

УДК 539.3 (575.2) (04)

РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

К.А. Герман – канд. физ.-мат. наук

Нагружению тела с трещиной, находящемуся под электромагнитным воздействием, отвечает меньшее значение разрушающей нагрузки. Обоснование полученных экспериментальных данных предлагается осуществить на основании модели разрушения Леонова – Панасюка с учетом докритического роста трещины.

Ключевые слова: разрушение; трещина; воздействие электромагнитных полей.

В геофизике развито направление [1, 2], рассматривающее воздействие на горные породы электрического и магнитного поля. Электромагнитные методы разведки ставят задачи индуктивного и электромагнитного зондирования. Следует, однако, отметить, что поведение нагруженных горных пород под воздействием электрического поля до конца не исследовано. Этот пробел можно восполнить, применяя подходы, которые обсуждались в [3–7]. В них было описано влияние различных внешних воздействий на механизмы пластической деформации. Для металлов был установлен эффект повышения пластичности в результате облучения ускоренными электронами во время деформации и при воздействии импульсным током (электропластический эффект). Первоначально этот эффект был обнаружен в кристаллах цинка в 1963 г. Для интерпретации результатов эксперимента авторы работы [3] исходят из предположения, что облучение кристаллов в процессе деформации увеличивает подвижность имеющихся источников дислокаций и провоцирует начало работы новых источников. Механизм такого явления объясняется ускорением движения дислокаций в районе источников, которое может быть причиной интенсификации их деятельности. Электрический ток, как и облучение, также приводит к возбуждению дополнительных импульсных сил, действующих на дислокации. В [4, 5] изучено влияние импульсного тока на ползучесть монокристаллов цинка. В [6] рассмотрено влияние магнитного поля на пластичность и неупругие свойства кристаллов LiF (литий-фтор). Взаимосвязь электрических полей, обусловленных по-

ляризацией горных пород, с релаксационными процессами, определяющими выравнивание неоднородностей напряжения, обнаружено в [7].

На основании выполненного краткого обзора, можно заключить, что во всех случаях проводится обобщение полученных данных без достаточного теоретического обоснования. Экспериментально обнаруженные эффекты разрушения, по-видимому, можно объяснить с помощью известных моделей разрушения, в частности, модели Леонова – Панасюка – Дагдейла [10].

Рассмотрим задачу разрушения горных пород под действием электромагнитных полей (ЭМП) с привлечением модели [10].

Согласно модели [10], деформации локализуются в виде полосы на кончике трещины. Напряжения в конце трещины не превышают предельных напряжений σ_0 . Воспользовавшись формулами, приведенными в [8, 9], получим критическую силу p_c

$$p_c = \frac{2}{\pi} \sigma_0 \arccos \left[\exp \left(-\frac{\delta_c \pi E}{8 l \sigma_0} \right) \right], \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, l – длина трещины, δ_c – величина раскрытия трещины.

Теперь рассмотрим докритический рост трещины. По Леонову – Панасюку $\delta = \delta_c$ есть величина раскрытия трещины любого размера (рис. 1 а).

Введем предположение о том, что для трещины докритического размера ($l \sim 10^{-9}$ м) увеличение длины происходит при меньших величинах раскрытия $\delta (\delta \leq \delta_c)$. Будем считать, что δ – некоторая функция от δ_c , (рис. 1б), тогда можно описать докритический рост трещины.

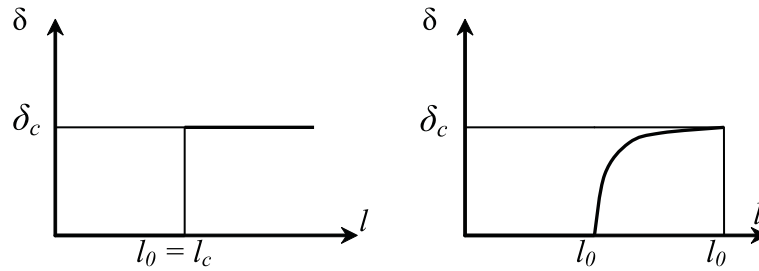


Рис. 1. Зависимость раскрытия σ трещины от длины l :
а – раскрытие по Леонову – Панасюку $\sigma = \sigma_c$;
б – раскрытие трещины $\sigma = f(l)$, с учетом докритического роста.

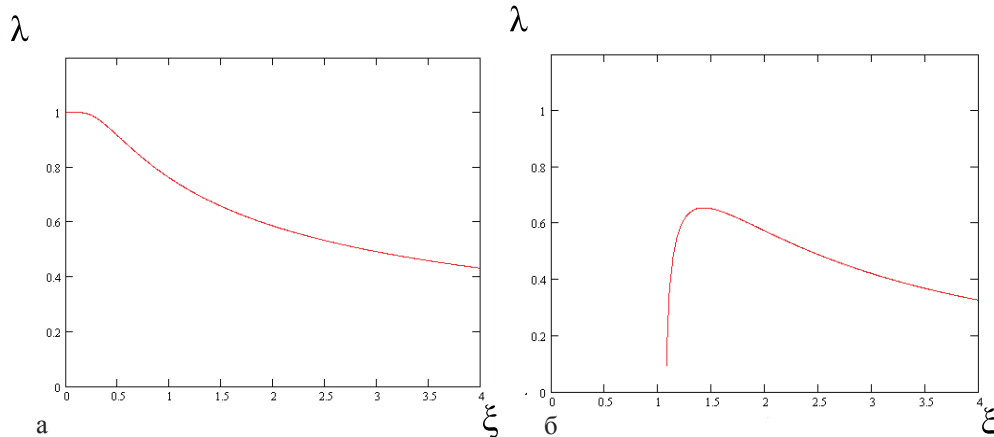


Рис. 2. Кривая разрушения:
а – без учета докритического роста (модель Леонова – Панасюка – Дагдейла);
б – с учетом докритического роста.

На рис. 2 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 электромагнитных воздействий введем следующие предположения.

При больших длинах трещин и малой критической силе p_c по сравнению с σ_0 выражение (1) преобразуется к виду

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

Зависимость (2) совпадает с формулой Гриффитса при $\sigma_0 \delta_c$, а также получена Леоновым – Панасюком [10] в виде $2\gamma = \sigma_{теор} \delta_c$, причем γ – поверхностная энергия; $\sigma_{теор}$ – теоретический предел прочности.

Для оценки поверхностной энергии подсчитаем ориентировочное значение γ , определяемое интегралом:

$$2\gamma = \int_{r_0}^{\infty} \sigma dr = \int_{r_0}^{\frac{2}{3}r_0} \sigma_c \sin 2\pi \frac{r-r_0}{r_0} dr = \frac{\sigma_c r_0}{\pi},$$

$$\gamma \approx \frac{E r_0}{2\pi * 10} \approx 0,01 E r_0,$$

где r – расстояние от вершины трещины, r_0 – межатомное расстояние порядка $10^{-10} \div 10^{-9}$ м.

Как видно из полученных выражений, 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

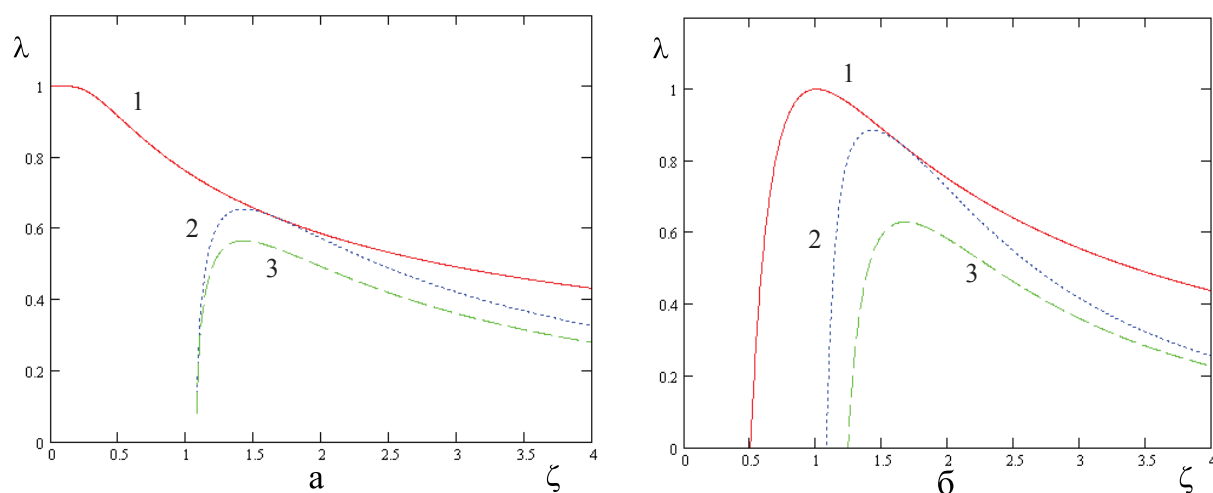


Рис. 3. Зависимость нагрузки от длины трещины:
 а – прямолинейная трещина в неограниченном пространстве;
 б – дисковидная трещина в неограниченном пространстве.
 1 – зависимость построена на основании модели Леонова – Панасюка – Дагдейла.
 2 – с учетом докритического роста трещины.
 3 – зависимость построена с учетом электромагнитного воздействия.

(здесь E' – напряженность электрического поля; ϵ'_0 – электрическая постоянная; ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость среды), причем σ' составляет примерно $0,1\sigma_0$. Тогда предел разрушения понижается на величину $\sigma^* = \sigma_0 - \sigma'$. Следовательно, уменьшение предельных напряжений σ_0 ведёт к пропорциональному увеличению δ_c .

Иллюстрацией к сказанному являются графики зависимости нагрузки от длины трещины для прямолинейной (а) и дисковидной (б) трещин (рис. 3) при простом нагружении и при воздействии электромагнитного поля.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 07-05-006870.

Литература

1. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984 – 359 с.
2. Хмельницкий В.К. Электроразведка. – М.: МГУ, 1984. – 422 с.
3. Троицкий О.А., Лихтман В.И. Об анизотропии действия электронного и γ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии // ДАН СССР. – 1963. – Т. 148. – С. 332–334.
4. Троицкий О.А., Спицын В.И., Сташенко В.И. Влияние основных параметров тока на величину электронно-пластического эффекта // ДАН СССР. – 1981. – Т. 256. – С. 1134–1137.
5. Сташенко В.И., Троицкий О.А. Влияние частоты импульсного тока и внешнего механического напряжения на скорость ползучести кристаллов // Физика металлов и материаловедение. – 1982. – Т. 53. – С. 180–184.
6. Тяпунина Н.А. Влияние магнитного поля на дислокационную неупругость и пластичность кристаллов LiF с различными примесями // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. – №7. – С. 1202–1205.
7. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39. – Вып. 1. – С. 95–100.
8. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: Курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с., ил.
9. Морозов Н.Ф. Математическая теория трещин. – М.: Наука. 1984. – 254 с.
10. Леонов М.Я., Панасюк В.В. Розвиток найдрібніших тріщин в твердому тілі // Прикл. механіка. – 1959. – Т. 5. – №4. – С. 391–401.