

05

Влияние механического поля на поляризацию природных диэлектриков (горных пород)

© В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: victor.kuksenko@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 марта 2004 г.

Образец из мрамора, не обладающий пьезоэлектрическим эффектом, нагружался одноосносжимающей нагрузкой, и высокочувствительным электрометром бесконтактным способом измерялись возникающие потенциалы электрического поля. Во втором случае на две противоположные стороны через специальные электроды подавались слабые электрические потенциалы и образец нагружался той же механической нагрузкой. Показано, что электрические потенциалы, возникающие при механическом нагружении, существенно отличаются при наложении электростатической поляризации образца.

Электромеханические явления в природных диэлектриках имеют кроме научного интереса большую практическую значимость в связи с трактовкой электромагнитных предвестников землетрясений [1–3]. Кроме того, это позволит понять физические процессы мощных откликов на слабые воздействия, в том числе и электромагнитные на сейсмичность [4] и на особое состояние твердых тел [5,6]. В работе [7] показано, что появление электрического поля при механическом нагружении твердых диэлектриков имеет много общего с их поляризацией в слабых электрических полях. В настоящей работе сделана попытка исследовать влияние механического напряжения на поляризацию твердых диэлектриков в слабых электрических полях. Для простоты будем называть электрический потенциал при нагружении образца механической нагрузкой механоэлектрическим потенциалом (МЭП) в отличие от электрического потенциала (ЭП) при обычной поляризации образца в электрическом поле. В данной работе приводятся результаты для образцов из мрамора. Мрамор широко используется в лабораторных исследованиях, поскольку ему присущи основные свойства твердых

диэлектриков. В то же время он не обладает пьезоэлектрическим эффектом, что важно для наших исследований.

Образец мрамора в виде призмы размером $40 \times 40 \times 100$ mm нагружался в гидравлическом прессе через электрические изоляторы. На две противоположные боковые поверхности образца крепились электроды из эпоксидной смолы с серебряным порошком, что позволяло существенно ослабить контактные потенциалы. Электрические потенциалы на электроды подавались от источника постоянного напряжения. При необходимости электроды могли заземляться. Регистрация потенциалов электрического поля в образце как МЭП, так и ЭП производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра ЭМ. Зонд электрометра крепился на стойке с микрометрической подачей для сканирования вдоль поверхности исследуемого образца при зазоре 2 mm между поверхностью образца и зондом.

При одноосном сжатии образца из мрамора в нем возникает индуцированное электрическое поле МЭП. В отсутствие механической нагрузки при приложении к электродам разности потенциалов возникает поляризация образца. При этом индуцированное электрическое поле ЭП симметрично относительно центра образца, и можно указать участки поверхности образца с положительными и отрицательными потенциалами.

На рис. 1 приведена последовательность измерений МЭП и ЭП при фиксированном положении регистрирующего зонда. В момент времени t_1 образец был нагружен одноосжимающей нагрузкой $P = 0.3$ от разрушающей и сразу же разгружен. При этом был зарегистрирован положительный потенциал МЭП ($+F$ mV). Затем в момент времени t_2 на электроды подавалась разность потенциалов 2 V такой полярности, чтобы в измеряемой точке ЭП был той же полярности, что и МЭП, т. е. положительный ($+F_e$). После выхода F_e на стационарный участок t_2-t_3 на образец подавалась та же нагрузка, и образец снова разгружался. При этом МЭП возрастал на величину ΔF . Обозначим при этом суммарный потенциал через $+\psi$. При разгрузке образца потенциал $+\psi$ возвращался к F_e . После этого в момент времени t_4 напряжение на электродах снималось, и они на некоторое время заземлялись для электрической нейтрализации образца. Через некоторое время в момент t_5 на электроды снова подавалась разность потенциалов той же величины, но противоположной полярности. Зонд регистрировал появление потенциала отрицательной полярности, который через некоторое

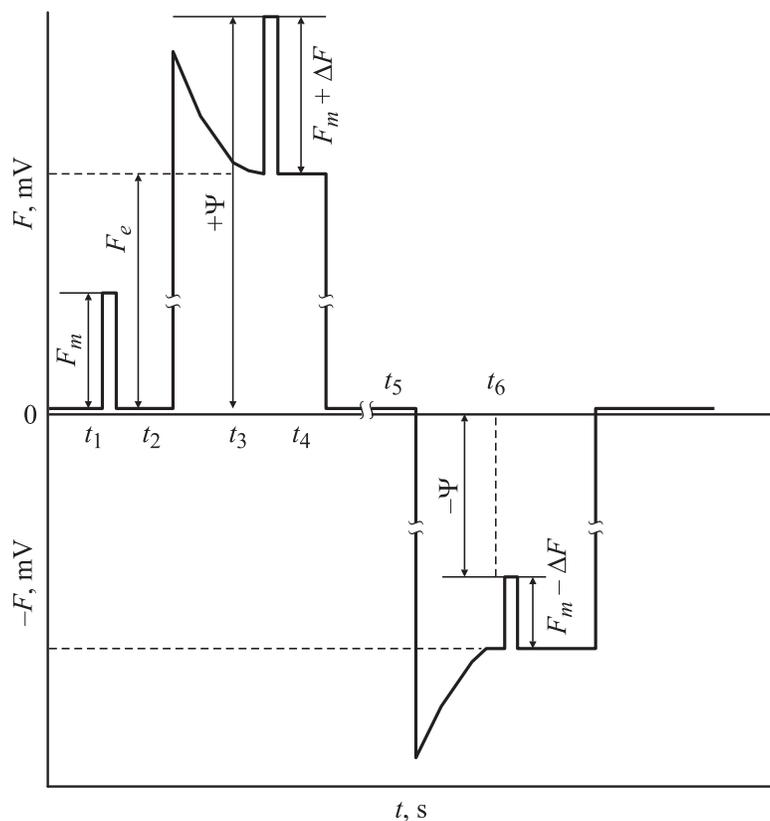


Рис. 1. Последовательность изменения ЭП и МЭП при воздействии на образец механического и электрического полей.

время выходил на стационарный уровень F_e . Затем образец одноосно сжимался той же самой нагрузкой (момент времени t_6). Регистрируемый при этом потенциал уменьшался на величину ΔF , а результирующий потенциал электрического поля был $-\psi$. После разгрузки потенциал восстанавливался до $-F_e$. Затем электроды заземлялись для электрической нейтрализации образца. Эта процедура измерений повторялась в одном случае при ступенчатом изменении механической нагрузки при

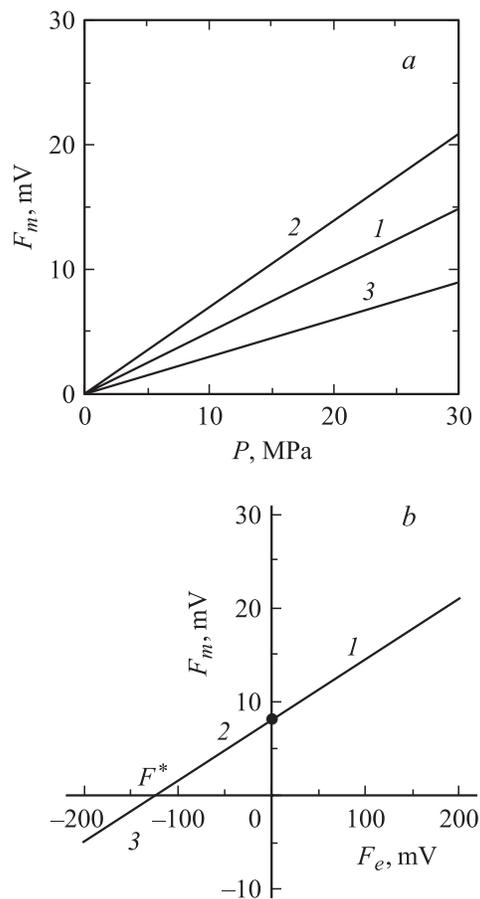


Рис. 2. Зависимость МЭП от механического сжимающего напряжения P (а) и величины полярности электрического потенциала (b).

постоянной разности потенциалов на электродах, в другом случае — при изменении величины разности потенциалов.

На рис. 2, а представлены зависимости потенциала МЭП (F_m) от величины нагрузки. Зависимость 1 — при отсутствии электрической поляризации. Зависимость 2 получена для случая совпадения полярно-

стей ЭП и МЭП от электрической и механической поляризации, т.е. F_e и F_m имеют одинаковые знаки. Зависимость \mathcal{J} , напротив, для случая противоположных полярностей ЭП и МЭП. В этой области нагрузок все зависимости линейны, но их наклоны различны.

Формально можно ввести по аналогии с пьезомодулем электромеханический модуль материала θ .

$$\theta = \Delta F_m / \Delta P.$$

В данном случае не приходится говорить об абсолютных значениях этого модуля, так как он зависит от конструкции зонда, его размеров, зазора между зондом и образцом и других параметров. Но относительное изменение θ может характеризовать влияние механической нагрузки на МЭП при одновременной электрической поляризации. Можно утверждать, что когда полярности ЭП и МЭП совпадают, то электромеханический модуль возрастает, и наоборот, он уменьшается при несовпадении полярностей. На рис. 2, *b* приведены изменения потенциала МЭП при действии одной и той же механической нагрузки при изменении величины и полярности электрической поляризации. На этой зависимости можно выделить три участка.

Точка на вертикальной оси соответствует потенциалу МЭП при $F_e = 0$. Участок 1 — МЭП для случая, когда электрическая и механическая поляризации совпадают по знаку. Здесь при одной и той же нагрузке отклик образца на нагружение больше, т.е. модуль возрастает. Участки 2 и 3 — ЭП и МЭП от действия электрического и механического полей имеют противоположные знаки. В этом случае электромеханический модуль уменьшается, и при некотором значении образец как бы „не чувствует“ механическую нагрузку. Интересно, что при возрастании отрицательного потенциала поляризующего электрического поля ($> F^*$) при приложении нагрузки появляется потенциал, но отрицательной полярности. Таким образом, происходит довольно сложное взаимодействие полей электрической и механической поляризации.

Еще один параметр представляет интерес, особенно для практических целей. В этом случае обратимся к рис. 1. При совпадении полярностей ЭП и МЭП от электрического и механического полей суммарный потенциал ψ возрастает при приложении нагрузки (верхняя часть рис. 2, *b*), а при противоположных полярностях (нижняя часть рис. 2, *b*) суммарный потенциал ψ уменьшается при приложении

нагрузки. Рассмотрим их сумму

$$\psi = F_e + F_m.$$

Обобщенный параметр ψ , полученный суммированием потенциалов при одновременном действии нагрузки и электрического поля при двух равных по величине напряжениях на электродах противоположных полярностей оказывается равным сумме измерений потенциалов при приложении нагрузки. Эта зависимость линейна, поскольку является суммой двух линейных зависимостей (2 и 3 на рис. 2, а). Кроме того, она слабо зависит от величины электрического поляризующего поля. При его увеличении наклон зависимости 2 увеличивается, а для зависимости 3 — уменьшается. Это делает данную зависимость, в принципе, полезной для измерения неизвестных механических напряжений, например, в массивах горных пород. Сложность оценки механических напряжений этим способом связана с наличием релаксации МЭП [7]. Поэтому данный метод, скорее, может быть пригоден для измерения изменений механических напряжений, что не менее важно для прогнозирования динамических проявлений макроскопического разрушения, в частности в очаге землетрясения при его активном развитии.

Итак, результаты убедительно свидетельствуют о взаимодействии МЭП и ЭП при механической и электрической поляризации. Это взаимодействие не ограничено простым аддитивным сложением потенциалов полей, а имеет более сложную природу. Для понимания этого явления недостаточно только феноменологических исследований, проведенных в данной работе. Необходимо теоретическое развитие микроскопической модели, возможно на более простых по строению материалах. Но уже из настоящего исследования вытекают следствия, полезные в практическом использовании, в частности, направленного изменения электромеханического модуля твердых диэлектриков, оценки механических напряжений и их изменения в нагруженном теле. Эти оценки могут быть полезны при интерпретации электромагнитных предвестников крупномасштабного разрушения, в том числе горных ударов и землетрясений.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 01–05–64893, 02–05–08003–ИННО, 02–05–39017–ГФЕН, а также грантом МНТЦ–№ 1745.

Список литературы

- [1] *Lockner D.A., Biyearly J.D., Kuksenko V.S., Ponomarev A.V.* // PAGEOORH. 1986. V. 123. P. 601.
- [2] *Куксенко В.С., Килькеев Р.Ш., Мирошниченко М.И.* // ДАН СССР. 1981. Т. 260. № 4. С. 841.
- [3] *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 311 с.
- [4] *Тарасов Н.Т.* // Докл. РАН. 1997. Т. 353. В. 4. С. 542–545.
- [5] *Фатеев Е.Г.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 1. С. 92–105.
- [6] *Fateev E.G.* // Papers of 10th International Conference of the Physics and Chemistry of Ice. St. John s, Newfoundland, Canada. 2002. P. 14–15.
- [7] *Куксенко В.С., Махмудов Х.В., Пономарев А.В.* // ФТТ. 1997. Т. 39. В. 7. С. 1202–1204.