

## ОСЦИЛЛЯТОРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА

Гергега А.Н. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

**Запропонована стохастична модель взаємодії осцилюючих компонентів структури композита. Отримані аналітичні вирази для оцінки періоду процесу.**

### **Введение.**

Сложная организация композиционных материалов – результат формирования их структуры в многофакторных синергетических процессах. Создание композита происходит в несколько этапов, имеет сложную эволюционную «траекторию», включает процессы, протекающие на всех масштабных уровнях [1].

Если понимать структуру как модельное описание, в котором устанавливается закон эволюции исследуемой системы и порядок в распределении характерных величин [2, 3], то внутренние границы раздела материала (ВГ) – фрактальные поверхности, разделяющие разнородные части тела – можно рассматривать как её атрибутивную составляющую [4].

Включение ВГ в состав структурных параметров материала имеет несколько аспектов. Во-первых, материал представляет собой сложную систему, и, следовательно, *должен* иметь внутренние границы, существование которых является общесистемной закономерностью, и возникновение которых следует рассматривать как механизм реализации одной из её целевых функций – сохранение целостности [5, 6]. Кроме того, ВГ являются неизбежным следствием процессов организации структуры тела, обусловлены произвольностью формы и несоразмерностью кластеров и макроскопических структурных блоков, возникают в ходе становления материала и развиваются под действием внешних влияний и внутренних факторов.

### **Фрактальный характер структуры композита.**

Условия нарушения однородности спонтанно возникают в различных участках тела. Когда степень неоднородности материала достаточно возрастает, и появляются коллективные эффекты, – возникает качественно новый этап его эволюции. Когерентное взаимодействие между соразмерными элементами структуры – неоднородностями одного масштабного уровня – приводит к возникновению конфигураций, играющих роль исходных элементов для структуры более высокого уровня [7, 8]. Это провоцируют инфляцию структуры, а значит, способствуют росту неоднородности текстуры материала, приводит к возникновению иерархической соподчинённости, и как следствие, генерации принципиально иных структур.

Материал и внутренние границы – взаимообусловленные и совместно развивающиеся кластерные системы. Перераспределяя деформации в материале, ВГ эволюционируют, изменяя характерные размеры и осваивая новые масштабы, тем самым, модифицируя материал.

Поля деформаций, как известно, существенно зависят от конфигурации неоднородностей. В случае квазилинейных ВГ, (интересующих нас в первую очередь), значения компонентов тензоров деформаций пропорциональны  $r^{-1}$  [9], и, следовательно, на сравнительно больших расстояниях, многократно превышающих межатомные, их действие может быть существенным.

Ориентации линейных неоднородностей (ЛН), возникающих на ранней стадии образования материала, конечно, неслучайны, но и не скоррелированы. По мере роста их плотности, в ориентации вновь формирующихся ЛН возникает преимущественное

направление: поля деформаций активизируют генерацию параллельных, и в наименьшей степени препятствуют их росту в перпендикулярном направлении. Таким образом, рост ЛН происходит преимущественно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и возникает характерная закономерность в расположении эквимасштабных трещин.

Это усугубляет анизотропию, приводит к возникновению самоаффинного мультифрактального узора трещин и внутренних границ, *простейшими* аналогами которого, соответственно, на плоскости и в объёме, могут быть модифицированные с помощью аффинного отображения фракталы типа ковра Серпинского, губки Менгера и их дополнений, а также другие подходящие по форме фракталы [10, 11]. Важно, что они с очевидностью позволяют учесть и такой важный аспект процесса как *множественность* очагов зародышеобразования новых структурных элементов.

Если система ВГ находится вблизи точки структурного фазового перехода, то из-за больших размеров кластеров её геометрические характеристики не зависят от природы вещества, обладают универсальными свойствами, а результаты перехода отличаются в зависимости от структуры и свойств бесконечного кластера, по сути, определяющего новое состояние вещества [12-15].

Эти кластеры определяют широкий спектр физико-химическим и механических характеристик тела: прочность, процессы переноса, коррозионную устойчивость, долговечность и другие. В рамках перколяционного подхода получают объяснение аномалии процессов переноса, причудливость формы и фрактальность границ их фронта. Всё это позволяет рассматривать бесконечный кластер ВГ как источник изменений свойств материала, выделяет его в самостоятельный объект исследования.

### **Осциллирующее взаимодействие разномасштабных структур.**

Силовое поле расположенных случайным образом квазипараллельных ЛН представляет собой сложную интерференционную картину. Один из возможных механизмов взаимодействия структурных неоднородностей, освоения других масштабов также связан с интерференцией.

Когда в некоторой области материала поля эквимасштабных трещин складываясь, образуют локальные области с величиной деформации, превышающей среднее значение, это создаёт энергетические предпосылки для образования более крупных линейных неоднородностей. Статистическое самоподобие в расположении границ приводит к некой «кратности» в конфигурации полей, проецируют этот механизм на всё большие масштабы, охватывая значительное пространство, создаёт всё более крупные трещины и границы раздела. В свою очередь, более мощные поля деформаций крупных ЛН, воздействуя на неоднородности меньших масштабов, провоцируют их дальнейший рост. Это происходит синхронно во всех масштабах, обнаруживает взаимообусловленность и взаимовлияние различных уровней структурных неоднородностей, существование положительной обратной связи и осциллирующее взаимодействие между линейными неоднородностями разных структурных уровней. Рассмотрим эти процессы как быстро затухающую твердотельную колебательную реакцию.

Пусть физическое тело представляет собой колебательную систему в указанном смысле. Это автономная распределённая неконсервативная система с затухающими ангармоническими колебаниями. Если предположить, что в системе действует обобщённая сила сопротивления, пропорциональная скорости распространения энергии в системе между линейными неоднородностями разных масштабных уровней, то уравнение движения будет иметь стандартный вид

$$x'' + 2\gamma x' + \omega^2 x = 0,$$

где  $\gamma$  – обобщённый коэффициент затухания,  $\omega$  – циклическая частота.

Оценим условный период  $T$  таких колебаний [16] для системы линейных неоднородностей прямоугольного параллелепипеда. Введём величину, обратную коэф-

коэффициенту жёсткости тела – податливость  $C = 1/k$ , которая определяет сколь далеко по масштабам может распространиться процесс трещинообразования, и для которой существует расчётная формула

$$C = 8a^3 / (E h^3 b),$$

где  $a$  – длина трещины,  $h$  – расстояние от неё до края тела,  $b$  – толщина пластины,  $E$  – модуль Юнга [17]. Предполагая  $\gamma$  малым, имеем  $\omega^2 \approx \omega_0^2 = 1/(m \cdot C)$ , тогда

$$T = 4\pi (2a^3 m / E h^3 b)^{1/2},$$

где  $m$  – масса тела.

Другую оценку условного периода можно получить, определив логарифмический декремент затухания через последовательные (с интервалом в период) значения энергии системы  $W_n$  [16, 18],

$$T = (1/\gamma) \cdot (W_n - W_{n+1}) / (W_n + W_{n+1}).$$

### **Формальная стохастическая модель взаимодействия структурных уровней.**

Пусть структура материала представляет собой открытую динамическую систему с тремя взаимодействующими масштабными уровнями неоднородностей, и её эволюция описывается системой билинейных итерационных уравнений [19]

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n - k_{px} p x_n^2 + k_{yx} q y_n^2 + x_{in} \\ y_{n+1} = y_n + k_{py} p x_n^2 - (k_{yx} + k_{yz}) q y_n^2 + k_{zy} r z_n^2 \\ z_{n+1} = z_n + k_{yz} q y_n^2 - (k_{zy} + k_{oz}) r z_n^2 \end{cases}$$

где  $x, y, z$  – динамические переменные, определяющие потенциальную энергию уровня, а  $x_{in}$  – энергию внешнего воздействия. Коэффициенты  $k_{ij}$  задают долю переходящей между неоднородностями разных масштабов энергии, а коэффициенты  $p, q, r$  – долю утилизируемой для перестройки энергии, причём,  $\{k_{ij}\}$  и  $\{p, q, r\} \in (0, 1)$ ,  $\{x, y, z\} \in R$ . Отметим, что определение значений этих коэффициентов для конкретного материала является предметом отдельного исследования.

Характер эволюции такой системы зависит от интенсивности подвода энергии и особенностей строения материала [19, 20]. В системе либо возникает каскад бифуркаций удвоений периода, и реализуется сценарий Фейгенбаума [21, 22] перехода к хаосу, либо после периодического режима возникает ситуация, аналогичная бифуркации Хопфа [22, 23], приводящей к возникновению квазипериодического режима. Помимо рассмотренных сценариев развития хаоса в системе могут наблюдаться их комбинации, когда хаотическое поведение системы на какой-то промежуток времени сменяется периодическим.

### **Выводы**

Предложенный подход даёт возможность рассматривать материал как самоорганизующуюся динамическую систему с характерным взаимодействием структурных неоднородностей. Математическая модель взаимодействия разномасштабных структур сформулирована как универсальная, и является одним из возможных инструментов исследования эволюции систем любой природы, которые состоят из взаимодействующих по произвольным законам подсистем.

Исследование особенностей колебательной составляющей многофакторных процессов генезиса внутренних границ и анализ поврежденности поверхности материала демонстрирует статистическое самоподобие структуры в различных масштабах, указывает на инфляционно-дефляционный характер её развития.

### **Summary**

**The oscillate interactions model of a composite structure components is offered. Analytical expressions for an estimation of the process period are received.**

## *Литература*

1. Герега А.Н., Выровой В.Н., Суханов В.Г. Особенности кластерной организации строительных композитов. //Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – № 33. – С. 172-180.
2. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 420 с.
3. Змитренко Н.В., Михайлов А.П. Инерция тепла. – М.: Знание, 1982. – 62 с.
4. Герега А.Н., Выровой В.Н. Компьютерное моделирование внутренних границ раздела как элементов структуры материала. /Сборник трудов конференции «Моделирование-2008» ИПМЭ им. Г.Е. Пухова. – Киев, 2008. – С. 195-199.
5. Уёмов А.И. Системы и системные параметры. /Проблемы формального анализа систем. – М.: Высшая школа, 1968. – 170 с.
6. Берталанфи Л. Общая теория систем: критический обзор. / Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23-82.
7. Олемской А.И., Складар И.А. Эволюция дефектной структуры твёрдого тела в процессе пластической деформации. //УФН – 1992. – Т. 162, № 6. – С. 29-79.
8. Панин А.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
9. Косевич А.М. Физическая механика реальных кристаллов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 328 с.
10. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 128 с.
11. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: ИКИ, 2002. – 656 с.
12. Соколов И.М. Размерности и другие критические показатели в теории протекания. //УФН – 1986. – Т. 150, вып. 2. – С. 221- 255.
13. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
14. Trugman S.A., Weinrib A. Percolation with a threshold at zero: a new universality class. //Physical Review B. – 1985. – V. 31, N. 5. – P. 2974 - 2980.
15. Герега А.Н., Выровой В.Н. Управление свойствами композиционных материалов. Перколяционный подход. //Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2005. – № 20 – С. 56-61.
16. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. – М.: Наука, 1972. – 470 с.
17. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
18. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
19. Герега А.Н., Лозовский Т.Л. Моделирование самоорганизации динамических дисперсных систем. I. Спонтанная организация двухфазного потока. //Электронное моделирование. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 3-12.
20. Асланов А.М., Герега А.Н., Лозовский Т.Л. Две модели стохастических процессов в центробежных фильтрах с обратными связями. //Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, вып. 6. – С. 134-135.
21. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем. //УФН – 1983. – Т. 141, вып. 2. – С. 343 - 374.
22. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
23. Лихтенберг А., Либман М. Регулярная и стохастическая динамика. – Череповец: Меркурий-пресс, 2000. – 528 с.