

слабозв'язаних ґрунтах, так і для розв'язання оберненої задачі – визначення параметрів вибухів, що забезпечують отримання заданих розмірів воронки викиду в таких ґрунтових умовах.

1. Лучко І.А. Методика визначення параметрів вибухів сферичних і скінченної довжини горизонтальних циліндричних зарядів при проходженні відкритих виїмок у шаруватих ґрунтах // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 1999. – Вип. 2. – 150 с.

2. Gaffney E.S. Effects of gravity on explosion craters // Proc. Lunar. Planet. Sci Conf. – New York: Pergamon Press, 1978.

3. Кузнецов В.М., Шацкевич А.Ф., Романов А.Р. О взрыве на выброс в песке // Физика горения и взрыва. – 1979. – № 2.

4. Кузнецов В.М., Шацкевич А.Ф. О некоторых особенностях взрыва в пористых сыпучих средах // Физика горения и взрыва. – 1979. – № 4.

5. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва – М.: Недра, 1971.

6. Барсанаев С.Б., Гурович В.И., Расшихин К.А. и др. Элементарная теория взрывов на выброс и их моделирование с помощью искусственной тяжести // Докл. АН СССР. – 1979. – 249. – № 1.

7. Зельманов И.Л., Канунов А.И., Куликов В.И. и др. Влияние теплофизических свойств среды в очаге электровзрыва на параметры воронки выброса // Прикл. механика и техн. физика. – 1969. – № 2.

УДК 620.171

## ЗАКОН ДВОЙНОГО ЛОГАРИФМА В КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ

*А.И. Крючков, канд. техн. наук (НТУУ “КПИ”, ИЭЭ)*

*В статті розглядається закон подвійного логарифма при руйнуванні гірських порід в рамках кінетичної теорії руйнування.*

В основе любой технологии добычи полезного ископаемого лежат те или иные процессы разрушения горных пород. Несмотря на значительные усилия в направлении исследования разрушения твердых тел, значения коэффициента полезного действия процесса разрушения (1...5 %) свидетельствуют как об относительно скромных практических результатах этих усилий, так и об отсутствии общей теории разрушения твердых тел. Наиболее перспективным направлением являются исследования на основе теории кинетических процессов.

Кинетическим процессом принято называть процесс перехода атома или молекулы вещества из одного устойчивого энергетического состояния в следующее устойчивое энергетическое состояние путем преодоления потенциального барьера. Общие закономерности такого процесса были экспериментально установлены Аррениусом (1889 г.) при изучении протекания химических реакций:

$$\ln r = \ln A - \frac{U}{RT}, \quad (1)$$

где  $r$  – скорость химической реакции;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $U$  – экспериментально устанавливаемая энергия активации;  $A$  – частотный множитель.

Фактической основой кинетической теории разрушения явились многочисленные экспериментальные данные по временной и температурной зависимости прочностных свойств твердых тел [1–7], полученные разными исследователями в 20–40-е годы.

Исследования процесса разрушения в рамках зарождающейся кинетической теории разрушения были проведены А.В. Тобольски (1943 г.) [4] для полимеров, Е.С. Маклином (1947 г.) [5] и Т. Екобори (1951 г.) [6] для металлов, С.Н. Журковым (1951 г.) [7] для разнообразных веществ при растягивающих нагрузках.

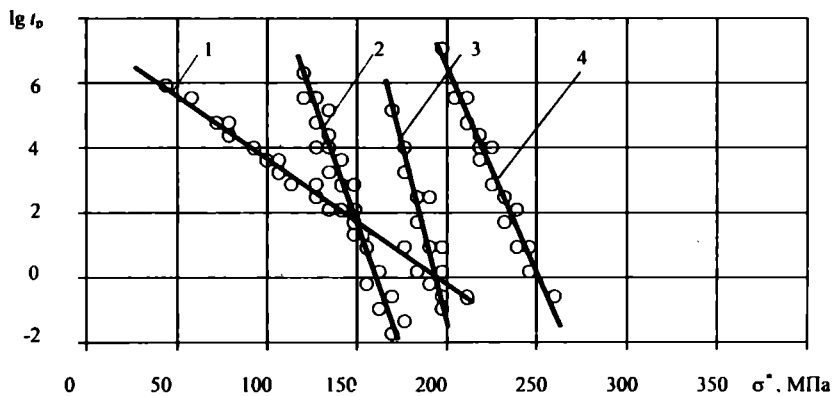
На обширном экспериментальном материале было установлено, что для разрушения нагруженного тела необходимо определенное время, которое зависит от температуры, характера и величины приложенной нагрузки [7, 8, 9]:

$$t_p = \tau \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma^*}{RT}\right), \quad (2)$$

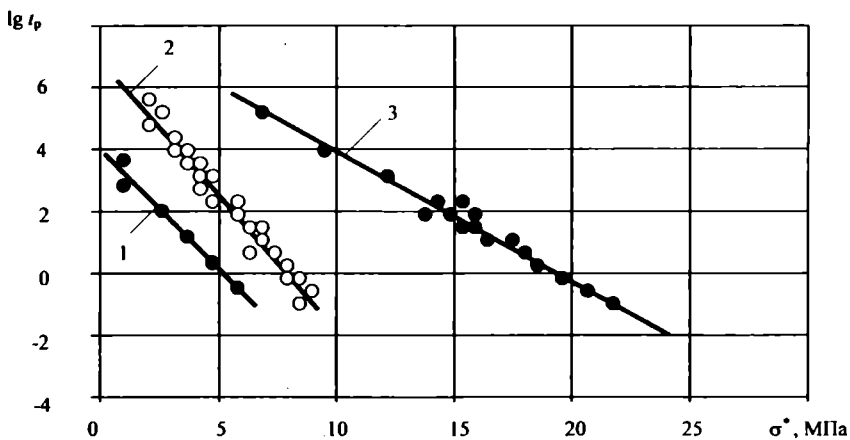
где  $t_p$  – долговечность твердого тела под нагрузкой, с;  $\tau$  – период тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке, с;  $U_0$  – энергия активации атомов, Дж/моль;  $\gamma$  – структурный коэффициент, Дж/Па·моль;  $\sigma^*$  – предел прочности тела на одноосное растяжение, Па.

Для многих материалов закономерность (2) достаточно хорошо подтверждается многочисленными экспериментами (рис. 1) [8]. Однако испытания образцов как при малых напряжениях, так и при малой долговечности показали, что зависимость  $\ln t_p = f(\sigma^*)$  в более широком диапазоне изменения исследуемых параметров является нелинейной (рис. 2) [8, 9, 10].

Обнаруженные отклонения от закономерности (2) не являются результатом влияния случайных факторов или небрежности эксперимента и наталкивают на мысль, что процесс развития разрушения твердых тел во времени имеет более сложный характер.



а



б

Рис. 1. Долговечность различных твердых тел в зависимости от напряжения разрушения:  
 а – поликристаллы: 1 – цинк; 2 – алюминий; 3 – платина; 4 – серебро;  
 б – монокристаллы: 1 – хлористый калий; 2 – хлористый натрий; 3 – фтористый литий

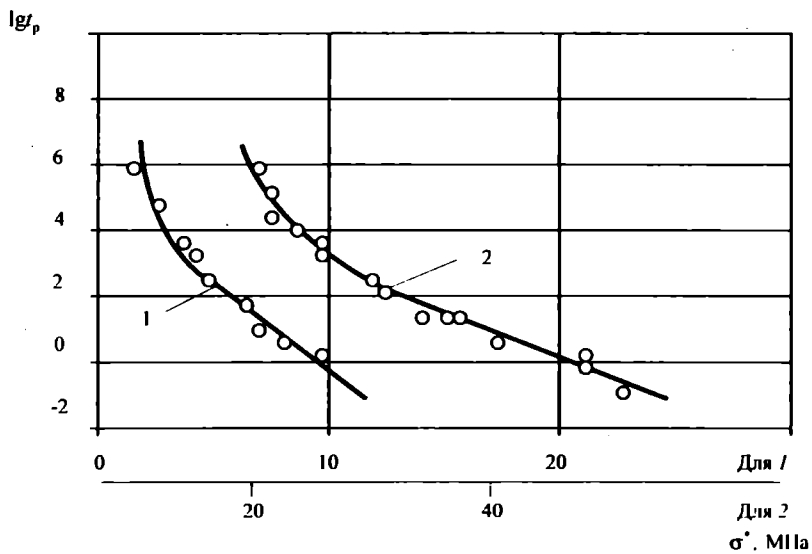


Рис. 2. Силовые зависимости долговечности в области малых нагрузок: 1 – хлористое серебро; 2 – полиметилметакрилат

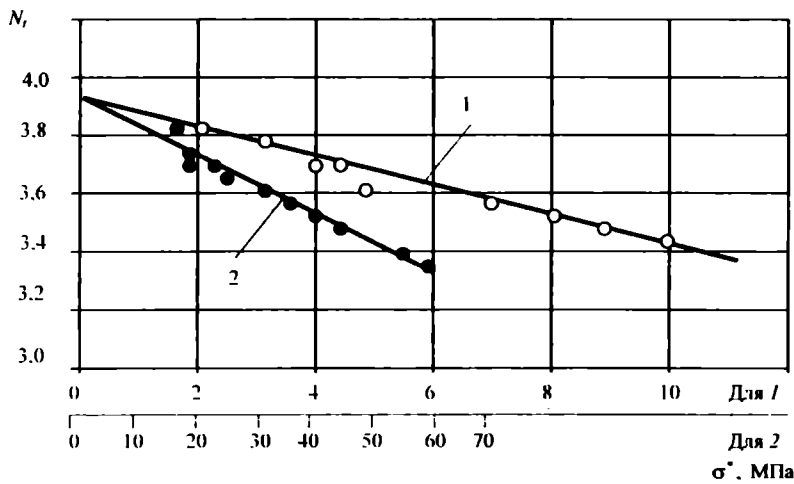


Рис. 3. Зависимость временного параметра  $N_t = \ln[\ln(r_p / \tau) + 1]$  от величины предела прочности материала  $\sigma^*$

Целью данного исследования является установление более общей закономерности изменения долговечности твердых тел под нагрузкой и ее экспериментальное подтверждение.

Теоретические предпосылки и анализ многочисленных результатов экспериментальных исследований позволили предположить, что время нагружения твердого тела до момента разрушения связано с ранее установленными параметрами зависимостью вида

$$t_p = \text{texp} \left[ \frac{U_0}{RT} \exp \left( \frac{\gamma \sigma^*}{U_0} \right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Предлагаемую зависимость можно представить таким образом:

$$\ln \left( \ln \frac{t_p}{\tau} + 1 \right) = \ln \frac{U_0}{RT} - \frac{\gamma G^*}{U_0}. \quad (4)$$

Полученная линейная зависимость достаточно точно и устойчиво подтверждается экспериментальными исследованиями для ряда веществ (рис. 3).

Следовательно, энергия активации  $U(\sigma^*) = U_0 - \gamma \sigma^*$  молекул разрушаемого твердого вещества пропорциональна двойному логарифму от времени нагружения тела до момента его разрушения.

Учитывая, что внутреннюю экспоненту в выражении (3) можно разложить в ряд Тейлора, и ограничившись первым членом разложения, получим ранее приведенную закономерность С.Н. Журкова (2) [7], которая является приближением к более общей зависимости (3).

Приведенные эксперименты позволили подтвердить ранее полученные закономерности разрушения твердых тел и получить новые данные в рамках кинетической теории разрушения:

разрушение твердого тела, в том числе и горных пород, является не мгновенным актом, а развивающимся во времени процессом;

время нагружения твердого тела до момента разрушения подчиняется закономерности (3) и зависит как от физических свойств материала, температуры, так и от условий нагружения;

предел прочности горной породы на растяжение (сжатие) не является полноценной прочностной характеристикой, так как на процесс разрушения влияют в достаточной степени и другие факторы;

энергия активации молекул при разрушении твердого вещества пропорциональна двойному логарифму от времени нагружения тела до момента его разрушения.

1. *Welter G.* // J. Metallkunde. – 1926. – 18. – № 3. – 117.
2. *Mann I.C., Peice F.T.* // Shirly Inst. Memoirs. – 1929. – 5, 7.
3. *Mahnke D.* // J. Phys. – 1934. – 90, 177.

4. *Tobolsky A.V., Eyring H.* // J. Chem. Phys. – 1943. – 1, 125.
5. *Machlin E.S., Nowick A.S.* // Trans. AIME. – 1947. – 172. – P. 386.
6. *Yokobory T.* // J. Phys. Sjc. Japan. – 1951– 6. – 78.
7. *Журков С.Н., Назуллаев Б.Н.* // ЖТФ. – 1953. – 23. – 1677 с.
8. *Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. – Наука: 1974. – 560 с.
9. *Степанов В.А., Песчанская Н.Н., Шнейцман В.В.* Прочность и релаксационные явления в твердых телах. – Л.: Наука, 1984. – 246 с.

УДК 624.539.374

## РАСЧЕТ УПРУГО-ВЯЗКОЙ ДИАФРАГМЫ НА СПЛОШНОМ УПРУГО-ВЯЗКОМ ОСНОВАНИИ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ

*Т. Рембеляк, докт.-инж. (Краковская  
горно-металлургическая академия, РП)*

*Шляхом застосування методу розділення змінних можна розв'язати інтегро-диференціальне рівняння висину діафрагми і деформації основи з урахуванням повзучості матеріалів діафрагми та основи в часі, а також визначити контактні тиски під підшвою діафрагми, прогини в будь-якому перерізі діафрагми, згинальні моменти, поперечні сили. При цьому використовуються параметри повзучості матеріалу діафрагми та основи, змінні модулі деформації діафрагми та основи і величини діафрагмальної функції та її коренів.*

Рассмотрим случай, когда свойствами ползучести обладают и диафрагма и основание. Допустим, что на диафрагму действует внешняя произвольная нагрузка интенсивностью  $q_0(x, t)$ . Требуется определить совместную работу диафрагмы со сплошным основанием из горных пород.

В качестве исходного параметра принимаем реактивное давление основания. Тогда уравнение деформирования основания можно записать в следующем виде:

$$C_{(t)} Y_a(x, t) = P_a(x, t) + \int_{t_0}^t P_a(x, \tau) K_0(t, \tau) d\tau. \quad (1)$$

Изгиб диафрагмы описывается уравнением

$$E_{(t)} I \frac{\partial^4 Y_a(x, t)}{\partial x^4} = q_0(x, t) + \int_{t_0}^t q_0(x, \tau) K(t, \tau) d\tau - P_a(x, t) - \int_{t_0}^t P_a(x, \tau) K(t, \tau) d\tau, \quad (2)$$