

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ МРАМОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

К.А. Герман

Рассматривается непосредственное воздействие электрического поля на кристаллическую решетку минералов и изменение процесса деформации породы в связи с существенным изменением их свойств.

Ключевые слова: разрушение; трещина; дислокация; воздействие электромагнитных полей.

Электрические и магнитные поля могут непосредственно воздействовать на горные породы за счет смещения электрического и магнитного ориентирования (поляризация и намагничивание), возбуждения электронов и ионов или косвенно – через тепловое поле, в которое трансформируется электрическая энергия в породах.

В связи с этим выделяют три группы явлений: 1) нагрев пород; 2) непосредственное изменение свойств пород под воздействием поля; 3) пробой пород.

Электромагнитное поле не только является источником тепла в горной породе, но и непосредственно воздействует на кристаллическую решетку минералов, существенно изменяя их свойства. Это связано с тем, что дислокации, имеющиеся в породе, как правило, обладают некоторым электрическим зарядом [1]. Поэтому внешнее электромагнитное поле способно переориентировать дислокацию или сдвинуть в определенном направлении. Это способствует пластической деформации пород.

В результате воздействия электромагнитного поля на некоторые породы даже при отсутствии нагрева последних происходит довольно существенное изменение модуля Юнга (в 2–3 раза), предела прочности при сжатии и возрастание пластической деформации. Это было отмечено после экспериментов на образцах из сфалерита [1].

Электрическое поле способно также непосредственно изменять состояние пород за счет электростатической, эффекта изменения линейных размеров вещества в момент приложения к нему электрического поля. Механические напряжения σ , возникающие в результате электростатической, прямо пропорциональны квадрату напряженности поля:

$$\sigma = 0,5 \varepsilon_0 \varepsilon_r E_{\gamma}^2, \quad (1)$$

где E_{γ} – напряженность электрического поля; ε_0 – электрическая постоянная, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Рассмотрим задачу разрушения горных пород под действием электромагнитных полей (ЭМП), когда сила тока невысока, а сопротивление току достаточно высоко. Это можно сделать с привлечением модели Леонова–Панасюка–Дагдейла [2].

В работе [3] приводится теоретическое обоснование воздействия электромагнитных полей на дефекты материала.

Для учета электромагнитных воздействий вводится следующее предположение [3]. При больших длинах трещин и малой критической силе p_c сравнительно с σ_0 выражение $p_c = \frac{2}{\pi} \sigma_0 \arccos \left[\exp \left(-\frac{\delta_c \pi E}{8 l \sigma_0} \right) \right]$ [3–5] преобразуется к виду

$$p_c = \sqrt{\frac{\delta_c \sigma_0 E}{\pi l}}, \quad (2)$$

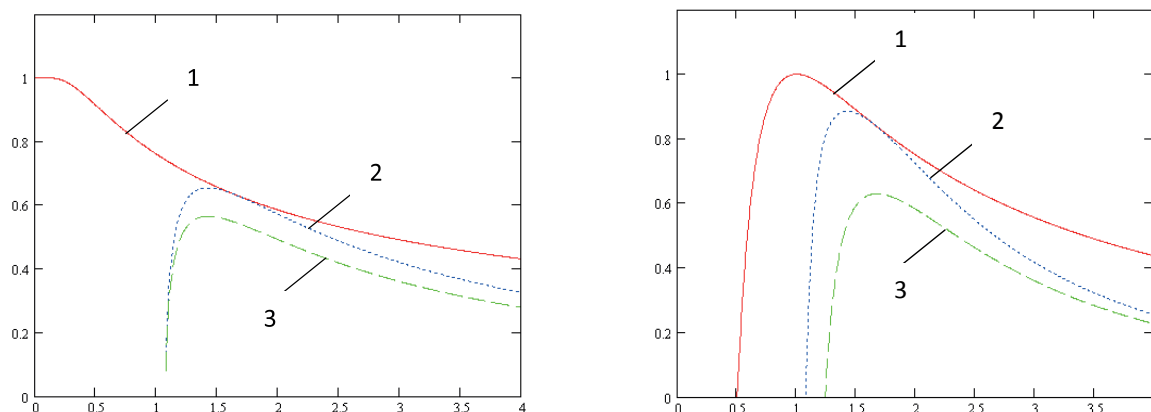
где σ_0 – напряжения, при которых происходит раскрытие трещины, E – модуль Юнга, l – длина трещины, δ_c – величина раскрытия трещины.

Зависимость (2) совпадает с формулой Гриффитса при $\sigma_0 \delta_c = G$, а также получена Леоновым–Панасюком [2] в виде $2\gamma = \sigma_{теор} \delta_c$, причем γ – поверхностная энергия, $\sigma_{теор}$ – теоретический предел прочности.

В работе [3] проводится оценка поверхностной энергии, равной

$$\gamma \approx \frac{E r_0}{2\pi \cdot 10} \approx 0,01 E r_0, \quad (3)$$

где r_0 – межатомное расстояние порядка $10^{-10} \div 10^{-9}$ м.



Примечание: 1 – зависимость построена на основании модели Леонова-Панасюка-Дагдейла; 2 – построена с учетом докритического роста трещины; 3 – учетно-электромагнитное воздействие.

Рисунок 1 – Зависимость нагрузки от длины прямолинейной и дисковидной трещин:
 а) прямолинейная трещина в неограниченном пространстве;
 б) дисковидная трещина в неограниченном пространстве

Как видно, поверхностная энергия остается постоянной независимо от условий воздействия на образец, так как определяется только модулем Юнга и межатомным расстоянием.

Предположим, что при воздействии на образец электромагнитными полями понижается значение предела разрушения σ_0 на величину σ' , определяемую по формуле (1). Тогда предел разрушения равен величине $\sigma^* = \sigma_0 - \sigma'$. Следовательно, уменьшение предельных напряжений σ_0 ведет к пропорциональному увеличению δ_c .

Иллюстрацией к сказанному являются графики зависимости нагрузки от длины прямолинейной и дисковидной трещин (рисунок 1) при простом нагружении и воздействии на них электромагнитного поля.

На рисунке 1 по оси ординат отложен нормированный параметр нагрузки $\lambda = \frac{p}{\sigma_0}$, а по оси абсцисс – параметр, зависящий от длины трещины $\zeta = \frac{l}{c}$, где $c = \frac{\pi E \delta_c}{8 \sigma_0}$.

Для учета влияния электрического поля на разрушение материала был проведен эксперимент на установке, описанной в [6]. Для образцов был выбран материал – мрамор (месторождение Чичкан, Кыргызстан). Мрамор является карбонатной породой, в той или иной степени раскристаллизованной в результате метаморфизма и состоящей в основном из минералов кальцита или доломита. Цвет чичканского мрамора – белый, содержит примеси – кварц и другие твердые ми-

нералы. Удельный вес мрамора 2,69–2,88, объемный вес 2,59–2,86, твердость по Моосу 3–3,5. Пористость мрамора – в пределах 0,7–1,5 %, водопоглощение 0,12–1,5 % вес. Удельное объемное электрическое сопротивление мрамора меняется от 105 до 1013 Ом см; пробивное напряжение – от 10 до 45 кВ/см. Предел прочности при сжатии от 400 до 1000 кг/см²; наименьшая прочность у крупнокристаллического мрамора, наибольшая – у тонкозернистого. Предел прочности при разрыве 60–150 кг/см²; прочность при изгибе 80–295 кг/см².

Образец представляет собой параллелепипед 90×30×30 мм. Линейные размеры отклоняются от заданных в пределах ±0,1 мм (10⁻³м) отклонение от параллельности не превышает 0,1 мкм (10⁻⁸м).

На образец устанавливаются электроды и пьезоэлектрический датчик акустической эмиссии для косвенного контроля процесса деформирования.

Нагружение производилось непрерывно до разрушения. Скорость нагружения 40 кг/см² в час. Таким образом, скорость деформирования является очень малой и можно считать нагружение квазистатическим. Это означает, что скорость деформирования можно не учитывать.

В процессе нагружения на образец проводилось непрерывное воздействие электрическим полем генератора ГП-54, частотой 20 кГц. Импульсы прямоугольной формы и положительного заряда, скважность равна 2, напряжение 10В.

В результате проведенных экспериментов были получены следующие зависимости диаграммы “напряжение – деформации” (рисунок 2).

Диаграмму “напряжение – деформации”, полученную при нагрузке под воздействием электрического поля, можно разделить на два участка:

- На начальном этапе электрическое поле заставляет перестраиваться структуру материала, локальный предел прочности понижается, материал как бы течет. По окончании первого этапа свойства материала выравниваются. Мрамор становится однородным, дефекты тормозятся и в дальнейшем не работают, либо играют роль барьеров. Например, источник Франка-Рида вызывает дислокации порядка 50 штук и впоследствии локализуется и приходит в равновесное состояние.
- На втором участке деформирование материала происходит аналогично исходному. Однако изменились модуль Юнга и предел разрушения σ_b , который повысился на 25 %.

Эти графики подтверждают первоначальные теоретические выкладки по влиянию электрического поля на раскрытие трещины. Этим объясняется зубчатое строение графика на первом участке, где происходит мгновенное проскальзывание микротрещин.

Таким образом, мы можем оценить влияние размера трещины и величины электрического поля на разрушение горных пород, используя модель Леонова-Панасюка-Дагдейла, в которой учитывается величина раскрытия трещины.

Литература

1. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. М.: Недра, 1984. 359 с.

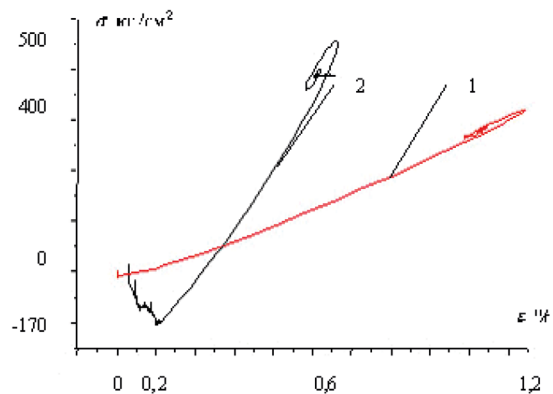


Рисунок 2 – Диаграмма “напряжение – деформации”: 1 – нагружение без воздействий; 2 – нагружение с воздействием электрического поля

2. Леонов М.Я. Розвиток найдрібніших тріщин в твердому тілі / М.Я. Леонов, В.В. Панасюк // Прикл. механіка. 1959. Т. 5. № 4. С. 391–401.

3. Герман К.А. Разрушение материала при воздействии электромагнитного поля / К.А. Герман // Вестник КРСУ. 2009. Т. 9. № 11.

4. Пестриков В.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. СПб.: Профессия, 2002. 320 с., ил.

5. Морозов Н.Ф. Математическая теория трещин / Н.Ф. Морозов. М.: Наука. 1984. 254 с.

6. Герман К.А. Установка для натуральных исследований деформационных процессов в горных породах / К.А. Герман, Б.В. Боровский // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 68–73.