

РОЛЬ ТРЕЩИН В СТРУКТУРНОМ РАЗВИТИИ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИЙ

В.Г. Суханов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.С. Чернега

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

В работе рассмотрены вопросы спонтанных структурных изменений материала за счет развития трещин и внутренних поверхностей раздела при действии на конструкцию эксплуатационных нагрузок.

ВВЕДЕНИЕ

Явления самоорганизации происходят в отдельных подсистемах и в системе в целом в период её создания как системы, в период выполнения заложенных в неё функций и в период её деградации и гибели. Можно утверждать, что спонтанная реорганизация структуры является необходимым условием поддержания гомеостаза сложных динамических открытых систем в процессе их жизни. При этом возникает вопрос – при постоянном протекании самодвижущихся процессов изменения внутренней архитектуры, можно ли прогнозировать и целенаправленно влиять на направление процесса с целью поддержания свойств системы на требуемом уровне? Субъект, как создатель искусственных систем, выступает в качестве необходимого и доминирующего элемента в общем цикле “жизни” системы. Это даёт основание утверждать, что субъект может и обязан разработать и реализовать через моделирование ситуаций такую интегральную структуру системы, при которой в системе самозарождается определённый набор структурных элементов, который позволяет путём изменения их параметров поддерживать открытую систему в рабочем состоянии. В связи с этим была определена задача – проанализировать механизмы самоорганизации материала конструкции как открытой системы со сложившимися структурными особенностями в процессе ее эксплуатации.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИЙ

Для анализа выделим плоский фрагмент модели структуры материала конструкции как открытой динамической системы, рис.1.

Ограничение по качественному составу элементов структуры связано не с недооценкой роли других структурных составляющих, а с тем, что только реакция активных элементов позволит (или не позволит) проявить свои способности консервативным и метастабильным структурным составляющим.

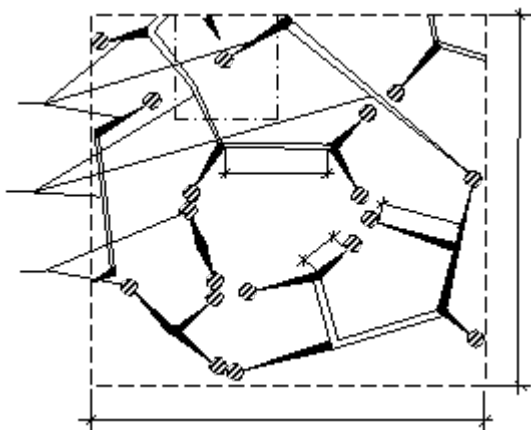


Рис.1. Фрагмент модели структуры конструкции как сложной динамической открытой системы.

1 – технологические трещины (ТТ); 2 – внутренние поверхности раздела (ВПР);

3 – зоны концентрации деформаций и напряжений у устья технологических трещин.

В предложенном фрагменте модели структуры не выделены уровни структурных неоднородностей системы. Это сделано сознательно в предположении, что характерные уровни структурных неоднородностей “самоподобны” по распределению в них активных элементов, что характерно для фрактальных систем [1].

Количество и ориентирование активных элементов в принятой модели характерно для реальных композиций из цементного камня и бетона [2, 3].

Ограничение по количеству уровней структурных неоднородностей связано также с тем, что доступные авторам средства визуализации активных элементов не позволяют их фиксировать на уровне продуктов новообразований. Поэтому из общей модели структуры конструкции вычленен фрагмент модели с двумя уровнями структурных неоднородностей (например, бетон и растворная часть или растворная составляющая и цементный камень). При анализе принято, что представленные на фрагменте модели структуры активные элементы образовались в период становления системы (технологический период) и присутствуют в системе до приложения к ней эксплуатационных нагрузок. Под эксплуатационными нагрузками понимаются нормативные постоянно действующие силовые нагрузки и нагрузки, связанные с изменением состояния среды эксплуатации. Изменение состояния среды эксплуатации предполагает возникновение градиентов температуры, влажности, агрессивное химическое воздействие и т.п. При анализе не выделяется конкретный вид воздействия в предположении, что конструкция, как открытая система, реагирует на любое внешнее воздействие.

Площадь фрагмента модели структуры составляет $S_M = a^2$ (рис.1). В выделенном фрагменте присутствуют ТТ (1) и ВПР (2). Неравномерное распределение деформаций и напряжений вдоль берегов трещины предполагает их концентрацию у устья. Зоны концентрации деформаций и напряжений (3) неравномерно распределены по площади фрагмента.

В работах [3, 4] предложено оценивать поврежденность материала по количеству трещин в единице объема материала; по отношению объема трещин к объему материала, в котором они образовались; по отношению протяженности трещин к площади поверхности образца, на которой они проявились. При этом, как показал проведенный анализ, поврежденность не разделяется на, собственно, трещины и внутренние поверхности раздела. Наличие трещин предполагает, что в системе существуют локальные участки концентрации деформаций и напряжений. Это ведёт к возникновению в материале градиентов деформаций и напряжений. Сами трещины можно представить как нестабильный элемент структуры. Стабильность каждой трещины носит временный характер. Внешние воздействия, которые вызывают деформирование материала, могут вывести трещину из равновесия, что приведёт к её подрастанию. В свою очередь, подрастание отдельных трещин приведёт к очередному этапу перераспределения локальных концентраций деформаций и напряжений. По мере роста отдельных трещин в материале возникает деформационная “волна”, которая, накладываясь на зону концентрации напряжений у устья “законсервированных” трещин, способна их “расконсервировать” и привести к подрастанию. В силу того, что коэффициенты концентрации напряжений определяются, при прочих равных условиях, геометрическими характеристиками трещин, то в первую очередь начнут развиваться трещины, имеющие наибольшую длину на своём уровне структурных неоднородностей. Именно они являются источником нестабильности для данного уровня. Причинами начала развития трещин могут быть напряжения растяжения (K_{Ic}), напряжения сдвига в продольном (K_{IIc}) и поперечном (K_{IIIc}) направлениях [5]. Это связано с тем, что при любом внешнем воздействии деформации и напряжения передаются на берега трещины неравномерно в силу их различного ориентирования друг относительно друга.

Таким образом, сам факт существования трещин делает систему нестабильной, внутренне возбуждённой. При этом нестабильным элементом является трещина, провоцируя возникновение градиентов деформаций и напряжений в окружающем материале.

Для перехода в более равновесное состояние ТТ должна закончить своё существование на данном уровне структурной неоднородности путём потери своих основных отличительных признаков – устья и фронта трещины.

Рассмотрим возможный механизм перехода системы в более равновесное состояние. Для этого из фрагмента модели структуры системы выделим участок *A*, который содержит ТТ и ВПР (рис.2,а).

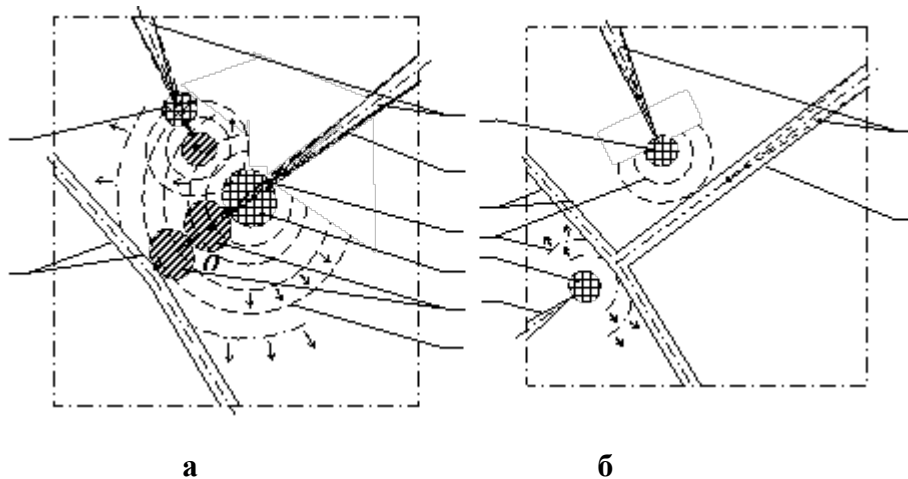


Рис.2. Схема трансформации трещины в ВПР.

а – рост ТТ; **б** – модель структуры после превращения ТТ в ВПР; 1 – ТТ; 2 – берега ТТ; 3 – устье ТТ; 4 – зона концентрации деформаций и напряжений; 5 – продвижение зоны концентрации деформаций и напряжений; 6 – деформационные волны в материале; 7 – берега ВПР; 8 – берега новой ВПР; 9 – подрастающая ТТ.

Приложим к системе воздействия, которые вызывают рост ТТ от начального состояния ($O\tau_0$) через промежуточные ($O\tau_i$) до конечного состояния ($O\tau_K$). По мере роста трещины впереди её устья продвигается зона концентрации деформаций и напряжений, вызывая возникновение “волны” деформаций в материале. Возникающие деформации инициируются естественным для трещины неравномерным их распределением и звуковыми колебаниями, возникающими при увеличении площади берегов растущей трещины (эффект звуковой эмиссии) []. Не исключены ситуации, при которых распространяющиеся деформационные волны попадают в зону концентрации напряжений соседних ТТ. Это может привести к повышению значений коэффициента интенсивности напряжений до критических значений, при которых нарушается равновесие трещины и она сдвигается с места. По мере роста инициируется волна новых деформаций, которая, взаимодействуя с волной деформаций первой трещины, интенсифицирует её необратимый рост.

В момент начала роста ТТ они начинают изменять свои геометрические параметры (увеличиваются длина и площадь поверхности берегов). Таким образом, технологические трещины, как базовый активный элемент структуры, превращаются в эксплуатационные трещины.

Под эксплуатационными трещинами (ЭТ) понимаются несплошности, у которых расстояние между противоположными плоскостями (берегами) намного меньше их длины и противоположные плоскости при смыкании образуют устье и фронт трещины. Эксплуатационные трещины развиваются из ТТ и других несплошностей в материале (например, из пор, капилляров). Они характеризуются длиной, радиусом устья, длиной линии фронта, рельефом берегов. ЭТ относятся к активным элементам структуры, так как они, по определению, сами являются неравновесными, возбуждают в системе градиенты деформаций и напряжений и в одном темпоритме реагируют на внешние воздействия.

Превращение ТТ в ЭТ изменяет структуру материала, но при этом не ведёт к установлению равновесия в системе. Релаксация локального напряжённо-деформационного состояния происходит при выходе ЭТ на берега ВПР. В этом случае трещина теряет свой основной элемент – устье. Энергия, которую трещина подвела к границе раздела, расходуется на увеличение ширины раскрытия бывшей трещины в зоне её выхода на берег ВПР. В системе произошли качественные изменения, связанные с превращением эксплуатационной трещины в новую для системы поверхность раздела. Аналогичные процессы происходят при выклинивании одной трещины на берега другой трещины, что одну трещину превращает в ВПР, а рост другой может приостановиться за счёт нарушения целостности одного из берегов. Завершающий цикл превращения трещины в границу раздела представлен на рис. 2,б.

В результате превращения ТТ в ЭТ и во внутренние поверхности раздела изменяется структура отдельного уровня структурной неоднородности (подсистемы) и системы в целом. В структуре возникают (самозарождаются) новые для системы элементы – структурные блоки, рис.3.

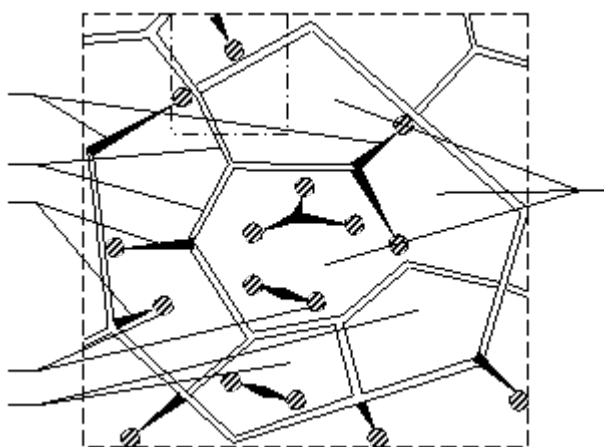


Рис.3. Структурные изменения в модели структуры системы.

1 – ТТ; 2 – ВПР; 3 – зоны концентрации деформаций и напряжений у устья ТТ и ЭТ; 4 – ЭТ; 5 – структурные блоки в завершённом виде; б – незавершённые в своём развитии структурные блоки.

Возникновение структурных блоков связано с превращением эксплуатационных трещин в новые для системы поверхности раздела. Под структурными блоками понимаются дискретные элементы структуры, которые отделены от основного материала данного уровня структурной неоднородности берегами ВПР и берегами ЭТ. Структурные блоки могут быть завершёнными в своём развитии. В этом случае их внешними границами являются берега ВПР. Если часть внешних границ представлена берегами трещин, то такие блоки следует отнести к незавершённым в своём развитии. Структурные блоки могут образовываться на всех уровнях структурных неоднородностей (подсистемах). Это предполагает, что каждый блок содержит характерный для него набор консервативных, метастабильных и активных элементов структуры. Образование структурных блоков на всех структурных уровнях свидетельствует о проявлении явлений самоподобия в динамических системах.

По нашему мнению, возникновение структурных блоков следует отнести к спонтанному проявлению процессов самоорганизации при внешнем подводе к системе энергии. Образование блочной структуры можно отнести к непрерывающемуся процессу структурной адаптации в условиях постоянно действующего внешнего воздействия. Суть непрерывающегося процесса заключается в постоянном образовании дискретных

структур, как на различных уровнях структурных неоднородностей, так и на различных участках на одном структурном уровне. При этом образование каждого структурного блока циклично и связано с дискретными актами изменения параметров трещин и ВПР. Можно заключить, что непрерывность процесса образования структурных блоков определяется дискретными актами изменения параметров активных структурных элементов.

Образование структурных блоков различного вида на разных структурных уровнях способствует диссипации избыточной энергии, связанной с внутренними и внешними факторами. Различные формы и ориентирование блоков друг относительно друга способствуют перераспределению деформаций, возникающих в системе. Изменение ширины раскрытия ВПР и трещин создают условия для “подвижки” блоков и возможного изменения их ориентирования. Идея непрерывной передачи деформаций от одной точки тела к другой для структурируемой среды теряет первоначальный конструктивный смысл. При блочном строении могут возникать локальные деформации, которые гасятся на границах раздела блоков. Часть энергии деформаций тратится на изменение параметров активных элементов структуры, часть – на трансформацию трещин в поверхности раздела, как на внешних границах блока, так и в объёме блока.

Анализ возможных процессов реагирования активных элементов показывает, что они способны самопроизвольно изменять свои параметры, изменяя тем самым структуру отдельных подсистем и самой системы. Это не означает, что внутренняя безопасность системы связана только лишь с самопроизвольным изменением параметров активных элементов структуры. Как уже отмечалось выше, роль активных элементов заключается в адекватном реагировании на внутренние и внешние воздействия – создавать в отдельных подсистемах такую структурную переорганизацию, которая позволяет включить в работу созидательные составляющие метастабильных и конструктивных элементов структуры. Такая задача может быть решена только лишь в случаях создания резерва времени, например, для протекания процессов “самозалечивания” или для проявления свойств адаптации за счёт реакций гидратации реликтовых зёрен цемента [6]. По мнению авторов, необходимый резерв времени может создать только структурная переорганизация, инициируемая изменением параметров активных элементов на различных уровнях структурных неоднородностей. Поэтому, при рассмотрении явлений самоорганизации материала конструкций как открытых динамических систем, основное внимание уделяется спонтанной перестройке структуры за счёт трансформации активных элементов. Это явилось основной причиной принятия, в качестве базовой, модели структуры конструкции в виде определённого набора активных элементов, которые являются необходимыми составляющими, как отдельных подсистем, так и системы в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, явления самоорганизации материала конструкций как открытых динамических систем следует считать объективным процессом. Движущей силой самоорганизации являются неравновесные активные элементы структуры, которые при изменении условий эксплуатации стремятся перейти в более равновесное состояние путём изменения своих параметров. Инициаторами спонтанных процессов перестройки структуры являются активные элементы, которые “закладываются” в отдельные подсистемы и в систему в целом в технологический период её создания. Технологические (остаточные, начальные, генетические, наследственные) трещины и внутренние поверхности раздела выступают в роли инициаторов процессов и явлений самоорганизации при действии на систему всего комплекса эксплуатационных нагрузок. На этом их роль в дальнейшем развитии процессов заканчивается, поскольку они переходят в ранг эксплуатационных активных структурных элементов. Эксплуатационные трещины и внутренние поверхности генетически связаны с технологическими и продолжают участвовать в дальнейших процессах спонтанной структурной “настройки”

системы на безопасную работу в условиях различных внутренних и внешних воздействий. Это направление самоорганизации следует рассматривать в качестве единственно приемлемого. При “неудачном” начальном заложении технологических активных элементов их дальнейшее саморазвитие может привести к преждевременной деградации системы и её гибели. Поэтому, и в этом позиция авторов, при проектировании конструкций следует обязательно учитывать работу материала и, особенно, способность материала адаптироваться через структурную перестройку к условиям эксплуатации конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т Компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
2. Композиционные строительные материалы пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко.–К.: Будивэльник, 1991. – 144 с.
3. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой. – Одесса: Город мастеров, 1998. – 168 с.
4. Соломатов В.И. Кластерообразование композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой // Технологическая механика бетонов. – Рига: РПИ, 1985. – с.5-21.
5. Брок Д. Основы механики разрушения. – М: Высш. шк., 1980. – 368 с.
6. Чернявский В.Л. Адаптация абиотических систем: Бетон и железобетон – Днепропетровск: Изд-во ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2008.– 412 с.