

Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов

© В.Л. Гиляров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Vladimir.Hilarov@mail.ioffe.ru

Проанализированы основные положения кинетической концепции С.Н. Журкова в свете современных представлений о самоорганизации нелинейных систем в неравновесных условиях. Отмечено, что конечное состояние перед разрушением может быть описано в рамках модели самоорганизованной критичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-05-64831.)

Основным положением кинетической концепции [1,2] С.Н. Журкова является, как известно, положение о том, что разрушение твердых тел не является критическим событием, которое наступает когда какие-то внешние параметры (как правило, различные комбинации компонент тензора напряжений) достигают предельных значений. Напротив, согласно этой концепции, разрушение представляет собой кинетический процесс, идущий в пространстве и времени. Экспериментальная база кинетической концепции чрезвычайно широка и включает материалы различной химической природы и физического строения: полимеры, металлы, щелочно-галлоидные кристаллы и т.д. Причем для всех этих материалов в широком диапазоне внешних параметров (температура и нагрузка) процесс описывается единой закономерностью, хорошо известной как формула Журкова, для долговечности материалов τ

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}},$$

где U_0 — энергия активации процесса; τ_0 — предэкспоненциальный множитель, равный по порядку величины периоду тепловых колебаний атомов; γ — структурно-чувствительный коэффициент (активационный объем); σ — внешнее приложенное напряжение (предполагается одноосное нагружение).

С момента своего появления физическая трактовка формулы Журкова была весьма неоднозначной. С одной стороны, единая закономерность описания могла предполагать некий универсальный механизм разрушения независимо от структуры и свойств материала, которые фигурируют в формуле Журкова лишь как параметры — энергия активации и активационный объем. С другой стороны, в процессе деформирования и разрушения материала происходит существенная эволюция его структуры, причем на каждом этапе этой эволюции действуют свои кинетические законы, из которых система выбирает лидирующий [3].

Во всех случаях твердое тело при приложении к нему механической нагрузки за пределом упругого диапазона представляет собой неравновесную систему, стремящуюся путем эволюции дефектной структуры минимизировать это внешнее приложенное к нему воздействие.

В связи с этим предпринимались многочисленные попытки описать процессы деформации и разрушения материалов в рамках термодинамики необратимых процессов. Перестройки структуры при таком описании происходят, когда внешний параметр (температура, нагрузка) достигает некоторого критического значения — точки бифуркации — и носят характер кинетического фазового перехода. Между точками бифуркации образовавшиеся диссипативные структуры остаются устойчивыми. Таким образом, критическая точка, в которой происходит перестройка структуры, достигается специальной „подстройкой“ внешних параметров.

Другой вид самоорганизации диссипативных структур, получивший название самоорганизованной критичности (СОК), был теоретически описан в 1987 г. Баком, Тангом и Визенфельдом [4,5]. В качестве его наглядной иллюстрации часто используется метафора с кучей песка. Рассматривается песчаная куча, на которую медленно насыпают зерна песка. Пока куча остается достаточно пологой, происходит лишь увеличение крутизны ее склона за счет скатывания кластеров песчаных зерен вниз. Если разница высот соседних плато z_n превышает критическую величину, система становится неустойчивой, и образуется лавина. Процесс продолжается до тех пор, пока все величины z_n не станут равными критическому значению. Когда крутизна склона достигает критического значения, картина качественно меняется. Количество скатывающегося вниз песка (лавины) может быть самым разнообразным, т.е. система становится масштабно инвариантной. Наклон, достигший критического значения, далее не меняется и сохраняет это критическое значение. Распределение лавин по масштабам и спектр плотности мощности системы становятся степенными, т.е. система обладает масштабной инвариантностью как в пространстве, так и во времени. Модель с кучей песка чисто метафорична, реальная динамика таких систем может быть весьма разнообразной.

Можно выделить следующие основные свойства самоорганизованного критического состояния [6]:

- 1) Неравновесность системы.
- 2) Наличие огромного количества метастабильных состояний, число которых экспоненциально растет с размером системы.

- 3) Нелинейность внутренней динамики системы.
- 4) Пространственная масштабная инвариантность, приводящая к фрактальному пространственному самоподобию.
- 5) Временная масштабная инвариантность: частотный спектр системы представляет собой фликкер-шум.
- 6) Независимость этого явления от начальных условий, что характерно для нелинейной динамики.
- 7) Реализация этого явления в широком диапазоне внешних управляющих параметров.

Последнее свойство качественно отличает СОК от других явлений подобной природы. Можно выделить четыре основных вида самоорганизации нелинейных систем. К первому виду относится самоорганизация при фазовых переходах. Действительно, для фазовых переходов характерна пространственно-временная масштабная инвариантность, однако переход происходит в критической точке, когда внешний параметр (например, температура) достигает своего критического значения. Аналогично происходит и самоорганизация при геометрических фазовых переходах (перколяционных), когда достигается критическое значение вероятности заполнения ячейки (порог перколяции). Самоорганизация третьего вида (диссипативные структуры) происходит в точке бифуркации, т.е. опять некоторый внешний параметр (градиент температуры в классической задаче Бенара) достигает критического значения. Для СОК же не требуется никакой специальной „подстройки параметра“.

С самого момента появления модели СОК ее стали применять для описания разрушения твердых тел, особенно для построения моделей землетрясений в земной коре. Действительно, закон Гуттенберга–Рихтера

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

показывает, что распределение землетрясений обладает масштабной инвариантностью по шкале магнитуд в широком ее диапазоне. Здесь N — число землетрясений с магнитудой больше, чем M , а a и b — коэффициенты. Это позволяет предполагать, что землетрясениям присущи свойства СОК. В основу геофизических моделей землетрясений при этом закладываются динамические модели с заторможенным скольжением (stick-slip). Примеры таких моделей приведены на рис. 1.

Прямоугольниками здесь обозначены массивные блоки массы m , движущиеся с зависящим от скорости трением по шероховатой поверхности и связанные между собой гармоническими пружинами (a, b). В моделях типа Френкеля–Конторовой роль этих блоков играют точечные массы m , движущиеся по синусоидальному рельефу подложки (c, d). Эти блоки могут быть связаны с подвижной поверхностью торсионными пружинами (модели a и d). Система выводится из равновесия посредством приложения бесконечно малой скорости v либо к верхней поверхности, либо непосредственно к первому блоку (точечной массе).

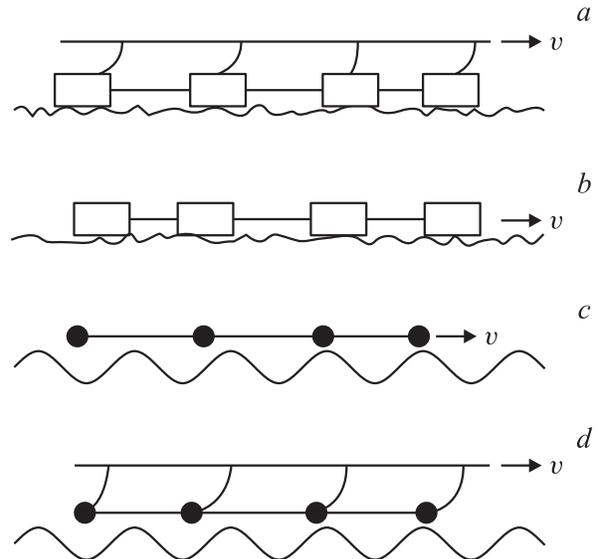


Рис. 1. Четыре динамические модели землетрясений с заторможенным скольжением (stick-slip). a — модель [7,8], b — модель [8], c — модель Френкеля–Конторовой [6], d — модифицированная модель Френкеля–Конторовой [6]. В моделях b и c СОК реализуется, а в моделях a и d нет.

Нелинейная динамика этих моделей сводится к следующему [6]. За счет движения верхней поверхности (или первого блока) увеличивается нагрузка на каждом из остальных блоков. Когда она превзойдет силу сухого трения, блок начнет двигаться с ускорением, так как сила кинематического трения значительно меньше силы сухого трения. Далее за счет сил взаимодействия блок тормозится и останавливается, так как сила сухого трения обычно превосходит равнодействующую сил взаимодействия. За счет взаимодействия ближайших соседей соседние блоки тоже могут начать двигаться. Это может привести к „землетрясению“, которое в определении модели представляет собой скольжение всей цепочки в целом. Мощность этого „землетрясения“ определяется по сумме смещений

$$S = \sum_{j=1}^N |x_j^{\text{after}} - x_j^{\text{before}}|. \quad (2)$$

В рассмотрение вводится также длина проскальзывания L , равная числу блоков, участвующих в акте скольжения. Строятся пространственные и временные распределения этих параметров в логарифмических координатах. Если при увеличении размера системы загиб прямого участка (масштабно-инвариантного) также смещается в сторону больших размеров, это свидетельствует о присутствии СОК в модели.

Хорошо известно, что поверхности разрушения твердых тел не являются идеально плоскими и обладают фрактальной размерностью. Эксперименты по исследованию фрактальной размерности поверхностей разрушения были проведены для очень широкого спектра материалов, испытываемых как хрупкое, так и пластическое

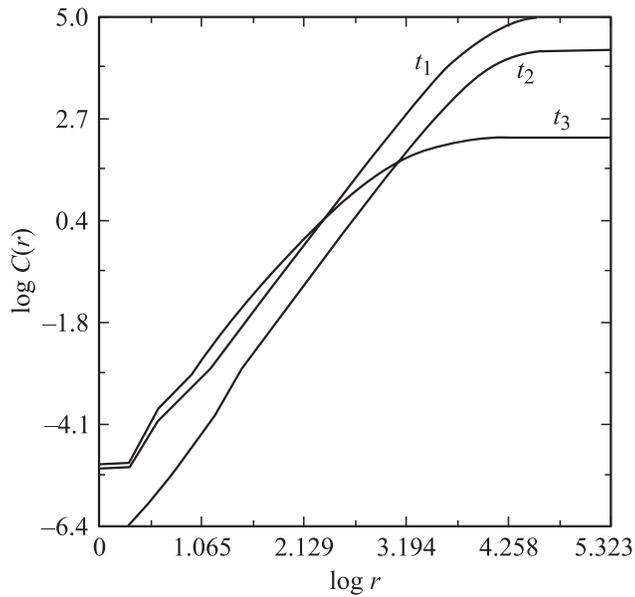


Рис. 2. Пространственный коррелятор Грассбергера–Прокачки для акустического шума, обусловленного трещинообразованием на разных стадиях процесса разрушения $t_1 < t_2 < t_3$.

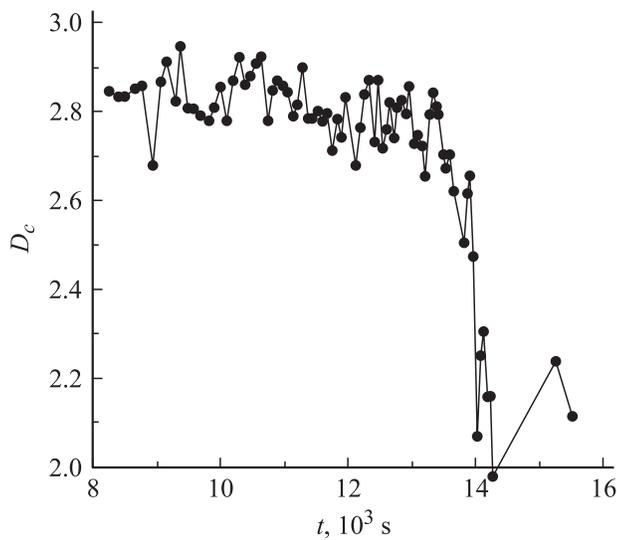


Рис. 3. Временная зависимость корреляционной фрактальной размерности D_c для акустического шума, обусловленного трещинообразованием в граните Westerly.

разрушение. Такое масштабно-инвариантное состояние поверхностей разрушения позволяет предполагать, что эти поверхности появились в результате действия универсального механизма разрушения, и этим механизмом является нелинейная динамика с образованием СОК.

Для проверки этой гипотезы в [9,10] были обработаны банки данных по акустической эмиссии, возникающей при разрушении лабораторных гранитных образцов и стальных промышленных металлоконструкций при воздействии на них механического напряжения. Эти банки данных содержали времена, амплитуды и иногда координаты

наты от образующихся в процессе разрушения трещин. Исследовались пространственные и временные корреляторы на предмет выявления нетривиальных масштабно-инвариантных зависимостей, которые проявляются как степенные зависимости этих корреляторов, и определялись соответствующие им скейлинговые показатели.

В качестве пространственного коррелятора выбирались пространственные корреляционные функции Грассбергера–Прокачки

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r - r_{ij}). \quad (3)$$

Эти функции по своему физическому смыслу представляют собой количество пар трещин, расстояние между которыми r_{ij} не превосходит r . $H(x)$ здесь представляет собой функцию Хевисайда, N — число событий. Коррелятор демонстрирует ярко выраженные масштабно-инвариантные свойства, проявляющиеся в линейности функции, построенной в логарифмических координатах на разных стадиях процесса разрушения (рис. 2).

По наклону прямой определяется корреляционная фрактальная размерность (ФР) D_c , которую можно построить как функцию времени (рис. 3).

На начальных стадиях процесса разрушения ФР приближенно совпадает с размерностью $3d$ пространства, в то время как при приближении к разрушению ФР приближается к размерности поверхности разрушения.

Для изучения временных скейлинговых свойств системы на стационарных участках процесса различными методами были рассчитаны спектры плотности мощности сигналов

$$K(t_1, t_2) = \langle x(t_1)x(t_2) \rangle,$$

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\Delta t) \exp(i\omega\Delta t) d\Delta t, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad (4)$$

где в качестве случайной величины x можно выбирать либо амплитуды сигналов, либо паузы между ближайшими сигналами. Оказалось, что рассчитанный спектр плотности мощности на конечных стадиях разрушения носит $1/f$ характер ($S(\omega) \propto \omega^{-\beta}$, $\beta \approx 1$), как того и требует условие самоорганизованной критичности.

Таким образом, и пространственные, и временные корреляторы показали ярко выраженные масштабно-инвариантные зависимости, образующиеся на конечной стадии процесса, что свидетельствует о том, что по крайней мере для изученных материалов состояние материала перед разрушением удовлетворяет условиям СОК. Это иллюстрирует рис. 4, на котором приведены временные зависимости как пространственного, так и временного скейлингового показателей в двух экспериментах. Хорошо видно синхронное изменение пространственного и временного скейлинга при приближении к моменту разрушения образца. Усиление низкочастотной составляющей акустического шума по мере приближения к разрушению материала свидетельствует

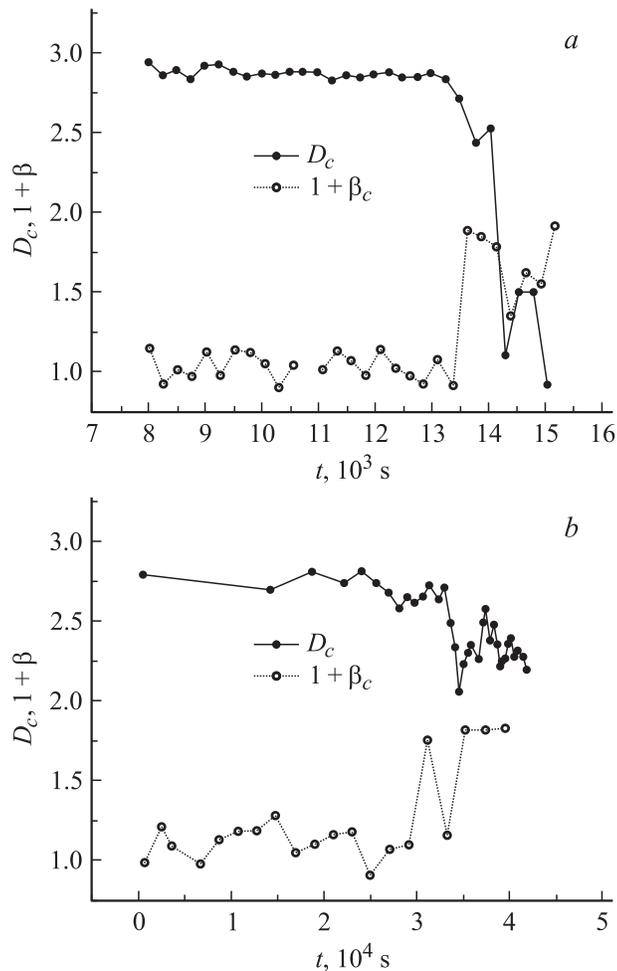


Рис. 4. Временные зависимости пространственного и временного скейлинговых показателей в двух различных гранитах.

о возрастании роли крупномасштабных флуктуаций на конечной стадии процесса. Этой проблемой С.Н. Журков занимался в последние годы жизни.

Ситуация с образованием СОК в результате процесса разрушения аналогична той, которая сложилась с кинетической концепцией С.Н. Журкова. Существует ли единый механизм разрушения материалов? Тот факт, что конечным предразрывным состоянием материала может быть состояние СОК, статистические свойства которой определяются фундаментальными пространственно-временными характеристиками, а не микроструктурой материала, свидетельствует в пользу такой гипотезы. При этом в процессе разрушения в материале происходит эволюция дефектной структуры на все более и более высоких масштабных уровнях, в результате которой материал исчерпывает все имеющиеся возможности сопротивления разрушению. Тогда и происходит потеря всех характерных пространственных и временных масштабов дефектной структуры, и образуется СОК. С другой стороны, сегодня нет единого взгляда на то, что процесс образования СОК идет одинаково во всех материалах. Это связано с тем, что нельзя однозначно

сказать, являются ли скейлинговые показатели, определяющие масштабно-инвариантные свойства (в частности фрактальная размерность разрушения), универсальными константами или эти величины зависят от свойств конкретного материала. Разброс экспериментально измеренных фрактальных размерностей для поверхностей разрушения слишком велик, чтобы свидетельствовать в пользу некоего единого механизма с независимыми от свойств материала скейлинговыми показателями. Эти вопросы нуждаются в дальнейших исследованиях, особенно в связи с физическим обоснованием концепции С.Н. Журкова.

Список литературы

- [1] С.Н. Журков. Вестн. АН СССР 3, 46 (1968).
- [2] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М. (1974). 560 с.
- [3] В.Л. Инденбом, А.Н. Орлов. ФММ 43, 469 (1977).
- [4] P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld. Phys. Rev. Lett. 59, 4, 381 (1987).
- [5] P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld. Phys. Rev. A 38, 364 (1988).
- [6] F.J. Elmer. In: Physics of Sliding Friction / Ed. B.N.J. Persson, E. Tosatti. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1996).
- [7] J.M. Carlson, J.S. Langer. Phys. Rev. A 40, 6470 (1989).
- [8] R. Burridge, L. Knopoff. Bull. Seismol. Soc. Am. 57, 341 (1967).
- [9] В.Л. Гиляров. ФТТ 36, 8, 2247 (1994).
- [10] V.L. Hilarov. Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. 6, 337 (1998).