные внутренними факторами, отнесены к собственным деформациям материалов и определяются процессами и явлениями, протекающими внутри самого материала. Для более полного раскрытия сути собственных деформаций, они определены нами как эндодеформации.

Под эндодеформациями (гр. *endon* – внутри) следует понимать деформации, причины возникновения и развития которых связаны с процессами, протекающими в результате комплекса химических, физических и механических процессов как при получении, так и в период эксплуатации композиционных строительных материалов. Таким образом, эндодеформации – изменение расстояния между отдельными точками и проявление эффектов формоизменения тел с различными реологическими свойствами за счет процессов и явлений, происходящими в материале без внешних воздействий.

Деформации материала, которые вызваны внешними факторами, отнесены к экзодеформациям (гр. *exo* – снаружи), под которыми следует понимать изменение расстояния между точками тела и его формоизменение в результате внешних воздействий. Внешними воздействиями выступают силовые стационарные, динамические и импульсные нагрузки; воздействие среды эксплуатации, связанное с изменением температуры и влажности; воздействие химически активных реагентов и т.п.

Внешние воздействия и внутренние факторы формируют совокупные деформационные волны, провоцируя проявление самопроизвольной структурной переорганизации [3, 4].

Эндо- и экзодеформации могут проявляться интегрально с выходом на внешние границы системы и локально в результате изменения объема ее отдельных составных частей. Полиструктурность строения [5] всех строительных композитов позволяет предположить, что одни и те же эндо- и экзодеформации могут быть одновременно локальными и интегральными по отношению к системам и подсистемам различных уровней структурных

неоднородностей материала, на которых происходит их возникновение и развитие.

Общая согласованность взаимодействий структурных неоднородностей и сосуществование сложноорганизованной сети разноуровневых поверхностей раздела предполагают, что распространение собственных и вынужденных деформаций с уровня на уровень и внутри уровней должно осуществляться в виде деформационных волн.

Представление деформаций как изменение расстояния между отдельными точками и формоизменение тел позволяет рассматривать их не только в качестве результата произошедших изменений, но и в виде процесса этих изменений. При этом представляет интерес, каким образом эндодеформации оказывают влияние на формирование структуры сложносоставленных систем, а экзодеформации определяют их поведение под действием эксплуатационных нагрузок. Для анализа был выбран бетон в виде подсистемы строительной конструкции, которая представлена как сложная самоорганизующаяся система. Это означает, что структура конструкции включает структурные особенности материала, из которого она изготовлена.

**Роль эндодеформаций в формировании структуры бетона.** Бетон может быть представлен как система, состоящая из определенной взаимосвязанной совокупности собственных структурных неоднородностей [4]. Исходя из полиструктурного строения бетона, в его структуре можно выделить неоднородности на уровне частиц вяжущего (микроструктура), на уровне продуктов новообразований (наноструктура), на уровне матричного композита и заполнителей (макроструктура) и на уровне изделия (конструкции). На каждом уровне неоднородностей реализуются собственные механизмы их структурного самопостроения при активном участии внешних и внутренних поверхностей раздела уровней.

Организация микроструктуры происходит за счет неуравновешенных межчастичных взаимодействий [5]. В состав микроуровня в качестве подсистемы входит наноструктура, возникновение которой обусловлено проявлением термофлуктуационных эффектов и достижением критических значений коэффициентов концентрации зародышеобразования. При этом микроструктура сама является составной частью (подсистемой) макроуровня [6]. Таким образом, структура бетона может быть представлена как определенная иерархия уровней структурных неоднородностей, которые выступают подсистемами для самого бетона, но являются системами для своих структурных составляющих.

Организация микроструктуры происходит путем образования агрегатов (кластеров) из частиц дисперсной фазы и лиофилизации их поверхности. Образование кластерных структур ведет к возникновению развитой сети межкластерных поверхностей раздела. При этом следует отметить, что в микроструктуре как самоорганизующейся аутопоэзной [7] системе границы раздела сосуществуют не в качестве отдельных изолированных друг от друга

элементов, а взаимосвязаны в единую сеть, которая находится в непрерывном движении. Структурные изменения этой сети определяются процессами структурообразования микроуровня, кинетика которых, в свою очередь, зависит от участия поверхностей раздела в их реализации. Сами физико-механические и физико-химические процессы и явления формирования микроструктуры также можно представить как индивидуальные, но взаимодействующие и взаимоопределяющие сети, связанные между собой в еще более сложную сеть.

Организация структуры систем по сетевому принципу предполагает, что функция каждого элемента сети заключается в создании и преобразовании других ее элементов. Таким образом, сеть образуется компонентами, которые она же и производит для собственной организации.

Представление процессов формирования структуры микроуровня как нелинейных сетей обусловлено тем, что результатом их протекания являются постоянные структурные изменения, что позволяет отнести их к процессам самопроизводства. В системе, которая находится в неравновесном термодинамическом и физическом состоянии, первично неупорядоченные частицы дисперсной фазы группируются в периодически организованные агрегаты и в составе этих агрегатов вместе с ними участвуют в производстве структурных блоков следующих уровней сложности в результате межкластерных взаимодействий. Это означает, что каждая частица, а, в последствии, и каждый агрегат, устанавливая новые связи в сети, вносит свой вклад в создание и трансформацию новых структур. Эти изменения имеют поступательный характер и обусловлены внутренней динамикой микроструктуры. В результате этого происходит возникновение новых для системы подструктур нанометрического размера, которые через сетевые взаимодействия создают структуру бетона на микроуровне.

Сетевая организация микроструктуры предполагает ее «вплетение» в более обширную сеть взаимоотношений, которую можно рассматривать как динамическую паутину взаимозависимых событий. Отсюда следует, что и объемные деформации, вызываемые этими процессами, должны развиваться и определять структурное оформление микроуровня по сетевому принципу.

Начальный этап проявления эндодеформаций инициируется на уровнях микро- и наноструктур. Деформации воспринимаются границами раздела микроструктуры: внутренними – межкластерными и внешними – между матрицей и заполнителями.

Развитие деформаций на поверхностях раздела между кластерами, независимо от их масштабного уровня, обусловлено непрерывными объемными изменениями в приповерхностных слоях структурных блоков, провоцирующих изменение их объема. Пластическое деформирование кластерных структур приводит к формоизменению межкластерных границ раздела с локализацией и индивидуальным проявлением деформаций в различных объемах микроструктуры. Это связано с разнообразием состава

минеральных вяжущих и неповторимым распределением частиц различной природы по структурным агрегатам. Таким образом, исключается полная передача суммы деформаций на внешние границы микроуровня, что провоцирует их нелинейное развитие.

Локальные и интегральные эндодеформации микроструктуры являются одними из элементов сетевой организации структуры бетона на макроуровне. Многообразие типов и плотности упаковки заполнителей в бетонной смеси обеспечивает множество сочетаний включений с различным соотношением когезионно-адгезионных сил связи на поверхностях раздела между ними и матричным материалом. Это приводит к усложнению сети взаимоотношений и взаимодействий структурных составляющих макроуровня при организации его структуры. Как следствие, провоцируется возникновение градиентов объемных деформаций на границах раздела макроструктуры, что изменяет их пространственно-геометрические характеристики и, тем самым, определяет перераспределение деформаций на уровне изделия (конструкции).

В силу того, что организация структуры бетона представлена как сеть взаимосвязанных процессов и явлений, в которой каждый составляющий ее элемент инициирует реакции других элементов сети, можно предположить незавершенность развития объемных деформаций при их выходе на внешние границы изделия, что обуславливает формирование возвратной волны деформаций на уровне макро- и микроструктур. Это вызывает изменение в сетевом режиме условий взаимодействия матрицы с заполнителями  $\Rightarrow$  кинетики кластерообразования  $\Rightarrow$  обстоятельств реализации физико-химических процессов. Произошедшие изменения отражаются на дальнейшей структурной организации наноуровня и, таким образом, влияют на условия развития нового витка эндодеформаций, определяющих структуру уровней, на которые передается деформационная волна.

При передаче деформаций с одного уровня неоднородностей на другой инициируется постоянное изменение геометрии их границ, что провоцирует возникновение, рост и трансформацию друг в друга технологических трещин и внутренних поверхностей раздела. Новые элементы в структуры бетона включаются в динамику его «жизненного цикла» как сложноорганизованной сети и активно участвуют в распределении экзодеформаций, возникающих при действии на материал конструкции эксплуатационных нагрузок.

**Роль экзодеформаций в организации структуры бетона при функционировании конструкции-системы.** Бетон (материал, оформленный в конструкцию) и уровни его структурных неоднородностей можно представить как аутопоэзные системы [4, 7]. Отличительной характеристикой таких систем является их организационная замкнутость (автономность). Это позволяет предположить, что бетон должен взаимодействовать со средой эксплуатации структурно, путем периодических структурных изменений на всех уровнях неоднородностей. Эти изменения, обусловленные внутренними возможностями полиструктурного материала, оформленного в изделие

конкретной геометрической формы, проявляются как его реакции на возмущающие воздействия своего окружения. Каждый последующий акт взаимодействия бетона с внешней средой определяется предыдущим. Таким образом, формируется цепь структурных изменений как постоянного приспособления сложноорганизованной системы к условиям эксплуатации. Следует отметить, что поведение бетона детерминировано его собственной структурой. Внешние воздействия неспецифично активируют структурные перестройки материала, но не определяют их вид и способ реализации, не управляют ими.

Экзодеформации можно представить как результат интегральных и локальных изменений структуры бетона под действием эксплуатационных нагрузок.

Между материалом и внешней средой устанавливаются определенные сети взаимоотношений и взаимосвязей. При влиянии на конструкцию-систему сразу нескольких видов эксплуатационно-климатических воздействий, формируется сложная паутина взаимодействий, в которой все процессы взаимозависимы, а реакции системы на действие внешних сил избирательны.

Возникновение и развитие экзодеформаций определяется особенностями структуры бетона на различных уровнях неоднородностей. К началу периода функционирования конструкции как системы, неоднородности представляют собой сети структурных элементов, отличающихся по «чувствительности» к действию внешних сил [6]. Взаимодействие уровней ведет к формированию «паутины» сетей («сети в сетях»), в которой все элементы взаимосвязаны, инициируя изменение друг друга, с сохранением собственных характеристик либо видоизменяясь под действием внутренних и внешних факторов.

Процессы и явления, происходящие в материале при воздействии среды эксплуатации, служат причиной самоинициации возникновения флуктуаций вещественного состава и плотности в локальных объемах бетона. При этом создаются условия для самопроизвольной организации сети экзодеформаций, которые, при продолжающемся развитии эндодеформаций, взаимодействуют с различными элементами структуры, вызывая изменение их параметров. Это провоцирует образование новых структурных элементов – эксплуатационных трещин, с вероятным их превращением в поверхности раздела и структурные блоки.

Дискретная организация блочной структуры бетона предполагает, что распространение экзодеформаций будет осуществляться нелинейно в объеме изделия. Это предполагает, что при равномерном воздействии внешних сил происходит локальное изменение объемов материала, что связано с его структурной неоднородностью и прохождением энергии преимущественных видов воздействий по зонам с повышенной плотностью. Это обуславливает организацию деформационной волны, параметры которой определяются

структурными, геометрическими и пространственными характеристиками, как самой конструкции, так и других уровней неоднородностей бетона.

Формирование деформационных волн представляет собой кинетический процесс с передачей деформаций между уровнями. Это позволяет рассматривать весь путь распространения экзодформаций как создание отдельной, но сложноорганизованной сети в общей паутине сетей развития деформационных волн. При переходе интегральных и локальных экзодформаций с уровня конструкции на уровни макро- и микроструктур условия их передачи зависят от состояния и деформационных характеристик внутри- и межуровневых границ раздела. Сети внешних и внутренних поверхностей раздела уровней организовываются с сетями эндо- и экзодформаций и, через совместное самосогласованное взаимодействие, включаются в реализацию структурной адаптации бетона как материала конструкции к действию внешних сил.

**Выводы.** Проведенный анализ позволяет заключить, что объемные деформации сопровождают все этапы жизненных циклов бетонов, объективно входя и активно влияя на структурные сетевые взаимодействия. В зависимости от причин возникновения, деформации можно квалифицировать на эндо- и экзодформации. Формирование деформационных волн и условия их распространения определяются структурной организацией на всех уровнях неоднородностей материала. В свою очередь, структурное оформление зависит от составов бетона, провоцирующих развитие эндодеформаций, и технологических режимов производства конструкций-систем. Перманентное развитие эндо- и экзодформаций предполагает их непрерывное влияние на структурные преобразования бетона и, таким образом, на его способность сопротивляться неблагоприятным воздействиям среды эксплуатации. Для обеспечения безопасного функционирования конструкции-системы необходимо направлено организовывать, с обязательным учетом влияния эндодеформаций, ее структуру с требуемым набором структурных составляющих, способных инициировать внутреннее сетевое взаимодействие и самоподдержку, обеспечивая проявление эффектов адаптации.

1. Астахов А.В. Курс физики. Механика. Кинетическая теория материи / Астахов А.В. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1977.– 381 с. 2. Ефремова Т. Ф. Новый словарь русского языка / Ефремова Т. Ф. – М.: Изд-во Дрофа, Русский язык, 2000. — 1233 с. 3. Капра Ф. Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем. Монография / Капра Ф. – К.: «София», М.: ИД «София», 2003. – 336 с. 4. Коробко О.А. Бетон как самоорганизующаяся система / Коробко О.А., Выровой В.Н., Суханов В.Г., Тофанило В.Ю. // Вісник ОДАБА. – Одеса: «Зовнішрекламсервіс», 2014. – Вип.53. – С.182-190. 5. Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Монография / Соломатов В.И., Выровой В.Н., Бобрышев А.Н. и др. – Ташкент: ФАН, 1991. – 345 с. 6. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Монография / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. – Одесса: Изд-во «ГЭС», 2010. – 169 с. 7. Матурана У. Древо познания: Биологические корни человеческого понимания. Монография / Матурана У., Варела Ф. – М.: Изд-во «Прогресс - Традиция», 2001. – 224 с.