

Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков

© Х.Ф. Махмудов, В.С. Куксенко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: victor.kuksenko@mail.ioffe.ru

Исследовались механоэлектрические эффекты при упругом нагружении стекол и мрамора в нейтральной среде и при слабой электрической поляризации образцов. Показано, что при изгибе образца возникают электрические потенциалы разного знака в местах сжатия и растяжения. При приложении к образцу слабых электрических полей механоэлектрические эффекты усиливаются или ослабевают в зависимости от направления электрических полей. Сделан вывод о единой природе электрической поляризации и поляризации, индуцированной механическим полем. Обсуждается вопрос электромагнитных предвестников землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 02-05-39017, 04-05-65287) и МНТЦ № 1745.

Электромеханические явления в природных диэлектриках (помимо того, что они вызывают чисто научный интерес) имеют большую практическую значимость в связи с трактовкой электромагнитных предвестников землетрясений [1–3]. Кроме того, они позволяют понять физические процессы мощных откликов на слабые воздействия, в том числе и электромагнитных на сейсмичность [4], и 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 электрической поле. В данной работе приводятся результаты, полученные для образцов из кварцевого стекла и мрамора. Мрамор широко используется в лабораторных исследованиях, поскольку он обладает основными свойствами твердых диэлектриков. В то же время он не проявляет пьезоэлектрического эффекта, что важно для наших исследований.

1. Методика измерений

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Образец из мрамора *1* в виде призмы размером $40 \times 40 \times 100$ мм нагружался одноосно-сжимающей нагрузкой в гидравлическом прессе через ситалловые изоляторы. На две противоположные боковые поверхности образца крепились электроды *2* из эпоксидной смолы с серебряным порошком. Потенциалы на электродах создавались источником постоянного напряжения. При необходимости электроды могли заземляться. Регистрация потенциалов электрического поля в образце

производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра (ЕМ). Зонд *3* электрометра крепился на стойке с микрометрической подачей для сканирования вдоль поверхности исследуемого образца при зазоре 2 мм между поверхностью образца и зондом.

При одноосном сжатии образца из мрамора в нем возникает индуцированное электрическое поле (ИЭП), причем боковые поверхности образца имеют положительный потенциал. В отсутствие механической нагрузки при приложении к электродам разности потенциалов возникает поляризация образца. При этом ИЭП симметрично относительно центра образца, и можно указать участки поверхности образца с положительными и отрицательными потенциалами. Для простоты изложения будем называть появление электрического поля при механическом нагружении образца механической поляризацией, а при приложении к электродам разности электрических потенциалов — электрической поляризацией.

На рис. 2 приведена последовательность измерений ИЭП при фиксированном положении регистрирующего зонда. В момент времени t_1 образец был нагружен одноосно-сжимающей нагрузкой P , составляющей 0.3 от разрушающей, и сразу же разгружен. При этом был зарегистрирован положительный потенциал F_e ИЭП. Затем, в момент времени t_2 , на электроды подавалась разность

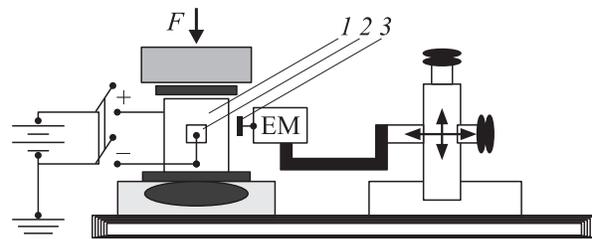


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *1* — образец, *2* — электроды, *3* — зонд электрометра.

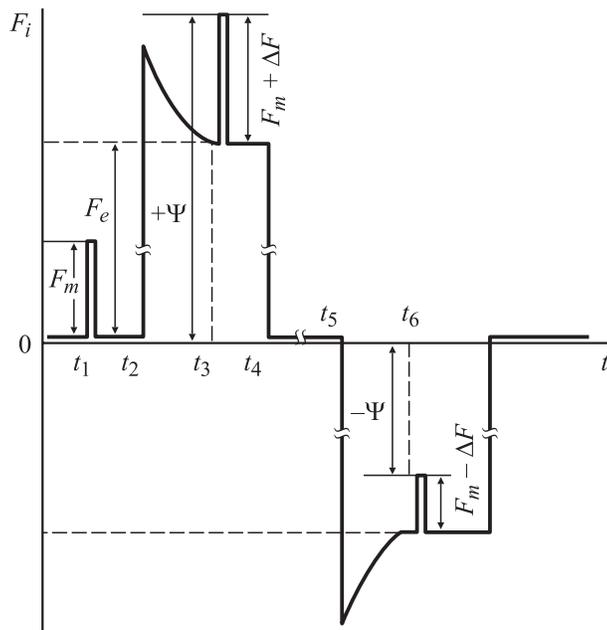


Рис. 2. Последовательность изменения ЭП и МЭП при воздействии на образец механического и электрического полей.

потенциалов той же полярности, что и при механическом нагружении, т. е. положительной. После выхода ЭП на стационарный участок t_2-t_3 на образец подавалась та же нагрузка, а затем он снова разгружался. При этом потенциал ИЭП возрастал на величину ΔF . Обозначим суммарный потенциал в этом случае через $+\Psi$. При разгрузке образца потенциал ИЭП возвращался к F_m . После этого в момент времени t_4 напряжение на электродах отключалось и они на некоторое время заземлялись. В момент t_5 на электроды снова подавалось напряжение той же величины, но противоположной полярности F_m . Зонд регистрировал появление потенциала отрицательной полярности, который спустя некоторое время выходил на стационарный уровень F_m . 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_m . Затем электроды заземлялись для электрической нейтрализации образца.

Эта процедура измерений повторялась в одном случае при ступенчатом изменении механической нагрузки и постоянной разности потенциалов на электродах, в другом — при изменении разности потенциалов, но при одинаковой механической нагрузке. ИЭП F_m увеличивался или уменьшался в зависимости от направления электрической поляризации образца.

На рис. 3 представлены зависимости потенциала ИЭП F_m от величины механической нагрузки. Зависимость 1 получена при отсутствии электрической поляризации. Зависимость 2 отвечает случаю совпадения полярностей ИЭП и ЭП, т. е. F_m и F_e имеют одинаковые знаки.

Зависимость 3, напротив, соответствует случаю противоположных полярностей ИЭП и ЭП. В этой области нагрузок все зависимости линейны, но их наклоны различны.

Формально можно ввести по аналогии с пьезомодулем электромеханический модуль материала

$$E = F_m \pm \Delta F.$$

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 E может характеризовать влияние механической нагрузки на ИЭП при одновременной электрической поляризации. Можно утверждать, что, когда полярности ИЭП от электрической и механической поляризаций совпадают, электрический модуль возрастает, а при несовпадении полярностей он уменьшается.

На рис. 4 приведены изменения потенциала ИЭП при действии одной и той же механической нагрузки и изменении величины потенциала электрической поляризации. На этой зависимости можно выделить три участка. Точка на вертикальной оси соответствует потенциалу ИЭП при отсутствии электрической поляризации, т. е. $F_e = 0$.

Участок 1 соответствует случаю, когда электрическая и механическая поляризации совпадают по знаку. Здесь при одной и той же нагрузке отклик образца на нагружение ИЭП больше, т. е. модуль возрастает.

Участки 2 и 3 отвечают случаю, когда ЭП и ИЭП имеют противоположные знаки.

В этом случае электромеханический модуль уменьшается, и при некотором значении образец „не чувствует“ механическую нагрузку F^* . Интересно отметить, что при возрастании отрицательного потенциала поляризующего электрического поля при приложении нагрузки

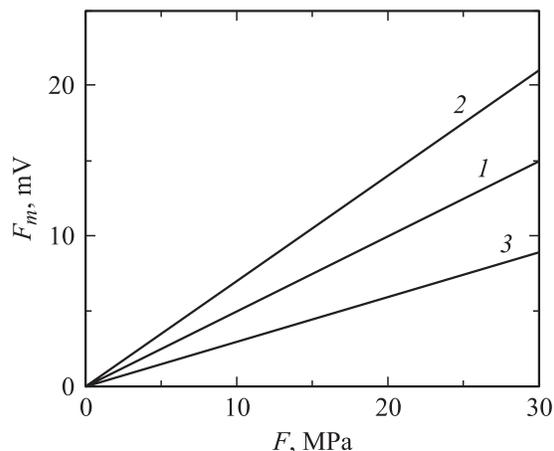


Рис. 3. Зависимость МЭП от механического сжимающего напряжения F . 1 — при отсутствии электрической поляризации; 2 — для случая совпадения полярностей ЭП, т. е. F_m и F_e имеют одинаковые знаки; 3 — для случая противоположных полярностей ИЭП и ЭП.

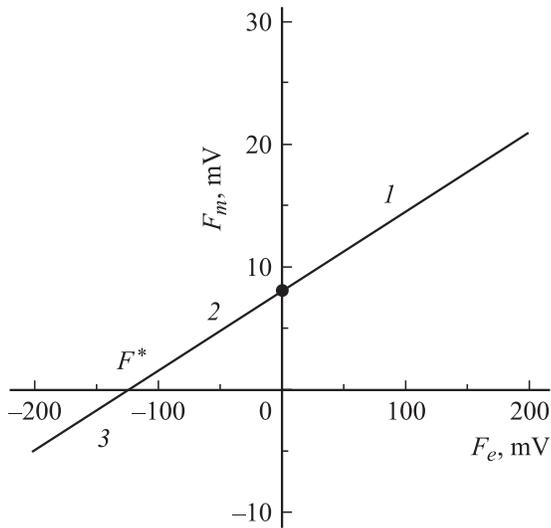


Рис. 4. Зависимость величины полярности электрического потенциала F_e .

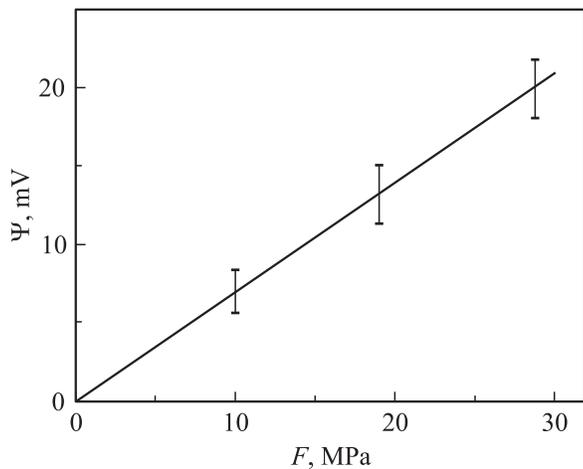


Рис. 5. Зависимости суммарного потенциала ИЭП от механической нагрузки при противоположных полярностях электрического поля.

появляется потенциал, но он имеет отрицательную полярность. Таким образом происходит довольно сложное взаимодействие полей электрической и механической поляризации.

Представляет интерес еще один параметр (особенно для практических целей). Обратимся к рис. 2.

При совпадении полярностей ИЭП от электрического и механического полей суммарный потенциал Ψ возрастает при приложении нагрузки (участок 1 на рис. 4), а при противоположных полярностях (участки 2 и 3 на рис. 4) суммарный потенциал Ψ уменьшается при приложении нагрузки. Рассмотрим обобщенный параметр Ψ

$$\Psi = (+\Psi) + (-\Psi),$$

полученный суммированием двух равных по величине электрических потенциалов на электродах противополо-

жных полярностей при одновременном действии нагрузки и электрического поля, который оказывается равным сумме измеренных потенциалов при приложении нагрузки (рис. 5).

Эта зависимость линейна, поскольку является суммой двух линейных зависимостей 2 и 3 (рис. 3). Кроме того, она слабо зависит от величины электрического поляризирующего поля. При его увеличении (рис. 3) наклон 2 увеличивается, а наклон 3 уменьшается. Это делает данную зависимость в принципе полезной для измерений неизвестных механических напряжений (например, в массивах горных пород). Сложность оценки механических напряжений этим способом связана с наличием релаксации ИЭП [4]. Поэтому данный метод, скорее, может быть пригоден для измерения изменения механических напряжений, что не менее важно для прогнозирования динамических проявлений макроскопического разрушения (в частности, в очаге землетрясения при его активном развитии).

2. Обсуждение результатов

Итак, результаты убедительно свидетельствуют о взаимодействии ИЭП при механической и электрической поляризации. Это взаимодействие неограниченно простым аддитивным сложением потенциалов полей, а имеет более сложную природу. Для понимания этого явления недостаточно проведения только феноменологических исследований, описанных в данной работе. Необходимо теоретическое развитие микроскопической модели, возможно на более простых по строению материалах. Но наметить направление развития этой модели может эксперимент по сопоставлению ИЭП при сжатии и растяжении образцов. Такое сопоставление наиболее просто можно провести для случая изгиба образца.

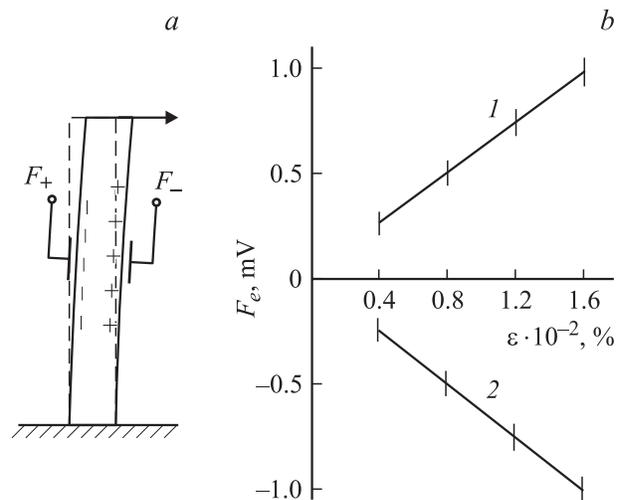


Рис. 6. Распределение поля (а) и зависимость индуцированного ЭП F_e от величины деформации (b) в случаях растяжения (1) и сжатия (2) при изгибе образцов.

На рис. 6, *a* приведена схема эксперимента. Один конец образца из кварцевого стекла в виде балки жестко закреплялся, а на второй прикладывался изгибающий момент. Регистрирующий зонд жестко фиксировался в некотором месте, а сжатие или растяжение в данном месте обеспечивалось направлением изгибающего момента.

Из рис. 6, *b* видно, что ИЭП имеет противоположные знаки для сжатия и растяжения. Более того, на его величину существенно влияет градиент механического поля.

В работе [8] сделана попытка объяснить появление ИЭП ориентацией диполей градиентом механического поля. Следует отметить, что появление ИЭП в механическом поле является достаточно универсальным. Несмотря на различие физических свойств стекла и мрамора, качественно эффекты для них аналогичны. Это позволяет объяснить электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков и, в частности, горных пород, с единых позиций.

В работе [2] появление электромагнитных импульсов при образовании трещин объяснялось разделением зарядов на берегах трещины. Не отрицая возможности такого механизма излучения электромагнитных импульсов, можно высказать предположение, что любое динамическое явление, в том числе и образование трещин, должно приводить к резкому изменению локальных механических полей, а следовательно, и к изменению ИЭП, сопровождающих излучение электромагнитных импульсов. Этот универсальный механизм позволяет объяснить электромагнитные явления (как статические, так и динамические) в очагах горных ударов и землетрясений.

В заключение отметим, что С.Н. Журков поддерживал это направление, придавая большое значение взаимодействию различных физических полей.

Список литературы

- [1] D.A. Lockner, J.D. Biyearly, V.S. Kuksenko, A.V. Ponomarev. *PAGEOPH* **123**, 601 (1986).
- [2] В.С. Куксенко, Р.Ш. Килькеев, М.И. Мирошниченко. *ДАН СССР* **25**, 4, 481 (1981).
- [3] Г.А. Соболев. *Основы прогноза землетрясений*. Наука, М. (1993). 311 с.
- [4] Н.Т. Тарасов. *Докл. РАН* **353**, 4, 542 (1997).
- [5] Е.Г. Фатеев. *ЖТФ* **71**, 92 (2001).
- [6] E.G. Fateev. *Papers of 10th Int. Conf. on the Physics and Chemistry of Leci. St Johns, Newfoundland, Canada* (2002). P. 14.
- [7] В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов, А.В. Пономарев. *ФТТ* **39**, 7, 1202 (1997).
- [8] Х.Ф. Махмудов. *Автореф. канд. дис. СПб* (1997). С. 11.