

УДК 622.235(088.8): 519.21

В. В. Иванов, Л. А. Белина, Д. Ю. Сирота, Т. М. Черникова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ РАЗРУШЕНИЯ

Введение. Исследованию процессов разрушения и трещинообразования посвящено большое количество работ, результатом которых стало появление следующих базовых теоретических моделей: модель упругой отдачи Н. Ф. Рейда [1], энергетическая модель сейсмического режима Ю. В. Ризниченко [2]; модель лавинно-неустойчивого трещинообразования Б. В. Кострова, В. И. Мякина, Г. А. Соболева, О. Г. Шапиной [3]; кинетическая концепция прочности С. Н. Журкова, В. С. Куксенко, В. А. Петрова [4]; дилатантно-диффузионная модель Д. Л. Андерсона, С. Н. Шольца [5]; модель с неоднородностью или консолидированным включением И. П. Добровольского [6]; Р. Вак, С. Танг, К. Визенфельд предложили модель, основанную на концепции самоорганизующейся критичности [7].

Наиболее широкое применение и развитие получила кинетическая концепция прочности С. Н. Журкова, которая подразделяет процесс разрушения на две стадии: хаотического некоррелированного образования микротрещин и образование магистральной трещины разрыва.

Переход от первой стадии ко второй осуществляется при выполнении «концентрационного критерия разрушения (укрупнения трещин)» [4]

$$K = l^{-1} \cdot n^{-1/3}, \quad (1)$$

где n – средняя концентрация микротрещин, m^{-3} ; l – средний линейный размер микротрещин, m ; $K \approx 3$ – среднее расстояние между трещинами в образце единичного объема в долях их среднего размера l .

Продолжительность первой стадии определяется из соотношения

$$\tau = \tau_0 \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right], \quad (2)$$

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$ – период тепловых атомных колебаний около положения равновесия, s ; γ – активационный объем, m^3 ; U_0 – энергия активации разрушения, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/°К; T – абсолютная температура пород, °К; σ – среднее внешнее напряжение на образце, Па.

§1. Экспериментальные данные.

В работах [8, 9] авторы приводят результаты лабораторных экспериментов по разрушению образцов композитных материалов [8] и горных пород [9] с фиксацией количества импульсов ЭМИ. В работе [8] исследовались в частности фенопласт Ф13-01-87, текстолит конструкционный ПТН, фенопласт Э39-О10-48.

Для аппроксимации первых трёх наборов дан-

ных в работе [8] была предложена формула

$$N(\sigma) = \frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma^l} \cdot \exp(-\beta) \cdot \frac{\exp(\alpha \cdot \sigma)}{\alpha}, \quad (3)$$

где $\alpha = \gamma/kT$, $\beta = U_0/kT$.

Для аппроксимации последних двух в работе [9] использовалась зависимость

$$N(P) = A[\exp(\alpha \cdot P) - 1], \quad (4)$$

где P , H – нагрузка на образец.

Проверим последнюю формулу на соответствие размерностям. Так как $[k] = \text{Дж} \cdot (\text{°К})^{-1}$, $[\gamma] = m^3$, $[T] = \text{°К}$, $[P] = \text{Н}$, тогда получим что $[\alpha \cdot P] = (m^3 \cdot \text{Н} \cdot \text{°К}) \cdot (\text{Дж} \cdot \text{°К})^{-1} = (m^3 \cdot \text{Н}) \cdot (\text{Н} \cdot m)^{-1} = m^2$, откуда получаем выражение с невозможной размерностью $\exp(m^2)$. Таким образом, формула (4) хоть и верна статистически, но физически не имеет смысла.

В данной заметке будут получены более точная, чем (3), и более правильная, чем (4), закономерности.

§2. Теоретическая модель. Проверка адекватности.

В работе [10] авторы сформулировали кинетическую модель накопления микротрещин, которая учитывает уравнения (1), скорость трещинообразования (5) и условие необратимости разрушения Бейли (6)

$$N'(t) = N^* / \tau, \quad (5)$$

$$\int_0^{\tau} N' dt = N^* \quad (6)$$

где N^* – критическое количество трещин, которое накапливается в образце к моменту его разрушения и позволяет описать накопление поврежденной структуры при произвольной зависимости действующих напряжений и температуры от времени.

Для определения зависимости числа импульсов N от величины напряжения σ проинтегрируем (3) при условии линейного возрастания напряжения

$$\sigma = \sigma' \cdot t \quad N(\sigma) = \int_0^{\frac{\sigma}{\sigma'}} \frac{N^*}{\tau} dt,$$

откуда получаем выражение

$$N(\sigma) = \frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma^l} \cdot \exp(-\beta) \cdot \frac{\exp(\alpha \cdot \sigma) - 1}{\alpha}, \quad (7)$$

где $\alpha = \gamma/kT$, $\beta = U_0/kT$.

Можно отметить, что из (7) можно получить (3) при условии, что $\exp(\alpha \cdot \sigma) \gg 1$. Однако для типичных значений $\gamma \sim 10^{-29}$, $\sigma \sim 10^8$, $T=293$ можно определить, что $\exp(\alpha \cdot \sigma) \approx 1,22$, что де-

лает вычисления работы [8] далёкими от истинных.

Для определения коэффициентов α и β применим метод наименьших квадратов. Прологарифмируем выражение (7):

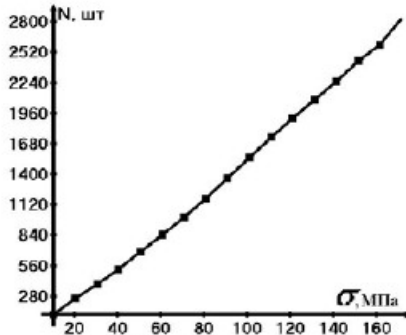


Рис. 1. Кривая $N(\sigma)$ для фенопласта Ф13, $\sigma' = 1.57$ МПа/с.

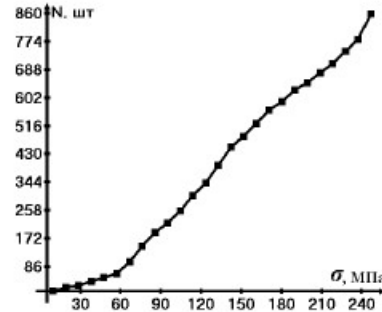


Рис. 2. Кривая $N(\sigma)$ для текстолита ПТН, $\sigma' = 1.92$ МПа/с.

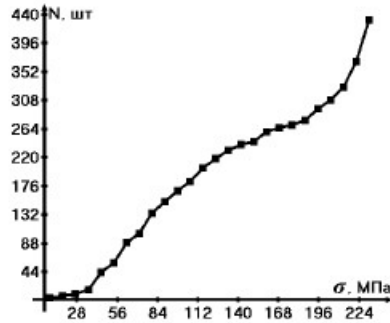


Рис. 3. Кривая $N(\sigma)$ для текстолита Э39, $\sigma' = 1.427$ МПа/с.

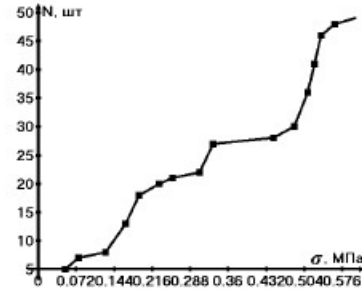


Рис. 4. Кривая $N(\sigma)$ для известняка вида 3

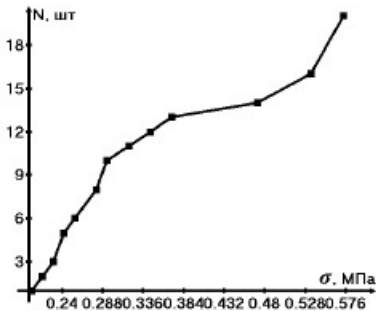


Рис. 5. Кривая $N(\sigma)$ для известняка вида 10

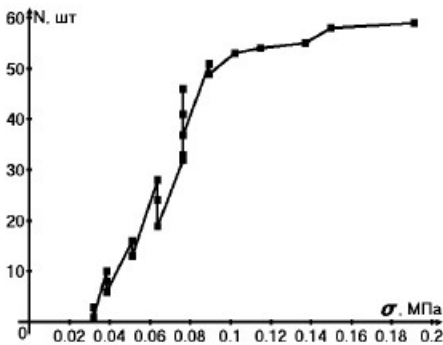


Рис. 6. Кривая $N(\sigma)$ для роговика вида 14

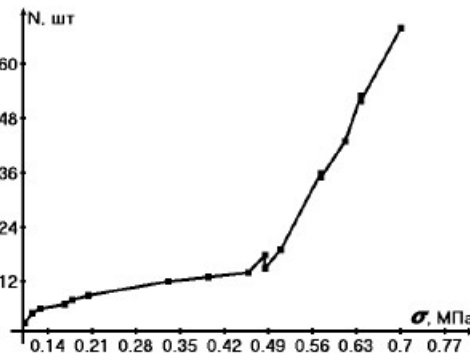


Рис. 7. Кривая $N(\sigma)$ для кварц. диорита вида 6

$$\ln N = \ln\left(\frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma'}\right) - \beta + \ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma) - 1}{\alpha}\right)$$

Определим минимизируемый функционал:

$$F(\alpha, \beta) =$$

$$= \sum_i \left[\ln N_i - \ln\left(\frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma'}\right) + \beta - \ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) - 1}{\alpha}\right) \right] \rightarrow \min$$

Приравняем частные производные нулю.

$$F'_\alpha =$$

$$= \sum_i \left\{ \left[\ln N_i - \ln\left(\frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma'}\right) + \beta \right] \times \left[-\ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) - 1}{\alpha}\right) \right] \times \left[\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) \cdot (\alpha \cdot \sigma_i - 1) + 1}{\alpha(1 - \exp(\alpha \cdot \sigma_i))} \right] \right\} = 0$$

и

$$F'_\beta = \sum_i \left[\ln N_i - \ln\left(\frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma'}\right) + \beta - \ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) - 1}{\alpha}\right) \right] = 0$$

После преобразований получим следующие выражения

$$\sum_i \left\{ \left[\ln N_i - \ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) - 1}{\alpha}\right) \right] \times \left[\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) \cdot (\alpha \cdot \sigma_i - 1) + 1}{\alpha \cdot (1 - \exp(\alpha \cdot \sigma_i))} \right] \right\} - \frac{1}{n} \sum_i \left[\ln N_i - \ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) - 1}{\alpha}\right) \right] \times \sum_i \left[\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) \cdot (\alpha \cdot \sigma_i - 1) + 1}{\alpha \cdot (1 - \exp(\alpha \cdot \sigma_i))} \right] = 0 \quad (8)$$

и

$$\beta = \ln\left(\frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma'}\right) - \frac{1}{n} \sum_i \left[\ln N_i - \ln\left(\frac{\exp(\alpha \cdot \sigma_i) - 1}{\alpha}\right) \right] \quad (9)$$

Величину скорости нагружения σ' определим из соотношения

$$\sigma' = \sigma_p / t_p \quad (10)$$

σ_p – напряжение при разрушении, Па; t_p – время разрушения образца.

Таким образом, получили в (8) нелинейное уравнение, которое решаем модифицированным методом параболической интерполяции Брента (основной алгоритм взят из открытой библиотеки алгоритмов НИВЦ МГУ на сайте). Результаты расчётов параметров α и β , а также кинетических коэффициентов U_0 и γ приведены в таблице.

Расчётные значения U_0 и γ

Вид материала образца	$U_0, 10^{-19}$	$\gamma, 10^{-29}$	R^2
Фенопласт	1,411	1,001	0,998
Текстолит вида 1	1,428	1,499	0,981
Текстолит вида 2	1,429	26,233	0,962
Известняк 3	1,325	5,721	0,942
Известняк 10	1,467	4,029	0,837
Роговик 14	1,521	4,583	0,816
Роговик 15	1,553	3,954	0,824
Кварц. диор. 4	1,656	2,198	0,963
Кварц. диор. 5.	1,503	6,435	0,891

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reid, H. F. The California earthquake of April 18 1906, v. 2. The mechanics of the earthquake [Text] / H.F. Reid, –The CIW, 1910.
2. Ризниченко, Ю. В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды [Текст] / Ю. В. Ризниченко. – М.: Наука, 1985, – 408 с. // – с. 9–27.
3. Мячкин, В. И. Основы физики очага и предвестники землетрясения [Текст] / В. И. Мячкин, Б. В. Костров, Г. А. Соболев, О. Г. Шамина // Физика очага землетрясений – М.: Наука. – 1975. – с. 104 – 117.
4. Куксенко, В. С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел [Текст] / В. С. Куксенко // Сб. «Физика прочности и пластичности». – Л.: Наука. – 1986. – с. 36 – 41.
5. Scholz, C. H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting [Text] / C. H. Scholz. – Cambridge University

Press, 2002. – 471 p.

6. Добровольский, И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения [Текст] / И. П. Добровольский. – М.: ИФЗ АН СССР, 1991. – 217 с.

7. Bak, P. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise [Text] / P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld // Phys. Rev. Lett. 1987 № 59, – pp. 381 – 384.

8. Иванов, В. В. Кинетика разрушения и усталостная прочность полимерных соединений / В. В. Иванов, В. И. Климов, Т. М. Черникова. – Кемерово, КузГТУ, 2003, – 235 с.

9. Егоров, П. В. Исследование разрушения твердых тел методом регистрации импульсного электромагнитного излучения / П. В. Егоров [и др.]. – Кемерово, Кузбассвуиздат, – 201 с.

10. Иванов В.В. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений / В. В. Иванов, П. В. Егоров А. Г. Пимонов // ФТПРПИ – 1990. – Вып. 187/34. – с. 32 –35.

□ Авторы статьи

Иванов
Вадим Васильевич,
докт. техн. наук, проф.
каф. теоретической и геотехнической механики
КузГТУ,
email: yvi@kuzstu.ru

Белина
Любовь Александровна,
канд. техн. наук, доцент
каф. теоретической и геотехнической механики
КузГТУ
email: bla.rmpip@kuzstu.ru

Сирота
Дмитрий Юрьевич,
канд. техн. наук доцент каф.
теоретической и геотехнической механики КузГТУ,
email: sirotadm@gmail.com

Черникова
Татьяна Макаровна,
канд. техн. наук доцент каф.
теоретической и геотехнической механики КузГТУ,
email: chtn.oe@kuzstu.ru

УДК 534.6.08

Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, А.И. Конурин

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПЫТАНИЙ МНОГОКАНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Многоканальные системы геомеханического мониторинга состояния породного массива широко используются для выявления координат динамического воздействия на массив естественного или искусственного происхождения (это может быть, например, любое сейсмосообщение, горный удар или же воздействие на массив породоразрушающим инструментом). Контроль за координатами этих событий крайне важен для безопасности ведения горных работ и возможности своевременного предсказания динамического события. Существующие многоканальные системы для решения этих задач не всегда обеспечивают высокую точность измерения координат, и по этой причине их невозможно использовать для контроля положения в массиве ударной машины. В связи с этим в работе предложена к реализации система, решающая задачу измерения координат машины с точностью до нескольких сантиметров.

Современные системы контроля строятся, как правило, многоканальными [1, 2]. Данные системы имеют взаимозависимые и независимые каналы приема с пространственно разнесенными или локально установленными приемными преобразователями, число которых меняется от 4 (минимально допустимое для решения триангуляционной пространственной задачи локации) до 24 и более.

На рис. 1 изображены сигналы одного источника акустического сигнала, принятые по нескольким каналам измерения. Эти сигналы назы-

вают локационной серией и позволяют рассчитать координаты источника [1].

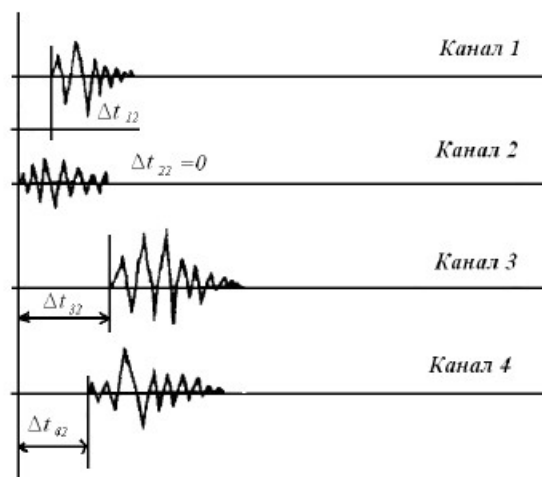


Рис. 1. Сигналы на выходе приемных преобразователей

Пусть x_i, y_i, z_i – известные координаты приемников акустических сигналов для i -го датчика (рис. 2). Координаты источника неизвестны x, y, z и их нужно определить.

Для расчета времени прихода сигнала на i -ый приемник, если первым приходит сигнал на датчик с номером k , можно оценить разности времен (известные величины – см. рис. 2): $\Delta t_{ik}=0$;