

Кинетика разрушения поликристаллической сегнетокерамики в механическом и электрическом полях

© В.В. Шпейзман, Л.В. Жога*

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

* Волгоградский архитектурно-строительный университет,
Волгоград, Россия

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

Исследована кинетика механического разрушения и электрического пробоя поликристаллической сегнетокерамики при одновременном действии электрического поля и механической нагрузки. Продемонстрировано преимущество кинетического подхода над представлениями о разрушении и пробое как о критических явлениях. Показана связь механического разрушения и пробоя. Установлено, что слабое воздействие поля одной природы вызывает замедление разрушения в другом поле, а сильные поля, действующие совместно, ускоряют и механическое разрушение, и пробой. Разработаны приемы определения активационных характеристик обоих процессов только по кинетике разрушения в одном из них.

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

Сегнетоэлектрические (СЭ) материалы в процессе их эксплуатации подвергаются воздействию электрических и механических нагрузок. Характеристикой разрушения этих материалов в электрическом поле является напряжение пробоя, или пробивная напряженность электрического поля, т.е. напряженность однородного электрического поля E_{br} , при которой наступает электрический пробой вещества, а в механическом поле — прочность при растяжении или изгибе [1,2].

Как известно [2], возникающие внутри твердых диэлектриков при приложении внешнего электрического поля напряженностью E механические напряжения σ являются важным фактором, влияющим на развитие электрического пробоя и величину электрической прочности E_{br} материалов. Вследствие сильного электрострикционного или пьезоэлектрического эффекта (например, в сегнетоэлектриках и родственных материалах) электрические поля могут вызвать значительные напряжения, в некоторых случаях оказывающиеся достаточными для разрушения или микрорастрескивания образцов [3,4]. Развитию подобных эффектов способствуют также процессы переориентации СЭ-доменов — механических двойников — под влиянием поля E (например, при поляризации поликристаллической сегнетокерамики — ПС [5]). Кроме того, в условиях резонанса в образцах ПС — аустических преобразователях [6] — напряжения σ достигают значений предела прочности даже при относительно небольшой напряженности $E < E_{br}$, в то время как в постоянных или низкочастотных электрических полях процессы микрорастворения развиваются при больших E .

В литературе встречается качественное соображение о важности механических напряжений в развитии электрического пробоя СЭ-кристаллов и ПС. В частности, впервые точка зрения относительно механических нару-

шений структуры ПС $BaTiO_3$ при приложении внешнего импульсного поля E при температурах ниже температуры Кюри T_c была представлена в работе [7]. Установлено также экспериментально [8], что механическое разрушение несовершенного кристалла в СЭ-фазе предшествует электрическому пробое. В то же время показано, что в параэлектрической фазе имеет место тепловой пробой. Сильное влияние поляризации на E_{br} высокоплотной ПС на основе ЦТС ($PZT-Pb(Zr,Ti)O_3$) также объясняется [9] механическими напряжениями, возникающими в образце при переключении не 180° доменов. Приведенные выше факты указывают на важность электромеханических взаимодействий при развитии электрического пробоя сегнетоактивных материалов.

В проблеме разрушения сегнетокерамики в электрическом поле (электрический пробой) важным является вопрос о том, как влияет механическое напряжение, возникающее внутри сегнетокерамики при приложении внешнего электрического поля напряженностью E , на развитие пробоя во времени. Экспериментальных работ по задержанному разрушению сегнетокерамики в электрическом поле (по кинетике пробоя) сравнительно мало. Кинетические характеристики подобных материалов исследовались в [9–12]. Эффект появления механических напряжений, возникших в результате обратного пьезоэффекта в пьезокерамике $BaTiO_3$, рассмотрен в теоретических работах [13,14], но в них разрушение считается критическим, т.е. происходит только при достижении напряженностью электрического поля определенного значения.

В [15] была показана связь процессов разрушения ПС в электрических и механических полях: продемонстрировано подобие распределений напряжений пробоя и механической прочности, обнаружены области упрочнения и разупрочнения при воздействии электрическим полем

на механическую прочность и при действии нагрузки на напряжение пробоя, выявлено сходство кинетики разрушения в электрических и механических полях.

В настоящей работе впервые исследовались вопросы кинетики разрушения при одновременном действии электрического и механического полей, а также сделана попытка с единых позиций описать оба вида разрушения.

1. Анализ разрушения в электрическом и механическом полях по Гриффитсу

Интерес к разрушению диэлектриков в электрическом поле (пробоем) и связи отдельных видов пробоя с разрушением под действием механической нагрузки возник давно. Почти сто лет тому назад, когда Гриффитс [16] предложил свою концепцию разрушения, основанную на сравнении упругой энергии, освобождающейся при росте трещины, с энергией, расходуемой на увеличение ее поверхности, появилась идея заменить при электрическом разрушении упругую энергию на электрическую, т. е. на энергию зарядов, индуцированных на поверхности трещины [1,17,18].

Если рассматривать пластину единичной толщины с тонкой сквозной краевой трещиной длиной l , то выражение для энергии, связанной с наличием трещины, будет иметь вид

$$U_M = 2l\gamma - \frac{\pi l^2 \sigma^2}{2E_M} \quad (1)$$

для механического нагружения (γ — удельная поверхностная энергия, σ — напряжение, E_M — модуль упругости) и

$$U_E = 2l\gamma - \frac{\varepsilon l^2 E^2}{16} \quad (2)$$

для такой же пластины, находящейся в электрическом поле с напряженностью E (ε — диэлектрическая проницаемость).¹

Отсюда из условия $dU/dl = 0$ можно получить критическое напряжение σ_{cr} (напряженность E_{cr}), начиная с которого рост трещины становится энергетически выгодным,

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2\gamma E_M}{\pi l}}, \quad (3)$$

$$E_{cr} = 4 \sqrt{\frac{\gamma}{\varepsilon l}}. \quad (4)$$

Интересно, что, поделив (3) на (4), можно исключить γ и l (если, конечно, придавать им один и тот же смысл для обоих случаев разрушения), тем самым обойдя многие трудности, которые имели место при экспериментальной проверке формулы (3) и трактовке величины γ . В [1,2] приводятся расчетные и экспериментальные

¹ Заметим, что в зависимости от формы трещины и напряженного состояния вблизи нее выражения (2) и (3) могут содержать различные коэффициенты, что для целей настоящей работы не является существенным.

оценки отношения σ_{cr}/E_{cr} , которые демонстрируют их близость лишь по порядку величины и вызывают большие сомнения в справедливости упомянутого подхода к связи электрического и механического разрушений. Данные работы [15], в которой исследовались прочность и пробой при одновременном действии электрического поля и нагрузки, лишь частично подтверждают возможность использования „модернизированного“ энергетического критерия Гриффитса.

Действительно, в этом случае вместо (1) или (2) следует написать

$$2\gamma = \frac{\pi l \sigma^2}{E_M} + \frac{\varepsilon l E^2}{8}. \quad (5)$$

На плоскости в координатах $\sigma - E$ кривая, отвечающая разрушению, должна представлять собой часть эллипса ($\sigma, E \geq 0$) с полуосями σ_{cr} и E_{cr} . Ограничившись лишь описанием формы кривых, приведенных в [15], заметим, что некоторую схожесть с (5) можно увидеть в средней части кривой при σ и E , близких к половине их критического значения. В областях же, примыкающих к координатным осям, несовпадение касалось не только величины эффекта, но и его знака.

Несмотря на то что идея использовать энергетический критерий Гриффитса для описания пробоя диэлектриков зародилась давно, она не получила заметного развития. Одной из причин этого, возможно, был переход от понимания разрушения как критического события к пониманию его как кинетического явления, которое невозможно описать критическими характеристиками.

2. Кинетический подход к разрушению в электрическом и механическом полях

В [19] было показано, что время до разрушения (долговечность τ) хрупких тел под действием постоянной нагрузки, несмотря на часто наблюдаемый большой разброс прочности и долговечности, можно описать формулой С.Н. Журкова

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - V_{ef} \sigma}{kT}, \quad (6)$$

причем $V_{ef} = nV$ — эффективный активационный объем; n — коэффициент перенапряжений, зависящий только от структуры материала для стационарных состояний, которые имеют место для очень малых или очень больших времен нагружения, в промежуточной области n зависит также от скорости релаксационных процессов; σ — напряжение ($\sigma_l = n\sigma$ — локальные напряжения); V — истинный активационный объем разрушения; U_0 — эффективная энергия активации; T — температура опыта; k — постоянная Больцмана; $\tau_0 = \text{const}$. При постоянной температуре формула (6) преобразуется в простое выражение $\tau = Ae^{-B\sigma}$, в котором A определяет

эффективную энергию активации, а B — эффективный активационный объем процесса разрушения. В [19] 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}

$$\lg \frac{A}{\tau_{\min}} = \frac{\bar{\sigma} \lg \tau_{\max}/\tau_{\min}}{\int_{-\infty}^{\infty} W d\sigma}, \quad B = \frac{\lg A/\tau_{\min}}{\bar{\sigma}}. \quad (7)$$

Как показано в [20], при ступенчатом нагружении с высотой ступеньки $\Delta\sigma$, удовлетворяющей определенным условиям, можно рассчитать коэффициенты A и B .

В [15] описанный выше анализ кинетики разрушения применялся для изучения пробы при ступенчатом повышении напряженности электрического поля. При этом предполагалось, что локальные напряжения при приложении электрического поля к сегнетокерамике создаются в тех же дефектных участках, что и при механическом нагружении. Дефектные участки имеют электромеханические характеристики, отличающиеся от характеристик окружающего материала, поэтому в них могут возникнуть локальные напряжения растяжения [4,5]. В частности, если разрушающие напряжения в сегнетокерамике имеют электрострикционную природу, то справедливо выражение

$$\sigma_l = \delta_e E^2; \quad (8)$$

если пьезоэлектрическую природу, то

$$\sigma_l = \delta_p E. \quad (9)$$

Здесь коэффициент δ_e зависит от упругих и электрострикционных констант материала, а коэффициент δ_p — от упругих констант, пьезомодуля и взаимной ориентации вектора поляризации \mathbf{P} дефектного объема материала и вектора напряженности внешнего электрического поля \mathbf{E} . Следовательно, зависимость электрической долговечности τ от E можно записать в виде $\lg \tau = \lg A_e - B_e E^2$, если локальные разрушающие механические напряжения имеют электрострикционную природу, и $\lg \tau = \lg A_p - B_p E$, если локальные напряжения имеют пьезоэлектрическую природу. Очевидно, что все рассуждения относительно экспериментального определения коэффициентов A и B в уравнении для долговечности при механическом разрушении, приведенные выше, можно распространить на аналогичные уравнения при пробое, т.е. воспользоваться формулами (7), заменив σ на E .

Рассмотрим теперь общий случай разрушения материала при одновременном действии электрического и механического полей. Распространим обозначение энергии активации разрушения и предэкспоненциального множителя (U_0 и τ_0) на любой вид разрушения (электрическое с постоянным σ или механическое с постоянной E). Как видно из дальнейшего изложения,

на оценках коэффициентов A и B в (7), сделанных на основе эксперимента, не сказывается, постоянны эти коэффициенты или зависят от вида нагружения. Для определенности выберем случай, когда справедливо выражение (9). Тогда можно записать

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - V_{\text{ef}}^\sigma \sigma - V_{\text{ef}}^E b E}{kT}, \quad (10)$$

где, согласно [14], $\sigma_l = b q E$, причем q есть коэффициент „перенапряженности“, т.е. локальная напряженность поля $E_l = q E$. Следовательно, будем считать, что $V_{\text{ef}}^E = q V^E$, а коэффициент b , имеющий размерность C/m^2 , — поляризационный заряд на единицу площади. Как и в случае механического нагружения, для которого $V_{\text{ef}}^\sigma = n V^\sigma$, для электрического разрушения эффективный и истинный активационные объемы связаны соотношением $V_{\text{ef}}^E = q V^E$. Тогда из (10) для электрического разрушения при действии механических напряжений можно получить $\lg \tau = A_{\text{EM}} - B_{\text{EM}} E$, где

$$A_{\text{EM}} = \tau_0 \exp \frac{U_0 - V_{\text{ef}}^\sigma \sigma}{kT} = \tau_0 \exp \frac{U_{\text{ef}}^E}{kT},$$

$$B_{\text{EM}} = \frac{V_{\text{ef}}^E b}{kT}. \quad (11)$$

Здесь U_{ef}^E — зависящая от σ эффективная энергия активации электрического разрушения. Таким образом, в полулогарифмических координатах $\lg A_{\text{EM}}$ линейно зависит от σ , а по величине наклона этой прямой можно определить V_{ef}^σ , причем способом, не связанным с механическим разрушением. Аналогичным способом можно получить V_{ef}^E в опытах с механическим разрушением в электрическом поле и сравнить эту величину с рассчитанной по результатам опытов по кинетике пробоа

$$A_{\text{ME}} = \tau_0 \exp \frac{U_0 - V_{\text{ef}}^E b E}{kT} = \tau_0 \exp \frac{U_{\text{ef}}^\sigma}{kT},$$

$$B_{\text{ME}} = \frac{V_{\text{ef}}^\sigma}{kT}. \quad (12)$$

Для проверки рассмотренного подхода к разрушению были проведены опыты по ступенчатому механическому нагружению при комнатной температуре дисков ЦТС-19 при различных значениях электрического поля и по ступенчатому увеличению напряженности поля при постоянной механической нагрузке. Средний размер зерна в образцах равнялся $4 \mu\text{m}$, пористость варьировалась от 17 до 20%. Механическое нагружение осуществлялось путем осесимметричного изгиба. Максимальные растягивающие напряжения рассчитывались по формуле для изгиба круглых пластин с недеформируемой нейтральной плоскостью [21]

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{b}{a} + \frac{(1+\nu)(b^2 - a^2)}{2(1-\nu)c^2} \right) Q. \quad (13)$$

Таблица 1. Электрическое разрушение поляризованной сегнетокерамики, нагруженной механической нагрузкой $\sigma = 2$ МПа. $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{P}$

	$E, \text{MV/m}$											
	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
$n \downarrow$	—	4	9	13	19	24	29	34	39	40	43	45
n_i	1	4	3	5	5	3	3	1	0	1	—	—
$n \uparrow$	44	37	33	27	21	18	13	10	5	5	2	—
n_i/n	0.022	0.088	0.066	0.11	0.11	0.066	0.066	0.022	0.022	0	0	0

Примечание. $n \downarrow$ — число образцов, разрушившихся во время возрастания E , n_i — число образцов, разрушившихся при $E = \text{const}$ на ступеньке данного уровня, $n \uparrow$ — не разрушившиеся до подъема на следующую ступеньку образцы.

Здесь $c = 10 \text{ mm}$ и $h = 0.7 \text{ mm}$ — радиус и толщина диска ПС соответственно, $b = 6.5 \text{ mm}$ — радиус опоры, $a = 3.5 \text{ mm}$ — радиус нагружающего кольцевого пуансона, Q — нагрузка, ν — коэффициент Пуассона пьезокерамики. Величина ступеньки подъема нагрузки равнялась $\Delta\sigma = 1.7 \text{ МПа}$, выдержка при постоянной нагрузке 900 s.

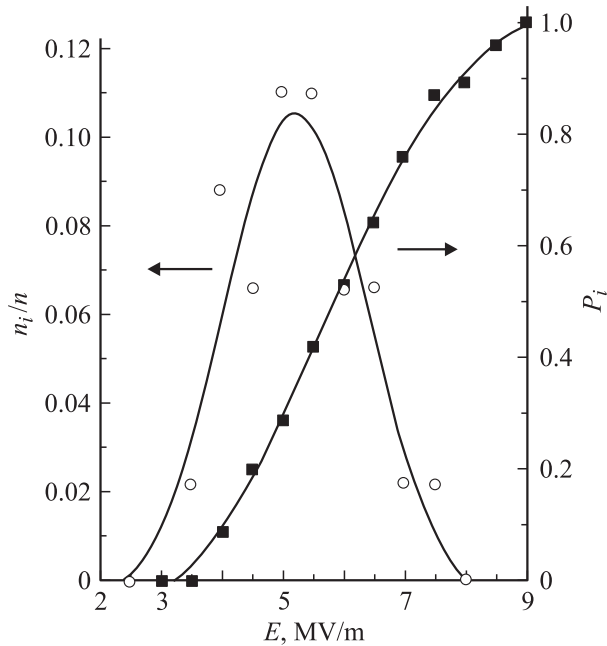


Рис. 1. Кривая вероятности разрушения при $E = \text{const}$ для случая ступенчатого возрастания E и интегральное распределение напряженностей пробоя. $\sigma = 2$ МПа.

Для создания в образце электрического поля на плоскости поверхности диска наносились серебряные электроды. Во избежание пробоя по поверхности один из электродов размещался в центральной части пластины и имел размеры, равные площади круга под нагружающим пуансоном. Образец помещался в этилсиликановую жидкость, и на его электроды ступенями подавалось напряжение U . Скорость возрастания напряжения составляла 1 kV/s , высота ступеньки $\Delta U = 500 \text{ V}$, длительность выдержки $\Delta t = 4 \text{ s}$. За величину электрической прочности принималась напряженность электрического

поля $E = U/h$. Для поляризованных образцов направление поля совпадало или было противоположно вектору поляризации.

Наиболее подробно была изучена кинетика пробоя при постоянном механическом напряжении и ступенчатом возрастании напряженности электрического поля. В табл. 1 и на рис. 1 в качестве примера приведены данные для $\sigma = 2$ МПа ($\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{P}$). В таблице показана статистика разрушения при подъеме напряжений на каждую ступеньку и разрушения при $E = \text{const}$, а на рис. 1 построены интегральное распределение напряженностей пробоя и кривая вероятности разрушения при $E = \text{const}$ на каждой ступеньке. На основании этих данных по (7) и аналогичным формулам с заменой σ на E были рассчитаны коэффициенты A и B в уравнениях (11) и (12) для определения электрической и механической прочности при одновременном действии E и σ .

По данным рис. 1 можно рассчитать $\int_{-\infty}^{\infty} W d\sigma = 0.33 \text{ MV/m}$, $\bar{E} = 5.83 \text{ MV/m}$ и $\lg A = 39$, $B = 6.57 \cdot 10^{-6} \text{ C/N}$. Коэффициенты A , B и \bar{E} при других значениях напряжения σ , а также для случая $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{P}$ приведены в табл. 2.

Аналогичная обработка результатов изучения кинетики механического разрушения в электрическом поле различной напряженности проделана в [22]. Итоговые

Таблица 2. Характеристики кинетики пробоя поляризованной ПС при действии механических напряжений σ разной величины. Направления векторов напряженности поля и поляризации совпадают ($\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{P}$) и противоположны ($\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{P}$)

	σ, MPa	A_{EM}, s	$B_{EM}, 10^{-6} \text{ C/N}$	$\bar{E}, \text{MV/m}$
$\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{P}$	0	10^{38}	6.95	5.65
	2	10^{39}	6.57	5.83
	6	10^{36}	6.78	5.35
	10	10^{33}	6.53	5.25
	14	10^{29}	6.59	4.46
	17	10^{27}	6.55	4.17
$\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{P}$	2	10^{39}	6.06	6.65
	6	10^{36}	5.47	6.82

характеристики анализа вероятности механического разрушения в электрическом поле, а также рассчитанные по ним коэффициенты (12) приведены в табл. 3.

На рис. 2, *a, b* показаны зависимость $\lg A_{EM}(\sigma)$, наклон которой определяет V_{ef}^σ , и зависимость средних значений электрической прочности от механических напряжений $\bar{E}(\sigma)$. Из (10) следует, что наклон последней равен отношению B_{ME}/B_{EM} . На рис. 2, *a, b* прямые проведены по точкам с большими σ , так как видно, что в настоящей работе, как и в [15,22], малые значения σ упрочняют ПС, а это в соответствии с (10) может быть только в случае переменных коэффициентов в (10). Для случая $E \uparrow \uparrow P$ по данным табл. 2 и рис. 2, *a* можно рассчитать $V_{ef}^\sigma = 9.5 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$ и $V_{ef}^E b = 6.3 \cdot 10^{-26} \text{ С} \cdot \text{м}$. По данным табл. 3, среднее значение $V_{ef}^\sigma = 12 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$, что близко к полученному в опытах по электрическому разрушению под нагрузкой. Отношение $V_{ef}^\sigma/V_{ef}^E b$, равное $0.15 \text{ В} \cdot \text{м/Н}$, совпадает с наклоном прямой на рис. 2, *b*. Можно также сравнить V_{ef}^σ с величиной $V_{ef}^\sigma = 11 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$, полученной в [23] при механических испытаниях этой же керамики. Сравнение дает удовлетворительное согласие, что позволяет предположить, что и при электрическом нагружении за счет электромеханической связи, существующей в СЭ-керамике, происходит механическое разрушение в дефектных участках, которое затем приводит к пробое образца [8]. После механического разрушения

Таблица 3. Характеристики кинетики разрушения поляризованной ПС под действием механической нагрузки в присутствии электрического поля разной величины. $E \uparrow \uparrow P$

$E, \text{ MV/m}$	$A_{ME}, \text{ s}$	$B_{ME}, \text{ MPa}^{-1}$	$\bar{\sigma}, \text{ MPa}$
0	10^{28}	1.31	21.3
1	10^{30}	1.17	25.6
2	10^{29}	1.31	22.2
3	10^{25}	1.19	21.0
4	10^{20}	1.36	14.7
5	10^{13}	1.47	8.8

отдельных дефектных объемов происходит переход к электрическому пробое образца из-за увеличения в микротрещинах напряженности поля и, как следствие, эмиссии электронов с одного берега на другой. Данный переход подтверждается экспериментами по электронной эмиссии в поликристаллической сегнетокерамике $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ [3].

Отметим также, что упрочняющее действие малых механических напряжений на пробой больше в том случае, если векторы E и P имеют противоположное направление.

Обработка данных по кинетике механического разрушения в электрическом поле разной величины приведена в табл. 3. Как видно, основные тенденции, такие как, например, упрочнение в слабых полях и разупрочнение в сильных полях, сохраняются. По наклону прямой $\lg A_{ME}(\sigma)$, приведенной в [22], можно определить $V_{ef}^E b = 5.2 \cdot 10^{-26} \text{ С} \cdot \text{м}$, что близко к величине, рассчитанной по пробое в присутствии механических напряжений, приведенной выше. Среднее значение коэффициента B_{ME} (табл. 3) позволяет независимо определить $V_{ef}^\sigma = 12 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$, что также соответствует оценкам, сделанным ранее. Наконец, тангенсы углов наклона прямых $E(\sigma)$ и $\sigma(E)$, приведенных на рис. 2, *b* и в [22], построенных по результатам различных экспериментов, согласно (10), в произведении должны давать единицу. В нашем случае первый из них равен $0.15 \text{ В} \cdot \text{м/Н}$, второй $6.4 \text{ Н/В} \cdot \text{м}$, а их произведение составляет 0.96. Все это подтверждает обоснованность предлагаемого подхода к описанию электрического и механического разрушения и предположения о том, что и то, и другое определяется одними и теми же дефектными участками в материале. Связь между обоими рассматриваемыми случаями разрушения видна из рис. 3, на котором показаны зависимости $E(\sigma)$ и $\sigma(E)$, которые в диапазоне $3 \leq E \leq 5 \text{ MV/m}$ и $6 \leq \sigma \leq 17 \text{ MPa}$ совпадают.

Следует заметить, что в настоящей работе при описании электрического разрушения поляризованной сегнетокерамики была использована зависимость вида $\tau = A_{EM} \exp(-B_{EM}E)$, справедливая для пьезоэлектрического эффекта. В [15] лучшее совпадение с экспериментом по механическому разрушению дает подстановка в показатель экспоненты электрострикционных напря-

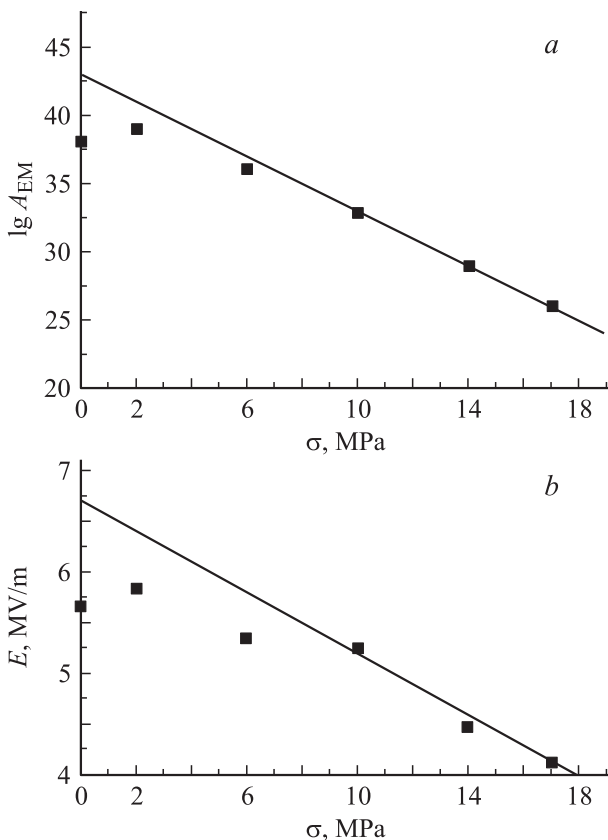


Рис. 2. Зависимости параметра A_{EM} при электрическом разрушении (*a*) и средней напряженности электрического поля при пробое (*b*) от механических напряжений.

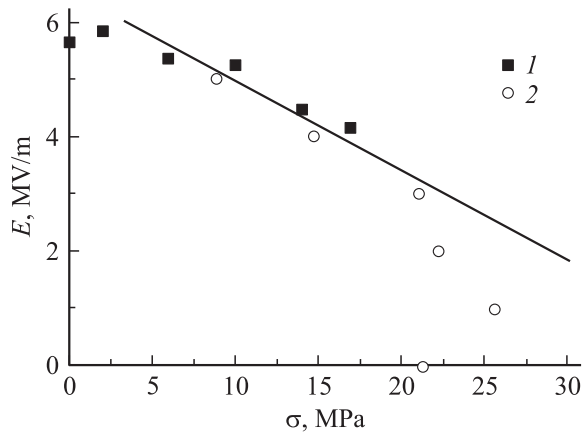


Рис. 3. Объединенная зависимость средней напряженности электрического поля при пробое от механических напряжений (1) и средних разрушающих механических напряжений от напряженности электрического поля (2).

жений: $\tau = A_{EM} \exp(-B_{EM} E^2)$. В этом случае значение предэкспоненты A_{EM} совпадает со значением, определенным из опытов по механическому разрушению. Отличие опытов [15] при испытании неполяризованной сегнетокерамики от приведенных в настоящей работе заключается в продолжительности выдержки на ступеньке при $E = \text{const}$: в [15] она более чем на два порядка выше. В СЭ-керамике под действием электрического поля в течение всего времени его воздействия имеют место деформации трех типов. Деформация кристаллита, вызванная переориентациями не 180° доменов, сопровождается пьезоэлектрическим эффектом ориентированных доменов, на что накладывается истинная электрострикция [24]. Вероятно, рассматриваемые эффекты имеют место, однако в зависимости от условий опыта (длительности, величины напряжений, температуры) один из них является преобладающим. Возможность описания с их помощью временных эффектов при электрическом разрушении, на наш взгляд, может свидетельствовать о ведущей роли механического разрушения сегнетокерамики при приложении электрического поля.

Если при оценке величины V_{ef}^E в качестве b воспользоваться значением пьезоэлектрического коэффициента $e_{33} = 14.9 \text{ C/m}^2$ [24] (при изгибе вдоль направления \mathbf{P} действует деформация сжатия), то поскольку $V_{ef}^E b = 6.3 \cdot 10^{-26} \text{ C} \cdot \text{m}$, можно получить $V_{ef}^E = 4 \cdot 10^{-27} \text{ m}^3$, что не сильно отличается от полученной в работе величины V_{ef}^σ . Это еще раз подтверждает предположение о возможности описания процессов электрического и механического разрушения с единых позиций.

Итак, физическую картину разрушения сегнетокерамик при одновременном действии электрического и механического полей можно представить следующим образом: после силовой и электрической нагрузок в дефектных участках сегнетокерамики начинают протекать процессы релаксации напряжений и разрушения матери-

ала. При малых величинах одного из полей в его влиянии на разрушение в поле другой природы преобладает релаксация, т. е. происходит уменьшение скорости разрушения и увеличение прочности; при больших величинах полей разрушение ускоряется и прочность снижается. Таким образом, процесс разрушения при одновременном действии электрического и механического полей может происходить быстрее или медленнее, чем при действии одного из полей, а кинетика разрушения описывается одним уравнением (10).

При приложении внешнего электрического поля за счет обратного пьезоэффекта и электрострикции возникает разность деформаций матрицы и кристаллита и появляются внутренние механические напряжения в кристаллите, которые способствуют либо релаксации за счет движения доменных границ, либо появлению микротрещин на границах 90° доменных стенок, приводящих к пробое [25]. Именно такие микротрещины на 90° доменных стенках наблюдались внутри отдельных кристаллитов при поляризации поликристаллического BaTiO_3 в полях, равных примерно половине напряженности пробоя [26,27].

Список литературы

- [1] Г.И. Сканава. Физика диэлектриков. Область сильных полей. Физматгиз, М. (1958). 907 с.
- [2] А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. Высш. шк., М. (1966). 224 с.
- [3] К. Окадаки. Технология керамических диэлектриков. Энергия, М. (1976). 336 с.
- [4] Е.И. Бондаренко, В.Ю. Тополов, А.В. Турик. Кристаллография **37**, 6, 1572 (1992).
- [5] Поляризация пьезокерамики / Под ред. Е.Г. Фесенко. Изд-во Ростов. ун-та, Ростов н/Д (1968). 135 с.
- [6] Вал. А. Дорошенко, М.М. Пикалев, В.А. Дорошенко. В кн.: Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Докл. III Всесоюз. сем. Наук. думка, Киев (1983). С. 181.
- [7] I. Ueda, M. Takeuchi, S. Ikegami, H.J. Sato. Phys. Soc. Jap. **17**, 10, 1679 (1962).
- [8] В.А. Дятлов, Е.В. Синяков. УФЖ **19**, 12, 2053 (1974).
- [9] А.Д. Феров, В.А. Сервули. В кн.: Физика диэлектриков и полупроводников. Волгоград (1981). С. 111.
- [10] С.Н. Койков, А.И. Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков. Энергия, Л. (1968). 186 с.
- [11] М.А. Багиров, Я.Т. Разимов, Т.Ф. Аббасов, С.А. Аббасов. ФТТ **15**, 5, 1579 (1973).
- [12] М.С. Дахия, В.А. Закревский, А.И. Слущкер. ФТТ **26**, 9, 2716 (1984).
- [13] Е.И. Бондаренко, В.Ю. Тополов, А.В. Турик. ЖТФ **57**, 7, 1416 (1987).
- [14] Е.И. Бондаренко, В.Ю. Тополов, А.В. Турик. ЖТФ **62**, 12, 145 (1992).
- [15] Л.В. Жога, В.В. Шпейзман. ФТТ **34**, 8, 2578 (1992).
- [16] A.A. Griffith. Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A **221**, 163 (1921).

- [17] Г.Е. Горовиц. ЖРФХО **59**, 369 (1927).
- [18] Г.Е. Горовиц. ЖРФХО **59**, 533 (1927).
- [19] В.А. Степанов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Наука, Л. (1984). 246 с.
- [20] В.В. Шпейзман. ФТТ **34**, 7, 2261 (1992).
- [21] Ф.Ф. Витман, Я.С. Уфлянд, Б.С. Иоффе. Прикл. механика **5**, 6, 122 (1970).
- [22] Л.В. Жога, А.В. Шильников, В.В. Шпейзман. ФТТ **47**, 4, 628 (2005).
- [23] Л.В. Жога, А.В. Шильников, В.В. Шпейзман. Изв. РАН. Сер. физ. **67**, 8, 1207 (2003).
- [24] Б. Яффе, У. Кук, Т. Яффе. Пьезоэлектрическая керамика. Мир, М. (1974). 287 с.
- [25] J.T. Dickinson, L.C. Jensen, W.D. Williams. J. Am. Cer. Soc. **68**, 5, 235 (1985).
- [26] В.-С. Shin, Н.-Г. Kim. Ferroelectrics **100**, 1-4, 209 (1989).
- [27] В.-С. Shin, Н.-Г. Kim. In: Proc. 3rd Int. Conf. Conduct. Breakdown Solid Dielect. Trondheim (1989). P. 474.