

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622:550.372

В. Л. Шкуратник, А. В. Лавров

Московский государственный горный университет, 117935 Москва

Электромагнитный эмиссионный эффект памяти (ЭЭЭП) проявляется при циклическом механическом нагружении образцов горных пород с возрастающей от цикла к циклу амплитудой нагрузки. ЭЭЭП заключается в скачкообразном увеличении активности электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) образца при достижении максимального значения нагрузки предшествующего цикла [1, 2]. Под активностью здесь понимается количество импульсов ЭМЭ в единицу времени.

Интенсивное экспериментальное изучение ЭЭЭП привело к необходимости теоретического осмысления механизма явления. Последнее нашло отражение в разработке теоретической модели эффектов памяти [3]. Модель [3] на основе линейной механики трещин объясняла особенности ряда эффектов памяти горных пород о механических напряжениях. В то же время она была разработана для малых значений нагрузок (меньше предела длительной прочности), и в ней отсутствовал механизм генерации электромагнитных импульсов.

В настоящей работе предлагается развитие модели [3] на весь диапазон значений нагрузок от нуля до предела прочности на сжатие, причем основное внимание уделяется объяснению установленных экспериментально закономерностей ЭЭЭП.

Горная порода до нагружения предполагается содержащей S -образные микротрещины (рис. 1). Существование таких трещин подтверждается экспериментальными исследованиями на модельных материалах и на образцах горных пород [4]. Каждая S -образная микротрещина представляет собой комбинацию трещины сдвига (BC , рис. 1) и двух трещин растяжения (AB и CD). Последние ответвились от сдвиговой трещины при нагружении породы в естественных условиях под действием сдвига по плоскости BC [3–5]. Длина трещин в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, полагается равной 1; рассматривается двумерная задача. Берега трещин не соприкасаются. Расстояние между S -образными трещинами до лабораторного нагружения много больше размеров трещин.

В естественных условиях порода подвергалась действию сложного нагружения с многократной переменной как величин, так и направлений действия главных напряжений. Поэтому начальные длины трещин растяжения l_i^0 (i — номер трещины) представляют собой случайные величины. Примем, что все сдвиговые трещины имеют одинаковую длину L , но ориентированы случайным образом (угол α_i — случайная величина). Это соответствует хаотической исходной трещиноватости породы.

При нагружении такого материала одноосной сжимающей нагрузкой σ (рис. 1) напряженное состояние в устье трещины растяжения характеризуется двумя коэффициентами интенсивности напряжений (КИН): K_I и K_{II} .

Значение K_I определяется действием растягивающих сил в точках B и C (рис. 1), что обуславливается сдвигом по плоскости BC . КИН K_I в случае S -образной трещины

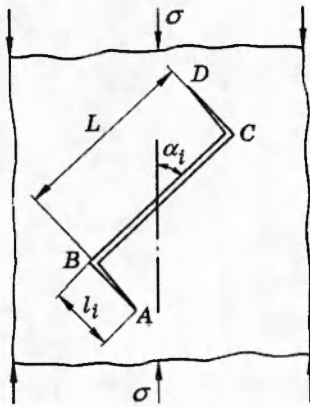


Рис. 1

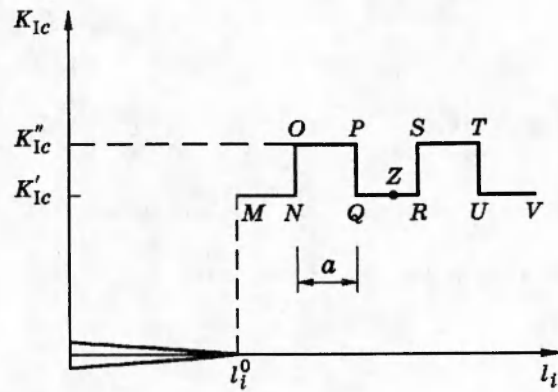


Рис. 2

определяется как [3, 5]

$$K_I = \frac{\sigma L \sin 2\alpha_i}{4\zeta\sqrt{l_i}} \quad (1)$$

(ζ — безразмерный коэффициент [3]), а КИН K_{II} — сдвигом по плоскости трещины растяжения:

$$K_{II} = \frac{\sigma}{2}\xi\sqrt{\pi l_i} \sin 2\alpha_i. \quad (2)$$

Здесь ξ — безразмерный коэффициент, характеризующий конфигурацию S-образной трещины (влияние свободной плоскости BC).

При малых значениях l_i величина K_{II} мала, и условием роста трещины является

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (3)$$

(K_{Ic} — критический КИН для трещины нормального отрыва).

Увеличение длин трещин растяжения в процессе их роста приводит к уменьшению K_I , поэтому при больших нагрузках условием, определяющим развитие трещин, будет

$$K_{II} \geq K_{IIc} \quad (4)$$

(K_{IIc} — критический КИН для трещины продольного сдвига).

Горные породы представляют собой среды, неоднородные на микроуровне по прочностным параметрам K_{Ic} и K_{IIc} . Эта неоднородность обусловлена прежде всего зернистостью породы, так как каждое зерно и каждый межзеренный контакт имеют, вообще говоря, свою прочность.

Вследствие невозможности и нецелесообразности рассмотрения реального характера неоднородности породы примем, что на пути развития трещины растяжения (лучи BA и CD на рис. 1) встречаются участки двух значений K_{Ic} : K_{Ic}' и K_{Ic}'' (рис. 2). Длины всех участков постоянной прочности одинаковы и равны a .

Рост нагрузки от нуля до некоторого значения σ приводит к монотонному увеличению K_I , и при напряжении $\sigma = 4\zeta K_{Ic}'\sqrt{l_i^0}/(L \sin 2\alpha_i)$ начнется рост i -й трещины растяжения. Так как величины l_i^0 и α_i случайные, рост трещин начнется не одновременно. Увеличение нагрузки приведет к тому, что в игру будет включаться все большее количество трещин.

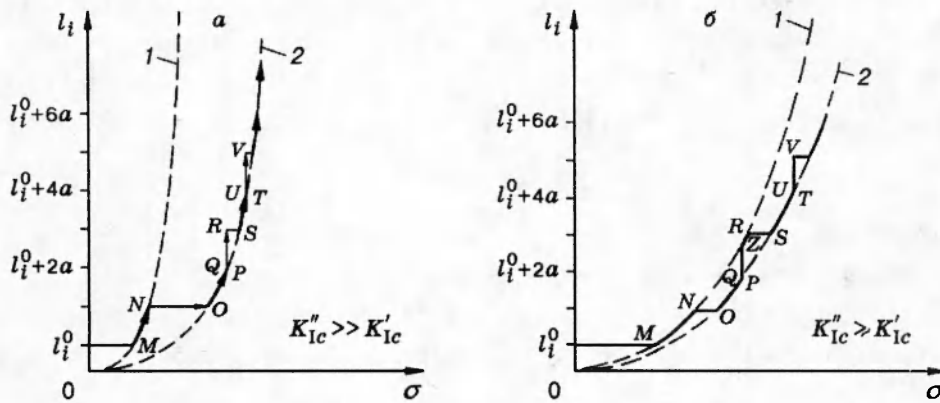


Рис. 3

Рост трещины, контролируемый условием (3), будет происходить стабильно, так как при увеличении l_i ; значение K_I , как следует из (1), уменьшается, и для продолжения роста трещины необходимо увеличение σ . На участке равной прочности ($\bar{K}_{Ic}'' = K_{Ic}' = \text{const}$) трещина растет без остановки с увеличением нагрузки.

При подходе к участку OP (рис. 2) трещина остановится, так как достигнутый уровень нагрузки не позволяет ей преодолеть барьер NO . Увеличение напряжения до $\sigma = 4\zeta K_{Ic}'' \sqrt{l_i^0 + a} / (L \sin 2\alpha_i)$ приведет к возобновлению роста трещины, который будет с увеличением σ продолжаться непрерывно на всем участке OP .

В точке P имеет место уменьшение \bar{K}_{Ic}'' до K_{Ic}' . При этом достигнутое значение σ уже превышает необходимое для роста трещины, и идет скачкообразное прорастание трещины до длины, соответствующей достигнутому уровню нагрузки; оно происходит в идеале мгновенно при $\sigma = \text{const}$.

Дальнейшее развитие трещины может идти двояко. В случае, если значение K_{Ic}'' достаточно велико по сравнению с K_{Ic}' :

$$K_{Ic}'' \geq K_{Ic}' \sqrt{(l_i^0 + 3a) / (l_i^0 + 2a)}, \quad (5)$$

может произойти рост трещины на всем участке QR при $\sigma = \text{const}$. При подходе к барьеру RS потребуется новое увеличение нагрузки, и здесь трещина остановит свой рост.

В случае, если \bar{K}_{Ic}'' не намного превышает K_{Ic}' (условие (5) не выполняется), рост трещины с некоторой точки Z (рис. 2) начнет контролироваться параметром K_{Ic}' . При подходе к барьеру RS трещина замрет и затем возобновит свой рост при выполнении условия $K_{Ic} \geq K_{Ic}''$.

Две обозначенные возможности иллюстрирует рис. 3, где штриховые линии — зависимости длины трещины от нагрузки в однородном по \bar{K}_{Ic}'' материале (линия 1 соответствует $K_{Ic} = K_{Ic}'$; 2 — $K_{Ic} = K_{Ic}''$). Как видно из рис. 3,а, рост трещины в гетерогенной среде с сильно различающимися значениями K_{Ic}' и \bar{K}_{Ic}'' контролируется фактически только одним параметром \bar{K}_{Ic}'' , т. е. большим из критических КИН. В то же время из рис. 3,б и формулы (5) видно, что в среде с близкими значениями K_{Ic}' и \bar{K}_{Ic}'' рост трещины рано или поздно также начинает контролироваться всего одним параметром — КИН K_{Ic}'' . Поэтому далее будем рассматривать только случай среды с сильно различающимися значениями K_{Ic}' и K_{Ic}'' (рис. 3,а).

Рост трещины сопровождается электризацией ее берегов вследствие разделения раз-

ноименных зарядов на образующихся поверхностях разрушения. При разведении берегов напряженность поля между ними возрастает, и при достижении пробойного напряжения начинается разряд [6]. Сила разрядного тока спадает по экспоненциальному закону, вследствие чего импульсы эмиссии имеют наблюдающуюся на опыте пилообразную форму:

$$E = E_0 \exp(-t/\tau).$$

Здесь E — напряженность электрического поля в импульсе ЭМЭ; E_0 — начальное значение E ; τ — постоянная времени разряда.

Таким образом, прорастанию трещины на $2a$ (от остановки до остановки) соответствует один пилообразный импульс ЭМЭ. Под остановками в данном случае понимаются участки типа RS на рис. 2, 3.

Определим зависимость активности эмиссии \dot{N} (число импульсов в 1 с) от напряжения σ . Как видно из рис. 3, а,

$$\dot{N} = \frac{d[(l_i - l_i^0)/2a]}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dt}.$$

После подстановки

$$l_i = (\sigma L \sin 2\alpha_i / 4\zeta K_{Ic}''')^2 \quad (6)$$

получим

$$\dot{N} = \frac{\sigma L \sin 2\alpha_i}{4\zeta a K_{Ic}'''} \frac{d\sigma}{dt}. \quad (7)$$

Как видно из (7), интенсивность ЭМЭ возрастает с увеличением нагрузки, что подтверждается многочисленными экспериментами [7].

В рамках предлагаемой модели находит объяснение также следующий экспериментально установленный факт: суммарное количество импульсов до разрушения n_Σ уменьшается при переходе от более прочных к менее прочным породам, а также в рамках одной породы при переходе от более прочных к менее прочным разновидностям [8]. Действительно, значения прочности наиболее прочных зерен K_{Ic}''' одинаковы у пород одного минералогического состава и близки у пород разных видов. Суммарное количество импульсов, накопленных при увеличении нагрузки от 0 до σ , имеет вид

$$n_\Sigma = \frac{l_i - l_i^0}{2a} \simeq \frac{(\sigma L \sin 2\alpha_i / 4\zeta K_{Ic}''')^2}{2a} \quad (8)$$

(в последнем переходе учитывается, что с ростом нагрузки начинает выполняться условие $l_i \gg l_i^0$). Как видно из (8), при одинаковых значениях L , ζ , K_{Ic}''' , a породы, которые могут выдержать более высокие напряжения без разрушения, излучают большее суммарное количество импульсов ЭМЭ.

Еще одним экспериментальным фактом является рост амплитуд импульсов ЭМЭ с увеличением σ . Из рис. 3, а видно, что с увеличением нагрузки для прорастания трещины на $2a$ требуется все меньшее и меньшее приращение σ . В силу пропорциональности нагрузки и времени это означает, что прорастание трещины на $2a$ происходит за меньшее время. При раздвижении берегов трещины до начала разряда имеет место нейтрализация поверхностного заряда в результате прохождения тока по породе. Снижение времени раздвижения уменьшает стекание зарядов, что приводит к увеличению начального значения разрядного тока. Вместе с ним растет и E_0 .

Перейдем к объяснению на основе предлагаемой модели закономерностей ЭЭЭП. Пусть в первом цикле нагружения образец был нагружен до максимального напряжения σ_m . Это означает, что после разгрузки длина трещин определяется равенством (6), где вместо σ следует подставить σ_m .

При нагружении во втором цикле от 0 до σ_m условие (3) не выполняется, и трещины не растут. Достижение уровня нагрузки $\sigma = \sigma_m$ приводит к возобновлению роста трещин и восстановлению достигнутого в первом цикле значения активности ЭМЭ.

Рассмотрим теперь процессы роста трещин при приближении к пределу прочности. Приближение к пределу прочности будет сопровождаться увеличением длин трещин растяжения. В результате рост трещин начнет контролироваться условием (4). Рост трещины, контролируемой (4), происходит нестабильно; однажды начавшись, он не может остановиться, поскольку $K_{II} \sim \sqrt{l_i}$. Поэтому он будет происходить до тех пор, пока трещина не выйдет на свободную поверхность (поверхность образца или другой S -образной трещины), либо пока от нее не ответвится вторичная трещина растяжения.

Последнее становится возможным благодаря тому, что прежняя трещина растяжения теперь сама работает как трещина сдвига с КИН, определяемым (2). Рост вторичной трещины растяжения будет происходить при $\sigma = \text{const}$, так как достигнутого значения нагрузки вполне хватает для роста и больших трещин.

Слияние и безостановочный рост сдвиговых трещин и трещин растяжения приводят к нарушению соответствия между значениями нагрузки и длин трещин. Это ведет, в свою очередь, к исчезновению ЭЭЭП.

Таким образом, предложенная модель объясняет экспериментально установленные закономерности ЭЭЭП хрупких горных пород.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-05-14224).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ржевский В. В., Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л. и др. Эмиссионные эффекты «памяти» в горных породах // Докл. АН СССР. 1983. Т. 273, № 5. С. 1094–1097.
2. Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лавров А. В. Эффекты памяти в горных породах (обзор) // Физ. техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1994. № 5. С. 57–69.
3. Шкуратник В. Л., Лавров А. В. О теоретической модели эффектов памяти в горных породах // Физ. техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1995. № 1. С. 25–34.
4. Brace W. F., Paulding B. W., Scholz C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geoph. Res. 1966. V. 71, N 16. P. 3939–3953.
5. Ashby M. F., Sammis C. G. The damage mechanics of brittle solids in compression // Pure and Appl. Geoph. 1990. V. 133, N 3. P. 489–521.
6. Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1982.
7. Булат А. Ф., Хохлов В. К. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов. Киев: Наук. думка, 1990.
8. Гольд Р. М., Марков Г. П., Могила П. Г., Самохвалов М. А. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подверженных механическому нагружению // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 7. С. 109–111.

Поступила в редакцию 24/VIII 1995 г.