

Многомасштабные временные эффекты: мониторинг конструкций с трещинами с использованием метода акустической эмиссии*

А. Карпинтери, Дж. Лачидонья, Н. Пуньо

Туринский политехнический университет, Турин, 10129, Италия

В статье предложена фрактальная теория для прогноза накопления повреждений в телах с трещинами на основе масштабирования по времени. С помощью метода акустической эмиссии проанализирована эволюция повреждений в нескольких конструкциях в течение длительного периода времени. Обнаружено хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов. Предложенная методика позволяет оценивать время жизни массивных конструкций на основе данных мониторинга. В качестве примера исследованы две пилястры путепровода.

Time scale effects on acoustic emission due to elastic waves propagation in monitored cracking structures*

A. Carpinteri, G. Lacidogna, and N. Pugno

Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Torino, 10129, Italy

In this paper we propose a fractal theory for predicting the time effects on the damage evolution in cracking solids. By means of the acoustic emission technique, we have analyzed the evolution of damage in several structures by an extensive experimental analysis in time. Theory and experiments agree closely. Consequently, the life-time predictions of monitored solid structures can be estimated; as an example two viaduct pilasters are investigated.

1. Введение

Оценка безопасности и надежности армированных бетонных конструкций, подобных мостам и путепроводам, представляет собой сложную проблему, находящуюся на переднем крае научных исследований. Поэтому методы диагностики и контроля становятся все более значимыми при оценке состояния и надежности конструкций. Среди этих методов высокую эффективность демонстрирует методика неразрушающего контроля на основе акустической эмиссии [1–3]. Некоторые применения метода акустической эмиссии для контроля состояния конструкций описаны в работах [4, 5].

При диссипации энергии в ходе фрагментации наблюдаются сильные пространственные эффекты. В работах [6, 7] теоретически с использованием фрактального подхода было показано, что при фрагментации имеет место многомасштабный процесс диссипации

энергии. Данная фрактальная теория учитывает многомасштабный характер диссипации энергии и ее сильные пространственные эффекты. Такой подход к пространственному масштабированию плотности энергии был экспериментально подтвержден с помощью метода акустической эмиссии [8].

В данной работе мы сконцентрируем внимание на дополнительных аспектах, связанных с временными эффектами. Понимание пространственно-временных эффектов дает возможность ввести полезный энергетический параметр поврежденности для оценки состояния конструкций, основанный на корреляции между сигналами акустической эмиссии в конструкции и в малом

* Данная работа была представлена на 11 Международной конференции по разрушению (*11th International Conference on Fracture (ICF-XI)*), Турин, Италия, 20–25 марта 2005 г.

образце, извлеченном из данной конструкции и испытываемом до разрушения. Более того, согласно полученным нами данным по пространственно-временным эффектам безопасность конструкций в ходе повреждения и деградации можно эффективно оценить на практике, в реальных полевых условиях.

2. Временные эффекты при эволюции повреждаемости: фрактальная теория

Каждый сигнал акустической эмиссии при распространении трещин или упругих волн в повреждаемых телах имеет характерную длительность τ , которую согласно экспериментальным данным по землетрясениям [9, 10] мы будем считать фрактальной (т.е. автомодельной) величиной. Следовательно, распределение длительностей сигнала должно описываться степенным законом:

$$P(< \tau) = \frac{N(< \tau)}{N_{\max}} = 1 - \left(\frac{\tau_{\min}}{\tau} \right)^{D_T}, \quad (1)$$

где $N(< \tau)$ — число сигналов длительностью меньше τ ; N_{\max} — общее число сигналов; τ_{\min} ($\ll \tau_{\max}$) — минимальная длительность; D_T (> 0) — фрактальная размерность автомодельного распределения сигналов во времени.

Дифференцируя функцию интегрального распределения (1), получим плотность распределения вероятности $p(\tau)$:

$$p(\tau) = D_T \frac{\tau_{\min}^{D_T}}{\tau^{D_T+1}}. \quad (2)$$

При фрагментации диссипацию энергии W в объеме V можно выразить как [6]:

$$W \propto V^{D_S/3}, \quad (3)$$

где D_S (равная 2 или 3) — фрактальная размерность автомодельного пространственного распределения фрагментов (принималось, что фрактальная размерность описывается распределением фрактального размера (2), если длительность сигнала заменить размером фрагмента). Таким образом, бесконечно малая энергия dW , диссипируемая при отдельном событии акустической эмиссии, будет описываться уравнением (3), где V представляет объем, охваченный излученной волной. При изотропном трехмерном распространении волны характерная длина сигнала вдоль каждой оси равна $c\tau$ (c — скорость звука), так что $V \propto \tau^3$.

Таким образом, локально

$$dW \propto \tau^{D_S}. \quad (4)$$

Для двух- и одномерных объектов, выбирая в качестве характерного размера A или L соответственно, получаем тот же самый результат, так как вместо уравнения (3) мы имеем $W \propto A^{D_S/2}$ или $W \propto L^{D_S}$ при $A \propto \tau^2$ или $L \propto \tau$. Таким образом, мы вновь приходим к уравнению (4).

Полная диссипируемая энергия равна:

$$\begin{aligned} W &\propto \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau^{D_S} dN = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} N_{\max} p(\tau) d\tau \propto \\ &\propto N_{\max} \frac{D_T}{D_S - D_T} \tau_{\min}^{D_T} (\tau_{\max}^{D_S - D_T} - \tau_{\min}^{D_S - D_T}) \cong \\ &\cong \begin{cases} N_{\max} \frac{D_T}{D_S - D_T} \tau_{\min}^{D_T} \tau_{\max}^{D_S - D_T}, & D_T < D_S, \\ N_{\max} \frac{D_T}{D_T - D_S} \tau_{\min}^{D_S}, & D_T > D_S. \end{cases} \quad (5) \end{aligned}$$

Полное (наблюдаемое) время определяется как

$$\begin{aligned} t &\propto \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau dN = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} N_{\max} \tau p(\tau) d\tau \propto \\ &\propto N_{\max} \frac{D_T}{1 - D_T} \tau_{\min}^{D_T} (\tau_{\max}^{1 - D_T} - \tau_{\min}^{1 - D_T}) \cong \\ &\cong \begin{cases} N_{\max} \frac{D_T}{1 - D_T} \tau_{\min}^{D_T} \tau_{\max}^{1 - D_T}, & D_T < 1, \\ N_{\max} \frac{D_T}{D_T - 1} \tau_{\min}, & D_T > 1. \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

В соответствии с экспериментальными данными мониторинга на основе метода акустической эмиссии будем полагать, что сигналы испускаются последовательно, а не параллельно. С другой стороны, так как в уравнении (6) требуется знак пропорциональности, а не равенства, для определения времени наблюдения t , в принципе, допускаются параллельные сигналы.

Кроме того, введем «квант» длительности размером $\tau_{\min} = \text{const}$ и примем статистическую гипотезу автомодельности, т.е. $\tau_{\max} \propto t$ (чем больше время контроля, тем больше наибольший сигнал). Таким образом, исключая N_{\max} из уравнений (5) и (6), получим:

$$\text{если } D_S \geq 1, \quad W \propto \begin{cases} t^{D_S}, & D_T < 1, \\ t^{1 + D_S - D_T}, & 1 \leq D_T \leq D_S, \\ t, & D_T > D_S, \end{cases} \quad (7.1)$$

$$\text{если } D_S < 1, \quad W \propto \begin{cases} t^{D_S}, & D_T < D_S, \\ t^{D_T}, & D_S \leq D_T \leq 1, \\ t, & D_T > 1. \end{cases} \quad (7.2)$$

Мы нашли, что масштабирование по времени также справедливо для стандартного отклонения σ_W от энергии, если формально заменить в уравнениях (7) W на σ_W и D_S на $2D_S$. Подобный фрактальный подход к масштабированию по размеру, а не по времени был предложен ранее для прогноза влияния размерных эффектов на средние величины и среднеквадратические отклонения для основных механических свойств материалов [7], начиная с пространственного масштабирования энергии [6].

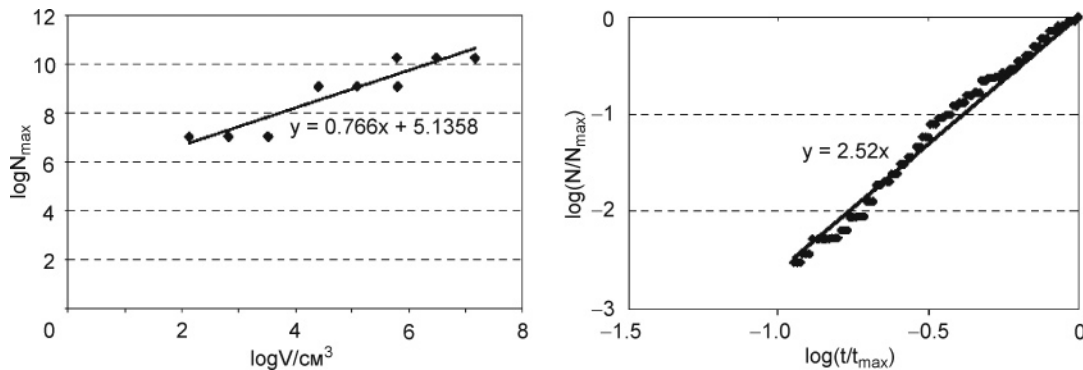


Рис. 1. Пространственно-временное масштабирование при накоплении повреждений

Отметим, что обычно $D - 1 < D_S < D$ при размерности объекта $D = 1, 2, 3$ [6]. Из уравнений (7) имеем $W \propto t^{\beta_t}$ при $1 \leq \beta_t \leq D_S$, если $D_S \geq 1$, или $D_S \leq \beta_t \leq 1$, если $D_S < 1$, т.е., в целом,

$$W \propto t^{\beta_t}, \quad 0 \leq \beta_t \leq 3. \quad (8)$$

Соответствующее масштабирование по фрактальному размеру по данным акустической эмиссии при растрескивании твердых тел было предложено теми же авторами в работе [8], на основе закона фрактальной фрагментации [6]. Экспериментальная проверка масштабирования по времени уравнения (8) выполнена в следующем разделе.

3. Мониторинг на основе акустической эмиссии: экспериментальные данные

Метод акустической эмиссии, основанный на подсчете числа сигналов (event-counting method), учитывает число волн выше некоторого порогового уровня (измеряемого в вольтах) и широко используется при анализе дефектов [11, 12]. В действительности, в качестве первого приближения интегральное число отдельных событий N можно сравнивать с количеством энергии, высвобождаемым в ходе нагружения, полагая, что обе величины возрастают при увеличении степени повреждения (т.е. $W \propto N$ и энергия должна суммироваться).

С помощью такой методики анализируется эволюция трещин и оценивается величина высвобождаемой энергии деформации при распространении трещин в элементах конструкции. В частности, на основе обширного экспериментального пространственно-временного анализа исследована эволюция повреждений в нескольких конструкциях. В том числе выполнен анализ эволюции повреждений в двух пилястрах, поддерживающих путепровод на автомобильной магистрали в Италии, построенный в 50-х годах прошлого века. Из пилястр были извлечены несколько цилиндрических образцов для определения механических характеристик материала при сжатии и оценки эффектов масштабирования по размерам [8] и времени по данным акустической эмиссии.

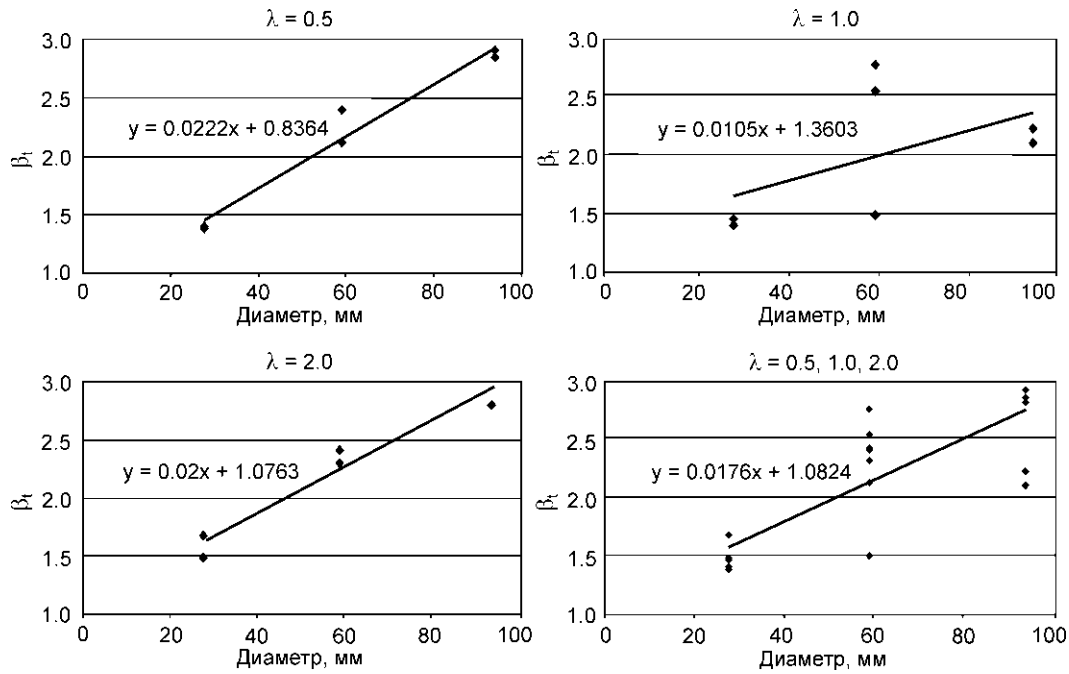
Подробное описание тестируемых образцов, испытательной машины и условий эксперимента читатели могут найти в работе [8].

Согласно уравнению (8) и с учетом $W \propto N$ параметр энергии повреждения η при испытании образца можно определить как

$$\eta \equiv \frac{W}{W_{\max}} = \frac{N}{N_{\max}} = \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^{\beta_t}, \quad (9)$$

где t_{\max} соответствует достижению максимального напряжения (которое мы выберем в качестве критического условия). Из уравнения (9) можно получить экспериментальные значения β_t , описывающие масштабирование по времени диссипируемой или высвобождаемой энергии (согласно фрактальной теории не предполагается нестрогая зависимость от условий испытания).

На рис. 1 приведены примеры экспериментально наблюдаемых пространственно-временных эффектов. После начального переходного периода ($0 < t/t_{\max} < 0.4$) [13] для масштабирования по времени наблюдается точный степенной закон. Из условия наилучшего соответствия в билигарифмической плоскости (рис. 1, а) для испытываемого образца ($d = 59$ мм, $\lambda = 1$) получаем наклон $\beta_t = 2.52$. Подобные результаты можно наблюдать для зависимостей напряжения и деформации. Масштабирование по размеру для N_{\max} также представлено как функция объема образца (рис. 1, б), согласующаяся с экспериментальными данными. Наклон в билигарифмической плоскости между $2/3$ и 1 (близкий к экспериментальному значению 0.77) указывает на то, что диссипация энергии происходит во фрактальной области, находящейся между поверхностью и объемом образца (подробности можно найти в [6, 8]). На рис. 2 представлена зависимость значений β_t от диаметра образца. С увеличением диаметра образца значения β_t растут. Обнаруживаемое экспериментально масштабирование по времени согласуется с фрактальным законом (8), где показатель изменяется в интервале от 0 до 3. Экспериментальные результаты обобщены в таблице 1.

Рис. 2. Зависимость показателя долговечности β_t от диаметра образца

Образцы для испытаний были получены из двух пилястр, контроль за состоянием которых осуществлялся с помощью описанной системы сбора данных на основе метода акустической эмиссии. За период наблюдения (172 дня) в более поврежденной пилястре P_1 зарегистрировано $N \cong 2 \cdot 10^5$ сигналов, в менее поврежденной пилястре P_2 — $N \cong 8 \cdot 10^4$. Учитывая, что объем каждой пилястры приблизительно равен $2 \cdot 10^6$ см³, экстраполяция на основе рис. 1, б позволяет оценить критическое число сигналов акустической эмиссии для обеих пилястр как $N_{\max} \cong 11.51 \cdot 10^6$.

Подставляя значения N и N_{\max} в уравнение (9) и принимая $\beta_t = 2.52$ (более консервативной оценкой было бы 3), получим $t/t_{\max} \cong 0.2$ для пилястры P_1 и $t/t_{\max} \cong 0.14$ для пилястры P_2 . Таким образом, время жизни этих элементов конструкции определяется достижением максимального числа событий и составляет 2.4 и 3.4 года соответственно.

4. Заключение

В данной работе накопление повреждений в телах с трещинами оценено на основе временного масштаби-

Таблица 1

Средние значения для образцов, полученных из пилястр P_1 и P_2

Номер образца	Диаметр d , мм	$\lambda = h/d$	Пилястра P_1			Пилястра P_2		
			Максимальное напряжение σ_u , МПа	N_{\max} при σ_u	β_t	Максимальное напряжение σ_u , МПа	N_{\max} при σ_u	β_t
1	27.7	0.5	91.9	1 186	1.40	84.7	1 180	1.38
2	27.7	1.0	62.8	1 191	1.41	46.7	1 181	1.46
3	27.7	2.0	48.1	1 188	1.48	45.8	1 186	1.67
4	59.0	0.5	68.1	8936	2.12	57.5	8924	2.39
5	59.0	1.0	53.1	8934	1.49	41.7	8930	2.52
6	59.0	2.0	47.8	8903	2.30	38.2	8889	2.41
7	94.0	0.5	61.3	28 502	2.90	45.2	28 484	2.84
8	94.0	1.0	47.8	28 721	2.09	38.2	28 715	2.21
9	94.0	2.0	44.1	28 965	2.80	38.1	28 956	2.92

рования с помощью фрактальной теории и экспериментально с использованием метода акустической эмиссии. Аналитический результат, обобщенный в уравнении (8), подтверждается результатами экспериментальных исследований с помощью акустической эмиссии, демонстрируя степенную зависимость эволюции повреждений с ростом фрактальной экспоненты от 0 до 3. Одновременное рассмотрение пространственно-временных эффектов позволяет предсказать время жизни конструкции на практике, в реальных полевых условиях.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства университетских и научных исследований (Ministry of University and Scientific Research), а также Европейского Союза (European Union).

Литература

1. *Carpinteri A., Bocca P.* Damage and diagnosis of materials and structures. – Bologna: Pitagora Editrice, 1991.
2. *Ohtsu M.* The history and development of acoustic emission in concrete engineering // Magazine of Concrete Research. – 1996. – V. 48. – P. 321–330.
3. *Shah P., Zongjin L.* Localization of microcracking in concrete under uniaxial tension // ACI Materials Journal. – 1994. – V. 91. – P. 372–381.
4. *Carpinteri A., Lacidogna G.* Structural monitoring and diagnostics by the acoustic emission technique: scaling of dissipated energy in compression // Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration (ICSV9). – Orlando, 2002.
5. *Carpinteri A., Lacidogna G.* Damage diagnosis in concrete and masonry structures by acoustic emission technique // J. Facta Universitatis. – 2003. – V. 3. – P. 755–764.
6. *Carpinteri A., Pugno N.* One-, two- and three-dimensional universal laws for fragmentation due to impact and explosion // J. Appl. Mech. – 2002. – V. 69. – P. 854–856.
7. *Carpinteri A., Pugno N.* Size effects on average and standard deviation values for the mechanical properties of condensed matter: a energy based unified approach // Int. J. Fract. – 2004 (*in press*).
8. *Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N.* Damage diagnosis and lifetime assessment of concrete and masonry structures by an acoustic emission technique // Proc. of 5th Intern. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-5) / Ed. V.C. Li, C.K.Y. Leung, K.J. Willam, S.L. Billington. – Vail, 2004. – P. 31–40.
9. *Richter C.F.* Elementary seismology. – San Francisco – London: W.H. Freeman and Company, 1958. – 768 p.
10. *Chakrabarti B.K., Benguigui L.G.* Statistical physics of fracture and breakdown in disordered systems. – Oxford: Clarendon Press, 1997.
11. *Pollock A.A.* Acoustic emission-2: acoustic emission amplitudes // Non-Destructive Testing. – 1973. – V. 6. – P. 264–269.
12. *Brindley B.J., Holt J., Palmer I.G.* Acoustic emission-3: the use of ring-down counting // Non-Destructive Testing. – 1973. – V. 6. – P. 299–306.
13. *Holroyd T.* The acoustic emission and ultrasonic monitoring handbook. – Oxford: Coxmoor Publishing Company's, 2000.
14. *Scherbakov R., Turcotte D.L.* Damage and self-similarity in fracture // Theor. Appl. Fract. Mech. – 2003. – V. 39. – P. 245–258.