

## РОЛЬ ТРЕЩИН В РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИИ

*Суханов В.Г., Выровой В.Н., Чернега А.С., Елькин А.В., Дорофеев А.В.  
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)*

### ROLE OF CRACKS IN DESTRUCTION OF THE MATERIAL OF THE DESIGN

*Suhanov V.G., Vyrovoy V.N., Chernega A.S., Eljkin A.V., Dorofeev A.V.*

Согласно современным представлениям разрушение конструкций связано с необратимым ростом трещины, которая, как правило, делит конструкцию на отдельные части [1, 2, 3]. Специалисты [4, 5, 6] отмечают определенные этапы «жизни» трещины – от этапа ее зарождения и подрастания до превращения в магистральную с выходом ее фронта на поверхность образца или конструкции. Специфическая роль трещины заключается в способности концентрировать возникающие деформации и напряжения у своего устья, что значительно облегчает процесс роста трещины в среде материала. Предложены методы количественной оценки трещиностойкости (вязкости разрушения) материала путем определения коэффициентов концентрации напряжений [7, 8]. Предложены мероприятия по повышению трещиностойкости различных материалов включая строительные. Сделаны попытки использования критических коэффициентов интенсивности напряжений для оценки долговечности строительных материалов и при расчете конструкций [3, 5, 9]. Приведенные данные достаточно убедительно свидетельствуют о трещине, как основном факторе, определяющем разрушение материалов и конструкций из них.

Ключевые слова: конструкция, поврежденность, разрушение, структура материала.

#### **Введение**

Проведенный нами анализ показал для полиструктурных материалов неизбежность появления трещин на различных уровнях структурных неоднородностей, а также позволил оценить роль трещин в структурном развитии материала, что позволяет стабилизировать свойства конструкции и обеспечивать, тем самым, ее функциональные возможности. Показано, что присутствие трещин вызывает

перманентное неравновесное состояние отдельных подсистем и системы в целом, что способствует структурному развитию системы, увеличению ее структурного разнообразия и, в итоге, переходу в более равновесное и стабильное состояние. Это позволило заключить о созидательной роли трещин в структурном развитии сложных открытых систем, к которым отнесены строительные конструкции. В то же время иной причины разрушения как через необратимое развитие трещин нет. Поэтому была определена задача изучить условия перехода от созидательных трещин к трещинам, вызывающим разрушение композиционных строительных материалов и конструкций.

### **Роль трещин в жизненном цикле материала конструкции**

При анализе следует рассматривать полный цикл существования конструкции, включая активную фазу ее функционирования как сложной открытой системы.

Основное внимание в жизненном цикле конструкции уделено трещинам, т.к. являясь активными элементами структуры на выделенных уровнях структурных неоднородностей (подсистемы) и конструкции в целом (система), они включены в модель материала и конструкции как элементы, существенно влияющие на процессы реорганизации структуры, как для стабилизации свойств системы, так и при необратимых процессах ее разрушения.

Основные периоды жизни конструкции как системы и процессы, которые протекают на каждом этапе, представлены в табл. 1.

Зарождение и развитие технологических трещин в структуре материала происходит на этапе становления и развития системы. Отмечается, что различные механизмы организации структуры каждого уровня неоднородностей ведут к одному результату – появлению технологических трещин. Количество, ориентирование начальных трещин различных подсистем и всей системы определяется исходным составом и интенсивностью протекания физико-механических явлений и процессов, которые участвуют в организации структуры материала. Начало функционирования системы следует считать окончанием периода ее становления. Конструкция вступает в рабочий жизненный цикл с определенным набором технологических трещин на всех уровнях структурных неоднородностей.

Таблица 1

Этапы существования системы	Основные процессы, характерные для каждого этапа жизни системы								
Становление системы	<p style="text-align: center;">Исходная структура (геометрия изделия; распределение заполнителей, цемента, воды)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Комплекс физико-химических и физико-механических явлений и процессов</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Организация структуры различных уровней структурных неоднородностей</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Проявление эффектов эквивалентности</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Технологические трещины</p>								
Функционирование системы	<p style="text-align: center;">Технологические трещины</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 25%;">Трещины-релаксаторы</td> <td style="text-align: center; width: 25%;">Трещины-триггеры</td> <td style="text-align: center; width: 25%;">Трещины-преобразователи и структуры</td> <td style="text-align: center; width: 25%;">Трещины-диссипаторы</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">↓</td> <td style="text-align: center;">↓</td> <td style="text-align: center;">↓</td> <td style="text-align: center;">↓</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Структурные изменения (увеличение степени структурного разнообразия)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Предельные структурные изменения</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Зарождение трещин разрушения</p>	Трещины-релаксаторы	Трещины-триггеры	Трещины-преобразователи и структуры	Трещины-диссипаторы	↓	↓	↓	↓
Трещины-релаксаторы	Трещины-триггеры	Трещины-преобразователи и структуры	Трещины-диссипаторы						
↓	↓	↓	↓						
Гибель системы	<p style="text-align: center;">Магистральные трещины</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Необратимый рост магистральной трещины</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Разрушение конструкции как системы</p>								

В период функционирования конструкции материал, из которого она изготовлена, воспринимает весь комплекс эксплуатационных нагрузок и воздействий. Проведенный анализ [8] позволил определить следующие свойства трещин-созидателей:

- релаксация деформаций и напряжений в материале, примыкающем к берегам трещины (трещины-релаксаторы);
- образование новых площадей поверхности берегов, что способствует включению в работу метастабильных элементов (трещины-триггеры);

- трансформация трещин во внутренние поверхности раздела и наоборот, что ведет к образованию новых структурных элементов-блоков (трещины-преобразователи структуры);
- рассеивание избыточной энергии путем образования новых поверхностей (трещины-диссипаторы).

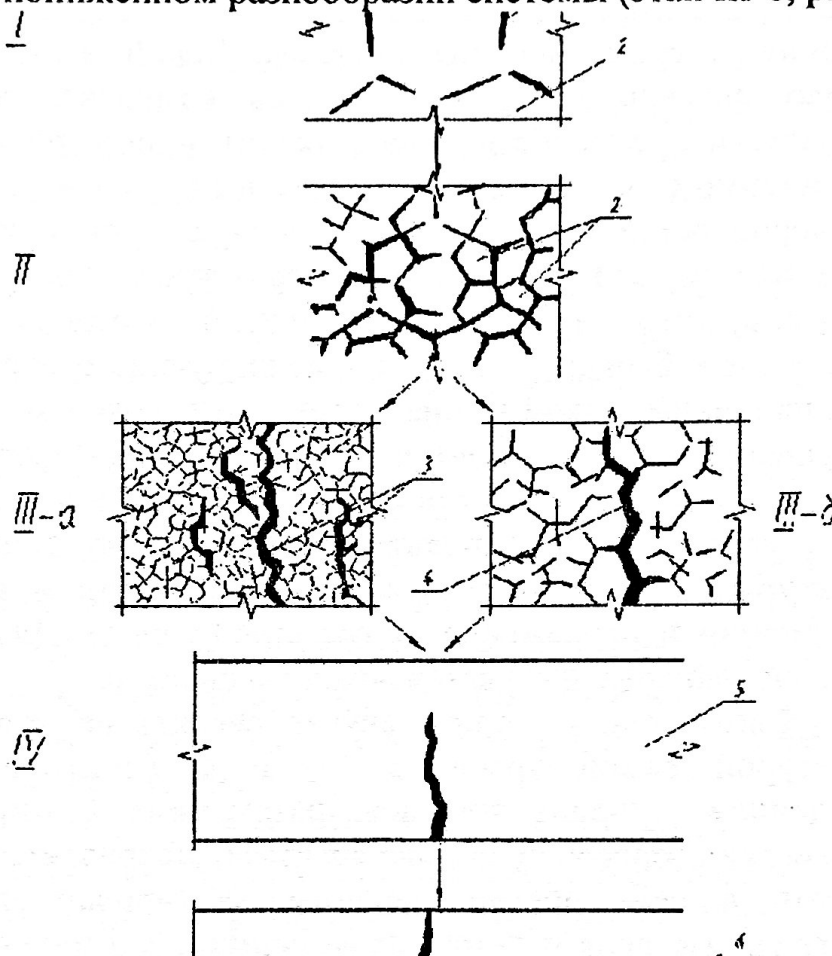
Следует отметить, что перечисленными свойствами обладают не отдельные трещины: каждая трещина, в зависимости от конкретной ситуации, проявляет то или иное из указанных выше свойство. В этом проявляется созидательная роль трещин на каждом уровне неоднородностей (подсистемах) и во всей системе. Происходит постоянная структурная перестройка, которая способствует повышению разнообразия структуры в иерархичных системах. По образному выражению Р. Эшби только разнообразие может уничтожить разнообразие. Однако, по нашему мнению, изменение структурного разнообразия с целью сохранения требуемых параметров свойств имеет свои пределы.

В функционирующей системе может возникнуть ситуация, при которой трещины-созидатели вырождаются в трещины-разрушители, что является предвестником снижения параметров свойств и начала периода гибели системы. Принципиальная схема превращения трещин-созидателей в трещины-разрушители представлена на рис. 1.

В качестве базовой модели принята модель конструкции в виде определенного набора трещин. В процессе действия на систему эксплуатационных нагрузок происходит изменение структуры за счет активного участия в преобразовании трещин-созидателей. В системе образуются отдельные блоки на каждом уровне неоднородностей. При этом не исключены случаи автономной работы каждого структурного блока на соответствующих уровнях неоднородностей. Процессы структурных изменений внутри блоков могут практически не изменять межблочное взаимодействие, что способствует удержанию заданного уровня параметров свойств. В свою очередь, такие внутриблочные структурные изменения вносят свой вклад в общее структурное разнообразие системы (этапы I...II функционирования рис. 1). Благодаря этому система выполняет заложенные в нее функции при постоянно изменяющейся структуре. При достижении определенного критического разнообразия в системе самозарождаются новые активные элементы структуры – трещины разрушения.

В зависимости от вида внешних воздействий и характера начальной структуры причинами зарождения нового элемента могут быть критическое накопление эксплуатационных трещин в единице

объема материала (этап III-а, рис. 1) и образование трещины разрушения при пониженном разнообразии системы (этап III-б, рис. 1).



**Рисунок 1. Принципиальная схема снижения безопасности функционирующей системы**

I...V –этапы функционирования конструкции как системы: I – структурное развитие системы; II – предельное допустимое структурное развитие; III-а – критическое накопление активных элементов в объеме материала конструкции; III-б – слияние активных элементов в трещину; IV – развивающаяся трещина как самостоятельная система (система в системе); V – финал развития трещины.

1 – активные элементы структуры; 2 – структурные блоки; 3 – трещины разрушения, образованные путем объемного накопления активных элементов; 4 – трещины разрушения, образованные за счет слияния эксплуатационных трещин и межблочных поверхностей раздела; 5 – фрагмент конструкции с развивающейся трещиной разрушения (функционирование новой системы в структуре исходной); 6 – разрушенный фрагмент конструкции (гибель новой и старой систем).

И в том и в другом случаях трещины разрушения образуются в основном путем слияния эксплуатационных трещин-созидателей.

По нашему мнению, при достижении критического разнообразия (этапы III-а и III-б, рис. 1) в системе возникает ситуация,

при которой один из элементов структуры берет на себя функцию системы, в которой он возник. Он как бы замыкает «на себя» цель создания и существования системы. Такой элемент структуры в первую очередь воспринимает весь комплекс эксплуатационных нагрузок, что способствует его собственному росту. При размере сопоставимом с размерами отдельных подсистем (структурных неоднородностей) он уже не «чувствует» их структурных особенностей. Это резко снижает структурное разнообразие системы. Процессы, которые неизбежно протекают в отдельных подсистемах, структурных блоках и т.п. для доминирующего элемента структуры несут незначительный вклад. Такой элемент структуры, в нашем случае – трещина разрушения, сам становится системой. Таким образом, трещину разрушения можно рассматривать как открытую динамическую систему.

Открытость предполагает, что трещина своими элементами структуры способна воспринимать, передавать и перераспределять деформации и напряжения окружающей среды. Для такой трещины окружающей средой является исходная система.

Сложность в данном случае связана не только со сложной структурой самой трещины, но и с достаточно сложным ее поведением. Фронт трещины разрушения реагируя на внешние воздействия, способен останавливаться, искривлять свои очертания, вбирать в себя другие трещины, реагировать на локальные и интегральные поля остаточных деформаций. Динамичность трещины как системы предполагает, что каждое последующее ее состояние определяется предыдущим. Новое состояние при этом может отличаться от предыдущего по многим параметрам и показателям. Это предполагает необратимость развития динамической системы в процессе достижения целевой установки.

Целевая установка образовавшейся новой системы, для которой исходная система становится подсистемой, заключается в обеспечении собственного развития.

Трещина как система проходит полный путь своей «жизни» – рождение, активное функционирование и гибель. Гибель трещины как системы наступает тогда, когда исчезают главные ее атрибуты – устье и фронт трещины. Отличие трещин-разрушителей от трещин-созидателей заключается в том, что гибель первых связана с исчезновением фронта при его выходе на поверхность образца, изделия, конструкции и т.п. Гибель трещин-созидателей происходит при выходе их фронта на берега других трещин и поверхностей раздела. В данном случае происходит не столько гибель трещин-

созидателей, а их спонтанная трансформация в качественно другой элемент структуры – внутреннюю поверхность раздела.

В период активной жизни (этап IV, рис.1) для обеспечения собственного приоритетного развития трещина разрушения как система использует все потенциальные возможности базовой системы и ее структурные особенности. К характерным особенностям возникшей трещины-системы можно отнести:

- размер (объем), который включает в себя несколько подсистем базовой системы, и превращает ее, таким образом, в самостоятельную крайне нестабильную систему;
- способность «втягивать» в себя на пути собственного роста другие активные элементы структуры (множественность аттракторов порождает возникновение одного аттрактора);
- способность направленной концентрации энергии в зоны своего развития, что практически исключает влияние структурного разнообразия базовой системы на условия роста новой системы.

При достижении определенного этапа роста новая система способна, используя собственные ресурсы, необратимо развиваться. Она начинает существовать в своем темпоритме, стремясь завершить свое развитие (этап V, рис. 1).

Это ведет к гибели сразу двух систем – новой системы за счет достижения цели своего существования и базовой системы за счет того, что новая система путем своей гибели, привела к потере ее основных функций. На этом завершается жизнь исходной системы за счет завершения роста трещины разрушения

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Трещины разрушения зарождаются в материале конструкции при достижении определенного уровня структурного разнообразия. Их зарождение и развитие связано, как правило, с межблочным взаимодействием каждого уровня структурных неоднородностей.
2. Трещину разрушения следует рассматривать в виде открытой сложной динамичной системы. Целью существования такой системы является собственное развитие. Появление трещин разрушения (магистральных трещин) упрощает структурное оформление базовой системы. Активность новой системы предполагает, что цели новой системы преобладают над целью

функционирования исходной системы. Достижение цели развития трещины как системы приводит к ее гибели и к завершению активной жизни конструкции как системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1981. – 383 с.
2. Лучко І.І. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності/ І.І. Лучко, Г.Т. Сулін, В.І. Кир'ян. Львів: Каменяр, т.6. – 2004. – 885 с.
3. Гузеев Е.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики/ Е.А. Гузеев, С.Н. Леонович, К.А. Пирадов – Брест: БПН, 1999. – 215 с.
4. Финкель В.М. Физика разрушения (рост трещин в твердых телах). – М.: Металлургия, 1970. – 289 с.
5. Зайцев прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной/ Ю.В. Зайцев, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2010. – 362 с.
6. Комохов П.В. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона/ П.В. Комохов, В.П. Попов. – Самара: Изд-во Самарского филиала секции "Строительство" РИА, 1999. – 111 с.
7. ГОСТ 29167-91 Бетоны Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Госстандарт, 1991. – 35 с..
8. Солодкий С.І.Трещиностійкість бетонів на модифікованих цементах. – Львів: ВНУ «Львівська політехніка», 2008. – 144 с.
9. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции: структура, самоорганизация, свойства. – Одесса: «ТЕС», 2010. – 169 с.