

Н. С. ТОМАШЕВСКАЯ, Я. Н. ХАМИДУЛЛИН

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ МОМЕНТА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ФЛУКТУАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА РОСТА ТРЕЩИН

(Представлено академиком М. А. Садовским 24 I 1972)

Предсказание момента разрушения того или иного материала должно основываться на физическом представлении процесса разрушения. Из имеющихся теорий механизма роста трещин наиболее обоснованы (физически) флуктуационные представления ⁽¹⁻³⁾, в которых рост каждой трещины рассматривается как последовательный разрыв межатомных связей в ее вершине под действием напряжений и тепловых флуктуаций. В силу того, что процесс разрушения по современным представлениям подразделяется на три стадии* — субмикроскопическая (I), микроскопическая (II) и макроскопическая (III), — флуктуационный механизм роста трещин может быть справедлив до момента возникновения магистральной трещины. При квазихрупком разрушении рост магистральной трещины происходит со сравнительно большой скоростью (лавино), поэтому время «жизни» материала в лабораторных условиях можно оценить с позиций кинетической теории прочности.

В случае изменяющегося напряжения время до разрушения испытуемого образца ориентировочно можно определить, приняв условие накопления повреждаемостей Бейли ⁽⁴⁾, которое вытекает из факта необратимости процесса разрушения при непрерывном нагружении:

$$\int_0^k \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1; \quad (1)$$

t_k — искомое время до разрыва при изменяющемся во времени напряжении, $\tau[\sigma(t)]$ — функциональная зависимость ⁽¹⁻³⁾ времени «жизни» материала при соответствующем изменении нагрузки во времени $\sigma(t)$

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

где τ_0 — предэкспоненциальный множитель, численно равный периоду тепловых колебаний атомов (10^{-13} — 10^{-12} сек.), U_0 — энергия активации процесса разрушения, γ — структурно-чувствительный коэффициент с размерностью объема. Согласно флуктуационной теории прочности ⁽³⁾,

$$\gamma = \omega \beta, \quad (3)$$

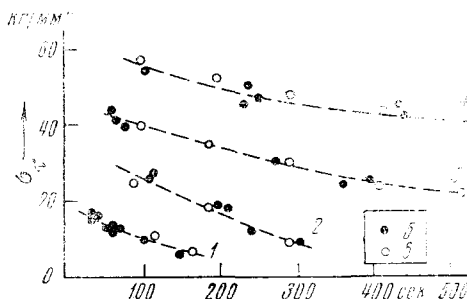
где ω — флуктуационный (активационный) объем, β — безразмерный коэффициент концентрации напряжений.

* Субмикроскопическая стадия — зародышевые трещины возникают по всему объему и соизмеримы с межатомными расстояниями; микроскопическая стадия — трещины соизмеримы со структурными элементами и возникают в результате объединения дефектов; макроскопическая стадия — трещины на порядок превышают размеры структурных элементов, происходит слияние микротрещин и развитие одной из них до магистральной.

Экспериментальные результаты (⁵⁻⁷) подтверждают справедливость условия Бейли при различных режимах нагружения.

Задачей данной работы была экспериментальная проверка правомочности нахождения времени t_k из этого условия при разрушении образцов горных пород сжимающей нагрузкой, растущей с постоянной скоростью

Рис. 1. Зависимость максимальной осевой (дифференциальной) нагрузки σ_t от продолжительности t нагружения до момента разрушения образца. 1 — при атмосферных условиях, 2 — при всестороннем давлении 0,5 кбар; 3 — 1 кбар; 4 — 1,5 кбар; 5 — экспериментальные значения, 6 — расчет по формуле (6)



($\sigma = \dot{\sigma}t$ при $\dot{\sigma} = \text{const}$) в условиях всесторонних давлений. Формула для оценки времени до разрыва испытуемого образца выводится из (1). Для данных условий испытаний выражение (1) примет вид

$$\int_0^k \frac{dt}{\tau_0 \exp [(U_0 - \gamma \dot{\sigma}t)/kT]} = 1. \quad (4)$$

После интегрирования (4) получаем

$$\frac{kT}{\gamma \dot{\sigma}} \left[\exp \left(\frac{\gamma \dot{\sigma} t_k}{kT} \right) - 1 \right] = \tau_0 \exp \left(\frac{U_0}{kT} \right),$$

откуда

$$t_k = \frac{kT}{\gamma \dot{\sigma}} \ln \left[\frac{\gamma \dot{\sigma}}{kT} \tau_0 \exp \left(\frac{U_0}{kT} \right) + 1 \right]. \quad (5)$$

В силу того, что $\frac{\gamma \dot{\sigma}}{kT} \tau_0 \exp \left(\frac{U_0}{kT} \right) \gg 1$ выражение (5) можно переписать в виде

$$t_k \simeq \frac{kT}{\gamma \dot{\sigma}} \left(\frac{U_0}{kT} + \ln \frac{\gamma \dot{\sigma}}{kT} + \ln \tau_0 \right). \quad (6)$$

Полученная формула (6) была проверена экспериментально при сжатии в условиях различных всесторонних давлений на серии образцов гранита

Таблица 1

P , кбар	$\bar{U}_0$, ккал/моль	$\bar{\gamma}$, кал·мм ² /моль·кг	$\bar{\gamma} \cdot 10^{19}$, мм ²	$\bar{\gamma}$
Атмосферные условия	21,0	0,12	0,85	8,5
0,5	21,4	0,10	0,71	7,1
1,0	23,0	0,10	0,71	7,1
1,5	23,8	0,09	0,64	6,4

Примечание. Для перевода $\bar{\gamma}$ в объемные единицы (мм²) необходимо значения $\bar{\gamma}$ в ккал·мм²/моль·кг умножить на $7,1 \cdot 10^9$.

Камчатки, которые были отобраны из зоны разлома. Методика испытаний описана в работе (⁸). Величины U_0 и γ , входящие в формулу (6), определялись экспериментально по методу, изложенному в (⁹). Сравнение экспериментальных значений времени до хрупкого или квазихрупкого

разрушения (для образцов, вырезанных из одного блока горной породы) со значениями, рассчитанными по формуле (6), дает хорошую сходимость (рис. 1). В табл. 1 приводятся эффективные величины энергии активации процесса разрушения $\bar{U}_0$, структурно-чувствительного коэффициента $\bar{\gamma}$ и коэффициента концентрации напряжений $\bar{\beta}$ для I и II стадий роста трещин. Причем $\bar{\beta}$ вычислялся из предположения, что активационный объем ω порядка атомного (¹¹) и для гранита примерно равен 10^{-20} мм³ (¹⁰). Тогда из (3) $\bar{\beta} = \bar{\gamma} / \omega$.

Из рассмотрения табл. 1 видно, что увеличение $\bar{U}_0$ с ростом всестороннего давления свидетельствует о тормозящем воздействии последнего на процесс разрушения. Тенденция уменьшения $\bar{\gamma}$ и $\bar{\beta}$ с увеличением всестороннего давления говорит о повышении прочностных свойств материала, что подтверждается, в частности, ростом в условиях всесторонних давлений таких характеристик материалов, как температура плавления, модуль упругости и другие (¹², ¹³).

Использование в расчетах $\beta = \text{const}$ вызвано тем, что основной вклад во время «жизни» материала под нагрузкой вносят I и II стадии роста трещин, а заметные изменения коэффициента концентрации напряжений отмечаются лишь в самый заключительный период роста трещин (¹⁴).

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
7 I 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Н. Журков, Б. Н. Нарзулаев, ЖТФ, 23, в. 10 (1953). ² Г. М. Барте-нев, Изв. АН СССР, ОТН, № 9 (1955). ³ Г. М. Барте-нев, Ю. С. Зуев, Прочность и разрушение высокоэластических материалов, М.—Л., 1964. ⁴ J. Bailly, Glass Ind., 20, №№ 1—4 (1939); Ceram. Abs., 19, № 4 (1940). ⁵ В. А. Степанов, И. Е. Куров, В. В. Шнейзман, ФТТ, 6, в. 9 (1964). ⁶ С. Н. Журков, Э. Е. Томашевский, В сборн. Некоторые проблемы прочности твердого тела, Изд. АН СССР, 1959. ⁷ В. Р. Регель, А. М. Лексовский, ФТТ, 4, в. 4 (1962). ⁸ М. П. Волярович, Д. Б. Балашов и др., Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 8 (1963). ⁹ С. Н. Журков, Вестн. АН СССР, № 3 (1968). ¹⁰ Справочник физических кон-стант горных пород. Под ред. С. Кларка мл., М., 1969. ¹¹ Л. Э. Гуревич, В. И. Владимиров, ФТТ, 11, в. 8 (1960). ¹² С. Б. Айбиндер, М. Г. Лака, И. Ю. Маторс, Механика полимеров, № 2 (1965). ¹³ Твердые тела под высоким давле-нием. Сборн. статей под ред. В. Пол и Д. Варшауэр, М., 1966. ¹⁴ В. Р. Регель, А. М. Лексовский, ФТТ, 12, в. 11 (1970).