

УДК 539.2

©1994

ФЛИККЕР-ЭФФЕКТ, ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАЗРУШАЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ И ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ

В.Л.Гиляров

Проведен анализ данных акустической эмиссии с целью изучения спектральных и фрактальных корреляционных свойств разрушающихся материалов (металлоконструкций и гранитных образцов). Показано, что в момент разрушения в материале образуется фрактальная структура трещин, генерирующая $1/f$ акустический шум.

Любая физическая система, состоящая из большого числа подсистем, всегда испытывает флуктуации физических параметров, которые могут оказывать существенное влияние на ее поведение. Проявляясь в любых измерениях, проводимых над системой, флуктуации носят характер шумов, накладывающихся на физические сигналы, определяющие параметры системы. В тех случаях, когда поведение системы определяется флуктуациями ее параметров, как это бывает, например, вблизи точек фазовых переходов, исследование шумовых свойств системы становится принципиальным.

Не менее важным представляется изучение шумовых свойств твердотельных систем в процессе их механического нагружения, когда существенную роль могут играть тепловые разрушающие флуктуации [1]. Разрушение твердых тел сопровождается целым комплексом идущих во времени флуктуационных процессов, таких как механолюминесценция, акустическая и электронная эмиссия и др. Изучение статистических свойств этих процессов представляет значительный интерес в связи с практической проблемой прогнозирования разрушения. В настоящей работе проведено исследование спектральных и фрактальных корреляционных свойств процесса акустической эмиссии при разрушении лабораторных образцов из гранита, а также заводских металлоконструкций.

Важнейшей характеристикой случайного (шумового процесса) является его автокорреляционная временная функция

$$K(t_1, t_2) = \langle x(t_1)x(t_2) \rangle, \quad (1)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю. В случае стационарных случайных процессов, для которых $x(t + \tau) = x(t)$, функция K зависит лишь от разности аргументов $t_1 - t_2$. Следует отметить, что процесс разрушения не является, как правило, стационарным на

всем своем протяжении, однако может быть разбит на стационарные участки в том случае, когда время τ будет меньше характерного времени изменения процесса. Основное внимание в настоящей работе нами уделялось спектральной плотности процесса

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau, \quad (2)$$

которая оказывается удобной благодаря ее непосредственной измеримости, по крайней мере в радиотехнике [2,3]. Можно показать, что

$$S_x(\omega) = \frac{\langle x^2(t) \rangle_{\omega}}{d\omega}, \quad (3)$$

где $\langle x^2(t) \rangle_{\omega}$ есть средняя плотность мощности на частоте ω . Тогда для измерения $S_x(\omega)$ достаточно измерить квадратичным детектором среднюю плотность мощности, пропуская сигнал через узкополосный усилитель с полосой пропускания $d\omega$, настроенный на частоту ω . Заметим, что, зная спектральную плотность процесса, флуктуации в системе можно определить простым интегрированием

$$\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Для определения спектральной плотности шумового процесса мы обрабатывали банки данных по акустической эмиссии при разрушении образцов и металлических конструкций под действием механической нагрузки. Эти банки представляли собой значения амплитуд акустоэмиссионных сигналов от образующихся трещин как функции времени на серии пьезоэлектрических датчиков, установленных на поверхности испытываемых образцов и конструкций. Техника подобных экспериментов хорошо известна и здесь не описывается. Экспериментальные подробности об одном из использованных нами банков данных можно найти в [4]. Помимо значений амплитуд в одном из использованных нами экспериментов был проведен расчет координат источников излучения на основании формул вида

$$\Delta r_i = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0| = c(t_i - t_0) = c\Delta t_i, \quad (5)$$

где Δr_i — расстояние от источника до i -го приемника; Δt_i — время распространения луча от источника до i -го приемника; c — скорость звука в среде, предполагающаяся, как правило, константой материала.

В качестве основной случайной величины нами выбирались паузы между приходами сигналов на приемник или эквивалентная этой величине эмиссионная активность — число сигналов, пришедших на приемник за единицу времени. Для этих величин численно рассчитывался коррелятор вида (1) для выборки в 1024 или 2048 сигналов

в области стационарности процесса и вычислялся Фурье-спектр этого коррелятора (2), представляющий собой спектральную плотность процесса. Такого рода расчеты производились на различных этапах процесса разрушения образцов или конструкций.

Полученные нами результаты сводятся к следующему. На начальной стадии процесса разрушения частотная зависимость спектральной плотности пауз в потоке трещинообразования имеет вид белого шума. По мере развития процесса характер шума меняется: в низкочастотной области наблюдается заметный подъем, становящийся наиболее ярко выраженным к моменту разрушения. Будучи построенным в логарифмических координатах, этот подъем имеет характер $1/f$ шума (рис. 1, *a, b*). Для образца из гранита тангенс угла наклона составляет 0.98, а для металлической конструкции — 1.01. Эти значения получены линейной аппроксимацией спектра в низкочастотной области методом наименьших квадратов. Аналогичные результаты были получены нами в том случае, когда в качестве характеристики случайного процесса использовались амплитуды акустоэмиссионных сигналов, однако вследствие значительно меньшей точности из измерения погрешность расчета значительно возростала.

Наличие низкочастотной составляющей в акустическом спектре сигналов перед разрушением материалов, конструкций, а также перед землетрясениями хорошо известно, однако особенность $1/f$, означающая временно́е самоподобие процесса, до сих пор не наблюдалась.

Согласно представлениям [5,6], универсальность $1/f$ шума, проявляющаяся в разнородных процессах природы, позволяет предполагать, что он является отражением внутренней нелинейной динамики самоорганизации пространственных динамических систем с формирующимися в них масштабнo инвариантными метастабильными структурами, трансформирующимися в процессе эволюции.

С этой точки зрения представляло значительный интерес исследовать фрактальные структуры трещин, образующихся в процессе разрушения материалов и конструкций в поле механических напряжений. Хорошо известно [7,8], что образующаяся в результате раскола материала поверхность является существенно фрактальной (или во всяком случае самоафинной). Это позволяет предположить фрактальный характер накопления повреждений в материале при его механическом нагружении, по крайней мере на поздних стадиях процесса разрушения.

Для этой цели нами была рассчитана корреляционная фрактальная размерность Грассбергера и Прокаччи [9] для банка данных акустической эмиссии разрушения гранитного образца, который содержал координаты источников акустических сигналов, связанных с трещинообразованием. Эти координаты рассчитывались по формулам типа (5) и позволяли локализовать лишь небольшое (порядка 10%) количество источников. По нашему мнению, это связано с тем, что лучевая модель прохождения звука в однородной среде, заложенная в (5) не отражает реальной картины распространения акустических волн в дефектном материале.

Для определения корреляционной фрактальной размерности нами была рассчитана корреляционная функция Грассбергера-Прокаччи вида

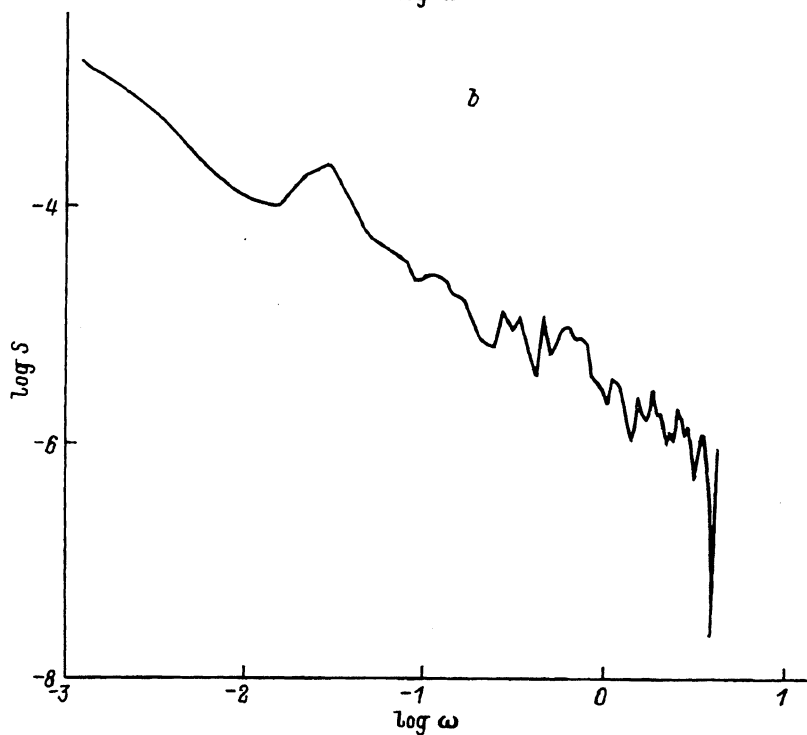
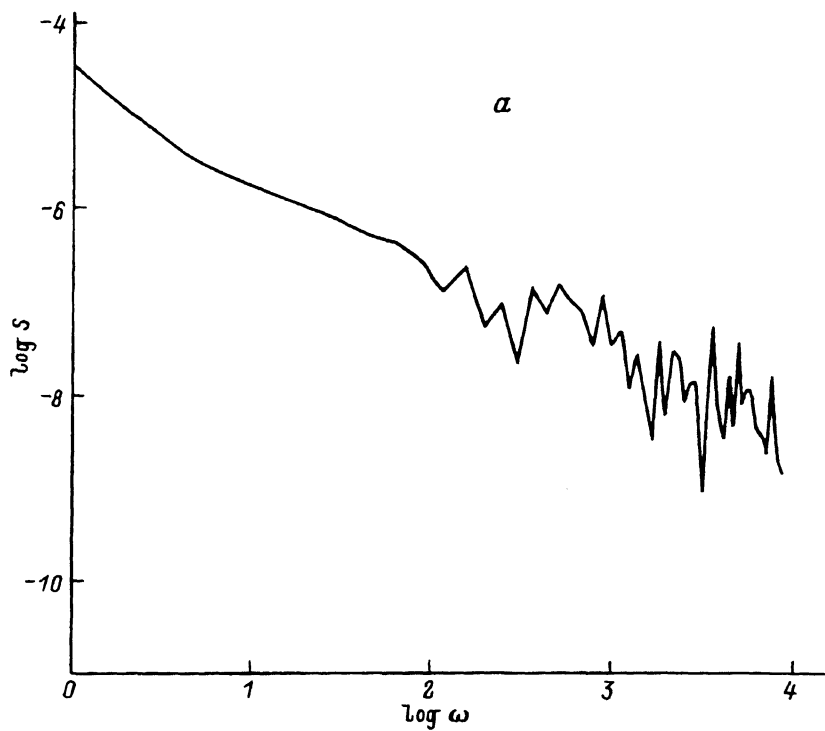


Рис. 1. Низкочастотная составляющая акустоэмиссионного шума перед разрушением гранитного образца (а) и металлоконструкции (b) (носит характер $1/f$).

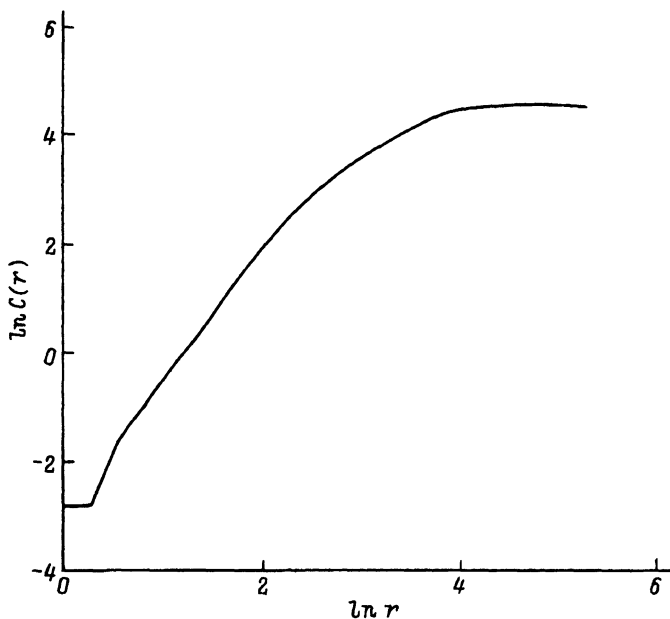


Рис. 2. Зависимость корреляционной функции Грассбергера-Прокачки ($\log C$ от $\log r$).

Наклон прямолинейного участка определяет корреляционную фрактальную размерность.

$$C(r) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r - r_{ij}) / N^2, \quad (6)$$

где N — общее число сигналов, H — функция Хевисайда, равная единице, когда расстояние между источниками не превосходит r . Если система является фрактальной, то график зависимости $\ln C$ от $\ln r$ представляет собой линейную функцию с наклоном d_c , равным фрактальной размерности множества.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что на начальной стадии разрушения величина d_c примерно соответствует размерности евклидова пространства, в котором происходит процесс. Однако по мере приближения к моменту разрушения величина d_c падает, достигая значения порядка 2.4, что соответствует фрактальной размерности поверхностей разлома в [7,8]. Зависимость $C(r)$ в логарифмических координатах в этой области представлена на рис. 2. Зависимость сохраняет прямую самоподобную форму в широком диапазоне размеров. Наклон прямой в этом диапазоне, полученный методом наименьших квадратов, составляет 2.4. Загиб прямой в начальном участке диапазона объясняется минимальным размером трещин, который способна фиксировать аппаратура, в то время как загиб в области больших размеров связан с конечными размерами образца. Достижению некоего критического значения фрактальной размерности в этот момент времени отвечает появление в спектре плотности мощности низкочастотной $1/f$ составляющей, что подтверждает связь фрактальной самоорганизации системы с проявляющимися в ней фликер-эффектом.

Список литературы

- [1] Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [2] Ван дер Зил А. Шум. Источники, описание, измерение. М.: Сов. радио, 1973. 225 с.
- [3] Weissmann et al. // *Rev. Mod. Phys.* 1988. V. 69. N 2. P. 537-571.
- [4] Locker D.A., Byerlee J.D. et al. // *Mechanics and Transport Properties of Rocks* / Ed. Evans and Wong. Academic Press, 1988. 560 p.
- [5] Тимашев С.Ф. // *Журн. физ. химии.* 1992. Т. 66. № 4. С. 1129-1132.
- [6] Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. // *Phys. Rev. A.* 1989. V. 38. N 1. P. 364-374.
- [7] Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. // *Nature.* 1984. V. 308. N 5961. P. 721-722.
- [8] Mecholsky J.J., Passoja D.E., Feinberg-Ringel K.S. // *J. Americ. Ceramic Soc.* 1989. N 1. P. 60-65.
- [9] Grassberger P., Procaccia I. // *Phys. Rev. Lett.* V. 50. 1983. N 5. P. 346-348.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
10 декабря 1993 г.