

Влияние электрического поля на разрушение сегнетокерамики

© Л.В. Жога, А.В. Шильников, В.В. Шпейзман*

Волгоградский архитектурно-строительный институт,
Волгоград, Россия

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

E-mail: postmaster@vgasa.ru, shpeizm.v@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 6 июля 2004 г.)

Представлены экспериментальные результаты измерения времени до разрушения образцов сегнетокерамики в процессе воздействия постоянного электрического поля и различных по величине механических напряжений. Получена зависимость долговечности от напряжений для напряженностей электрического поля от 0 до 5 MV/m. Показано, что в исследованном интервале времен ($1-10^3$ s) слабые поля заметно увеличивают долговечность (упрочняют керамику), а сильные существенно снижают долговечность. Результаты можно объяснить воздействием нагрузки и электрического поля на одни и те же дефекты в керамике, которые являются очагами разрушения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-02-16232), Конкурсного центра Министерства образования РФ (грант № E02-3.4-424) и программы Министерства образования „Керамика и сегнетокерамика“ (грант № 202-03-02-04).

При решении проблемы прочности сегнетокерамики важным является вопрос о том, как влияет внешнее электрическое поле на развитие механического разрушения. Экспериментальные работы, посвященные кинетике разрушения сегнетокерамики в присутствии электрического поля, практически отсутствуют. Разрушение в электрическом поле подобных материалов исследовалось в [1–4]. Эффект возникновения механических напряжений в результате обратного пьезоэффекта в пьезокерамике BaTiO_3 рассмотрен в теоретических работах [5,6], но в них разрушение считается критическим, т.е. происходящим только при достижении напряженностью электрического поля определенного значения. В настоящей работе поставлена задача изучить закономерности разрушения сегнетокерамики при различных комбинациях электрического и механического полей и сравнить полученные кинетические параметры разрушения.

1. Методика эксперимента и образцы

Исследовалась сегнетокерамика типа PZT (ЦТС-19) на основе титаната и цирконата свинца $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$. Образцы в виде дисков диаметром $2c = 20$ mm и толщиной $h = 0.7$ mm имели электроды. Средний размер зерна в образцах равнялся $4\ \mu\text{m}$, пористость варьировалась от 17 до 20%. Измерения электрического напряжения проводились в этилсиликоксановой жидкости. На электроды подавалось постоянное по знаку электрическое напряжение, которое не изменялось вплоть до разрушения образца. Механическое нагружение осуществлялось путем осесимметричного изгиба, диаметры опорного и нагружающего колец составляли $2b = 13$ mm и $2a = 7$ mm соответственно. Нагрузка прикладывалась ступенями по $\Delta P = 1.5$ N, что составляло $\Delta\sigma = 1.7$ МПа,

выдержка при постоянной нагрузке $\Delta t = 900$ s. Максимальные растягивающие напряжения рассчитывались по формуле для изгиба круглых пластин с недеформируемой нейтральной плоскостью [7]

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{b}{a} + \frac{(1+\nu)(b^2 - a^2)}{2(1-\nu)c^2} \right) Q. \quad (1)$$

Здесь Q — нагрузка, ν — коэффициент Пуассона пьезокерамики. За долговечность τ принималось время от последней подгрузки до разрушения образца.

Напряженность электрического поля E в опытах составляла 0, 1, 2, 3, 4 и 5 MV/m.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Эксперимент показал, что для данных образцов разрушение сегнетокерамики в механическом поле носит кинетический характер. Разрушение наступало при разных значениях приложенного постоянного механического напряжения и различных временах. При этом разброс времен был велик: за выбранное время эксперимента Δt наблюдалось разрушение при нагружении и отсутствие разрушения. На рис. 1, a, b в качестве примера приведены результаты измерения долговечности сегнетокерамики при различных напряжениях в присутствии электрического поля напряженностью 1 и 4 MV/m.

В [8] было показано, что время до разрушения (долговечность) при ступенчатом нагружении можно описать формулой

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - V_{\text{ef}}\sigma}{kT}. \quad (2)$$

Здесь V_{ef} — эффективный активационный объем, U_0 — энергия активации процесса разрушения, T — темпе-

Статистическая обработка данных по кинетике разрушения сегнетокерамики в присутствии электрического поля

	σ , МПа												
	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	35		
E , MV/m	4	4	4	4	1	4	1	4	1	1	1	1	1
$n \downarrow$	0	1	7	20	0	33	0	41	3	8	15	27	32
n_i	0	5	12	12	0	7	2	0	5	7	12	5	4
$n \uparrow$	41	35	22	9	37	0	35	0	29	22	10	5	1
n_i/n	0	0.12	0.29	0.29	0	0.17	0.05	0	0.14	0.19	0.32	0.14	0.11
$n \downarrow/n$	0	0.02	0.20	0.51	0	0.83	0	1	0.08	0.22	0.41	0.73	0.86

Примечание. $n \downarrow$ — число образцов, разрушившихся при подгрузке при напряжении σ ; n_i — число образцов, разрушившихся в интервале времен от τ_{\min} до τ_{\max} ; $n \uparrow$ — число образцов, не разрушившихся при нагружении и выдержке при σ .

ратура опыта, k — постоянная Больцмана, $\tau_0 = \text{const}$. При постоянной температуре формула (2) имеет вид $\tau = Ae^{-B\sigma}$, где A определяет энергию активации, а B — эффективный активационный объем процесса разрушения. В [8] был также разработан прием вычисления A и B по среднему значению прочности $\bar{\sigma}$ и вероятности разрушения W при постоянном σ в заданном интервале времен от τ_{\min} до τ_{\max} :

$$\lg \frac{A}{\tau_{\min}} = \frac{\bar{\sigma} \lg \tau_{\max}/\tau_{\min}}{\int_{-\infty}^{\infty} W d\sigma}, \quad B = \frac{\lg A/\tau_{\min}}{\bar{\sigma}}. \quad (3)$$

В опытах за вероятность W принималось отношение числа образцов (n_i), разрушившихся при данном σ_i в интервале времен от τ_{\min} до τ_{\max} , ко всем испытанным (n). Среднее значение прочности определялось по интегральной кривой распределения прочности, в которой учитывались данные для образцов, разрушившихся на всех предыдущих ступенях и в момент последней подгрузки, т.е. до начала выдержки при данном напряжении (их число обозначено $n \downarrow$).

В таблице приведены результаты обработки данных, представленных на рис. 1, *a, b*. Функции $W(\sigma)$ и распределения прочности, по которым определялась $\bar{\sigma}$ для напряженностей электрического поля 1 и 4 MV/m, показаны на рис. 2, *a, b*. По этим данным, а также по аналогичным данным для других величин напряженности поля в соответствии с (3) были рассчитаны значения коэффициентов A и B (рис. 3). Как следует из рис. 3, зависимости $\lg A$ и $\bar{\sigma}$ от напряженности электрического поля повторяют друг друга, а коэффициент B в первом приближении можно считать постоянным. Уменьшение $\bar{\sigma}$ с ростом E по закону, близкому к линейному с коэффициентом 6.4 N/V·m, наблюдается только при $E \geq 3$ MV/m. При меньших E прочность сначала несколько возрастает, а затем возвращается к значениям, близким к прочности без электрического поля. Аналогичный вывод был сделан ранее в [8], однако если в [8] он относился только к прочности, соответствующей $\tau = 1$ s, то теперь его можно распространить на времена (или скорости нагружения) до 10^3 s.

Среднее значение $B = 1.3 \text{ МПа}^{-1}$ позволяет определить эффективный активационный объем $V_{ef} = 12 \cdot 10^{-27} \text{ м}^{-3}$, что близко к результатам [9].

Сравнение данных, полученных в настоящей работе и в [8,9], позволяет сделать вывод об одинаковом проявлении временных эффектов при разрушении в электрическом и механическом полях. Это подтверждает

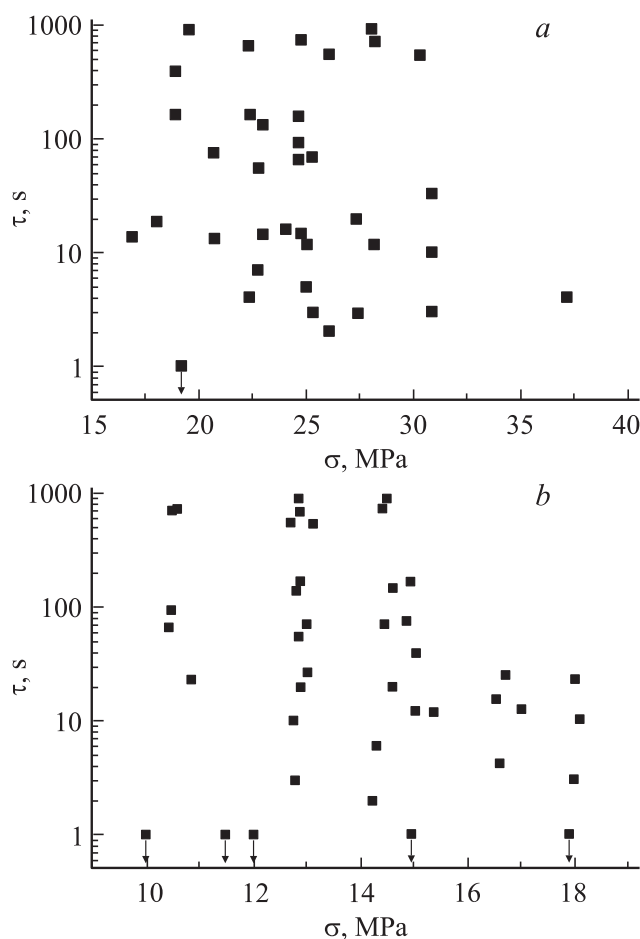


Рис. 1. Время до разрушения τ при одновременном воздействии постоянного электрического поля напряженностью 1 (*a*) и 4 MV/m (*b*) и ступенчато возрастающей механической нагрузкой.

ет ранее высказанное в [8] предположение о влиянии на эти процессы одних и тех же дефектов структуры.

Итак, результаты опытов указывают на кинетический характер механического разрушения в присутствии электрического поля. При этом вероятность разрушения в заданном интервале времен (величина, пропорциональная V_{ef} , как это следует из (3)) не зависит от напряженности электрического поля. Небольшое упрочнение в слабых полях, наблюдаемое в интервале времен $1-10^3$ с, очевидно, связано с релаксационными процессами в структуре сегнетокерамики. Если предположить, что в (2) предэкспоненциальный множитель $\tau_0 = 10^{-13}$ с в исследованных интервалах E и σ , то можно оценить энергию активации разрушения. При $E \leq 3$ MV/m энергия примерно постоянна и равна 2.3 eV, а при $E \geq 3$ MV/m она убывает с ростом напряженности электрического поля. Большой разброс значений прочности и долговечности отдельных образцов сегнетокерамики вызван неоднородностью структуры и большим числом дефектов различной природы. В [8] подробно исследовано распределение прочности аналогичной керамики. В частности, было показано, что вейбулловское

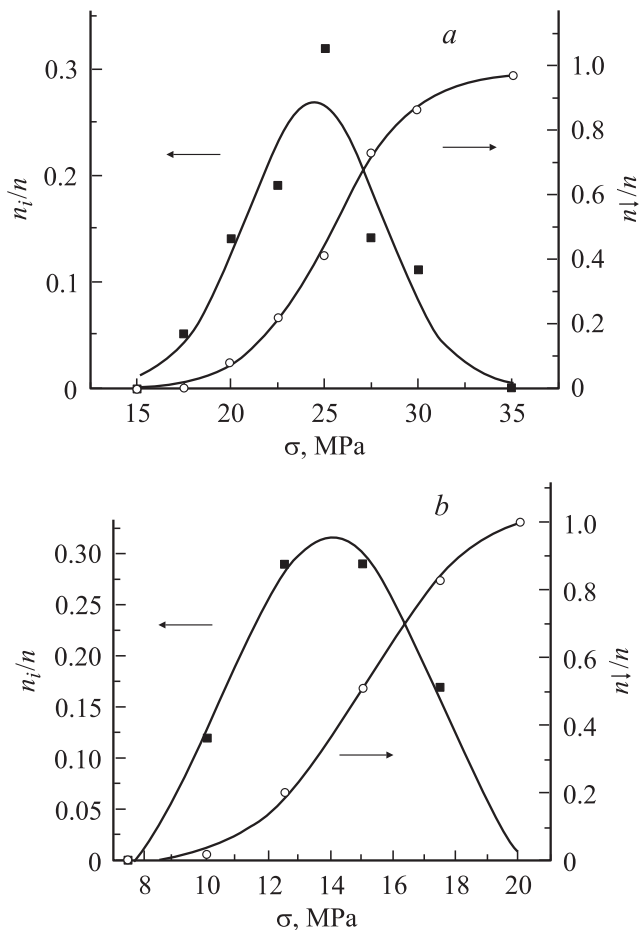


Рис. 2. Зависимость вероятности разрушения W в интервале времен $1-10^3$ с от напряжения и интегральная кривая распределения прочности. E , MV/m: a — 1, b — 4.

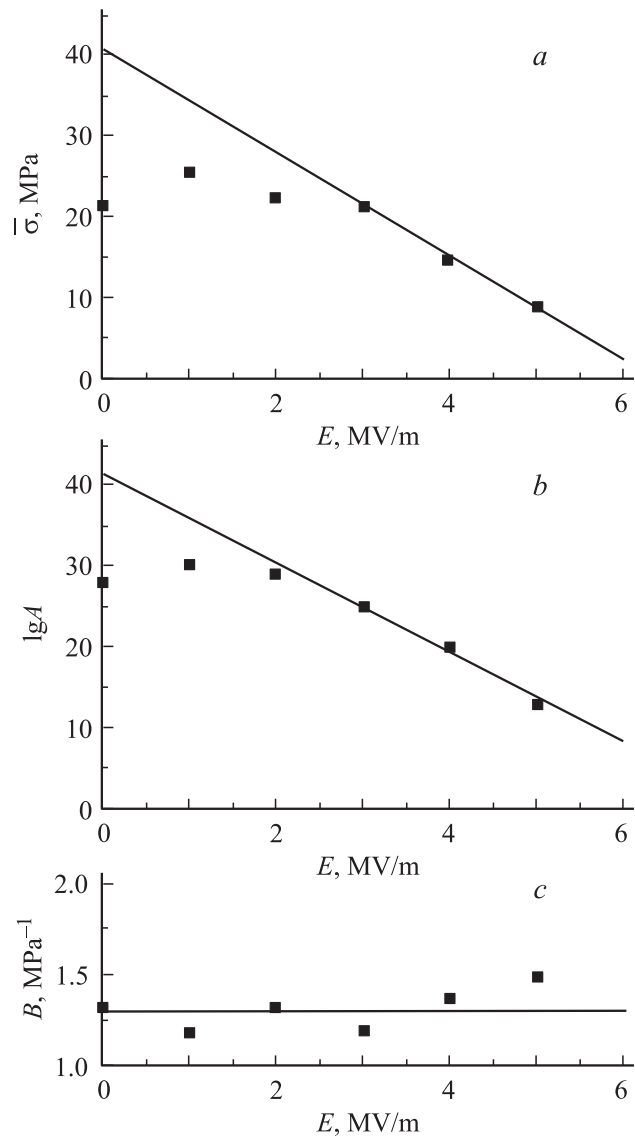


Рис. 3. Зависимости средней прочности $\bar{\sigma}$ (a), параметров A (b) и B (c) от напряженности электрического поля.

распределение прочности имеет излом, что указывает на присутствие дефектов двух типов. Приведенные в настоящей работе данные по кинетике разрушения в присутствии постоянного электрического поля показывают, что очагами разрушения (по крайней мере, при временах до 10^3 с) являются изначальные дефекты, а средние значения долговечности и прочности связаны между собой выражением (2).

Список литературы

- [1] А.Д. Феронов, В.А. Сервули. Физика диэлектриков и полупроводников. ВПИ, Волгоград, (1981). 111 с.
- [2] С.Н. Койков, А.И. Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков. Энергия, Л. (1968). 186 с.

- [3] М.А. Багиров, Я.Т. Разимов, Т.Ф. Аббасов, С.А. Аббасов. ФТТ **15**, 5, 1579 (1973).
- [4] М.С. Дахия, В.А. Закревский, А.И. Слуцкер. ФТТ **26**, 9, 2716 (1984).
- [5] Е.И. Бондаренко, В.Ю. Тополов, А.В. Турик. ЖТФ **57**, 7, 1416 (1987).
- [6] Е.И. Бондаренко, В.Ю. Тополов, А.В. Турик. ЖТФ **62**, 12, 145 (1992).
- [7] Ф.Ф. Витман, Я.С. Уфлянд, Б.С. Иоффе. Прикл. механика **5**, 6, 122 (1970).
- [8] Л.В. Жога, В.В. Шпейзман. ФТТ **34**, 8, 2578 (1992).
- [9] Л.В. Жога, А.В. Шильников, В.В. Шпейзман. Изв. РАН. Сер. физ. **67**, 8, 1207 (2003).