

05.1; 05.2

© 1993

ПРОВАЛЫ ПОРОГА ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА
В НИЗКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Е.Г. Ф а т е е в

Воздействия статических электрических полей и сильных оди-
ночных импульсов на твердые тела при осевых деформациях могут
приводить, как известно, к заметному изменению их порога прочно-
сти \bar{P}_c [1]. Под влиянием ВЧ и СВЧ полей также происходят зна-
чительные падения \bar{P}_c в различных материалах [2]. Но, насколь-
ко нам известно, на низких частотах ($\nu = 1-10^6$ Гц) наблюдались
лишь монотонные зависимости $\bar{P}_c(\nu)$ [3, 4]. В данной статье
сообщается о первом наблюдении такой зависимости, имеющей глу-
бокие низкочастотные минимумы.

Существенно, что этот эффект проявился в экспериментах с
реологическим взрывом (РВ), когда твердое тело испытывает
взрывное объемное разрушение в результате сильного одноосно-
го статического сжатия на наковальнях Бриджмена [5-8]. В то же
время для возбуждения РВ не требуется специального подготов-
ления образцов, что в сочетании с удачным выбором вещества
 $NH_4HC_2O_4 \cdot H_2O$ - кислого оксалата аммония (КОА) с низким
порогом возбуждения РВ, - значительно облегчило проведение
опытов в единых условиях на всех низких частотах. С другой сто-
роны, выявленные недавно взаимосвязи \bar{P}_c - порога возбуждения
РВ (или среднего критического давления на тело, при котором
в нем возбуждается РВ) с толщиной [7], температурой и скоростью
сжатия [8], а также термодинамическими параметрами веществ
[9] способствуют корректной постановке описываемых здесь экспе-
риментов.

Опыты проводили следующим образом. Образцы КОА в виде по-
рошка помещали между двумя наковальнями с твердосплавными
вставками из карбида вольфрама и диаметрами рабочих плоскостей
 $h = 5$ мм. Часть образца, остающаяся в системе в предкритиче-
ской упругой стадии сжатия, находилась в монолитном диске с тол-
щиной $\sim 0,25$ мм. Во всем представленном здесь исследовании
(около 400 эффектов с РВ), что принципиально, удалось исполь-
зовать без разрушения твердой вставки всего одну пару наковален.
Образцы нагружались со средней скоростью $dP/dt \sim 1$ кбар/с при
температуре $T = 293$ К по стандартной методике. Переменное
электрическое поле в виде прямоугольных импульсов длительностью
10 мкс в диапазоне частот $1-10^5$ Гц подавалось на образцы
через наковальни. Напряженность поля в импульсе для образцов
КОА с диэлектрической проницаемостью в предкритических стадиях
сжатия $\epsilon \approx 10$ и поддерживалось на уровне $E \approx 30$ кВ/см.

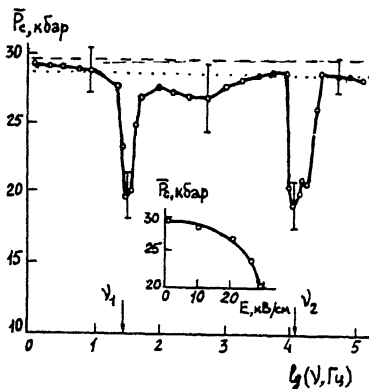


Рис. 1. Зависимость порога возбуждения РВ от частоты переменного электрического поля $\bar{P}_c(\nu)$ напряженностью $E \approx 30$ кВ/см с минимумами при $\nu_1 \approx 31$ Гц и $\nu_2 \approx 11$ кГц. Пунктирной и точечной линиями отмечены уровни порога \bar{P}_c без воздействий ($E = 0$) и в статическом поле с $E \approx 30$ кВ/см соответственно. На вставке показана глубина провала в зависимости от напряженности поля $\bar{P}_c(E)$ на частоте ν_2 .

Из представленной на рис. 1 зависимости видно, что на частоте $\nu_1 \approx 31$ Гц существует глубокий узкий минимум $\bar{P}_c(\nu_1)$, а при $\nu_2 \approx (1-1.1) \cdot 10^4$ Гц проявляется такой же по глубине, но более широкий провал порога возбуждения РВ $\bar{P}_c(\nu_2)$. Значения \bar{P}_c вдали от минимумов находятся на уровне порога, наблюдаемого для образцов КОА в статическом поле $E \approx 30$ кВ/см и немного ниже \bar{P}_c без всяких воздействий. Отношение абсолютных значений \bar{P}_c без наложения полей и в минимумах в переменном поле при $E \approx 30$ кВ/см достигает 1.5 раза. И, как показано в специальном опыте (рис. 1, вставка), глубина порога в минимумах зависит от напряженности поля.

Пытаясь объяснить существование указанных провалов порога $\bar{P}_c(\nu)$, заметим, что к изменению пределов прочности в некоторых сегнетоэлектриках до 1.5 раза могут приводить переориентации доменов [10]. Известно, что и КОА вблизи температуры $T_C = 146$ К переходит в сегнетоэлектрическое состояние и T_C сильно растет при повышении давления [11]. Однако резонансные частоты групп ионов в КОА расположены выше 100 МГц, а переориентации доменов демпфируются уже при давлениях в несколько кбар [12]. В низкочастотных же полях более вероятны резонансы, связанные с медленно релаксирующими системами дефектов. Также, как известно, одноосное сжатие приводит к появлению структурных неоднородностей в теле, на границах которых могут накапливаться заряды с временами релаксаций при подзарядках порядка 10^{-5} – 10^4 с [13]. В КОА же подобные неоднородности появляются, как оказалось, при давлениях выше 3–4 кбар [14]. Итак, здесь пред-

полагается, что на некоторых низких частотах при сильном неоднородном сжатии образцов КОА имеют место максимумы диэлектрических потерь, и соответствующие тепловыделения приводят к снижению порога \bar{P}_C . Для проверки этого нами был поставлен дополнительный опыт.

На поверхность наковальни подвели Su -капель термопару, изолированную от образца тонкой полиимидной пленкой с толщиной 0,05 мм для исключения возможности каталитического разложения КОА. Снималась зависимость температуры от частоты импульсов в двух стадиях сжатия. Отметим, что подобная зависимость без образца является прямой $T(V) = 293$ К. Оказалось, что температурный отклик действительно фиксировался, но лишь на частоте ν_2 в последней предкритической стадии сжатия при $P > 10$ кбар, как показано на рис. 2. Отсюда естественно предположить, что пик тепловыделения в образце на частоте ν_2 является в последние 1-5 с до возбуждения РВ. Это обстоятельство делает возможным проявление РВ при кратковременном тепловыделении, ибо при длительном нагревании образца КОА между наковальнями еще в начале сжатия он становится пластичнее и выдавливается, образуя в упругой стадии более тонкий диск. А это, в свою очередь, приводит к значительному росту порога \bar{P}_C из-за размерного эффекта. [8].

Оценим возможное падение порога \bar{P}_C при увеличении температуры $T(x, \tau)$ в образце ОКА из-за тепловыделения за 1-5 с до возбуждения РВ, взяв соответствующее этой задаче решение [15] в виде

$$T(x, \tau) \approx T_S + (T_S - T_\alpha) \Phi[x, \tau, (T_S - T_\alpha)^{-1}, W, \lambda_S, \lambda_\alpha, c_S, c_\alpha, \gamma_S, \gamma_\alpha],$$

где $\Phi[x, \tau, \dots, \gamma_S, \gamma_\alpha]$ - функциональный член, зависящий от параметров: x - расстояние от центра диска в осевом направлении; τ - время работы источника тепла мощностью W ; λ_S и λ_α , c_S и c_α , γ_S и γ_α - теплопроводности, изобарные теплоемкости и плотности материалов в образце и наковальнях соответственно. Для КОА и карбида вольфрама в нормальных условиях имеем: $\lambda_S \approx 1$ Вт/м·К, $\lambda_\alpha \approx 160$ Вт/м·К, $c_S \approx 2860$ Дж/кг·К, $c_\alpha \approx 128$ Дж/кг·К, $\gamma_S \approx 1500$ кг/м³, $\gamma_\alpha \approx 1700$ кг/м³. При $W \sim 2 \cdot 10^{-1}$ Вт/мм³ и начальных температурах $T_S = T_\alpha = 293$ К, оценка дает в центре образца ($x = 0$) $T \sim 304$ К, если на границе с наковальней (через пленку) зафиксирован отклик $\Delta T = T - 293$ К = 2 град, как это видно из рисунка 2. В то же время изменение \bar{P}_C в зависимости от температуры в тонком упругом диске постоянной толщины можно оценить по формуле из [8] в приведенном виде:

$$\bar{P}_C(T) \propto \bar{P}_C^* \left[T^\alpha (1 - \beta T) / T_*^\alpha (1 - \beta T_*) \right], \quad (1)$$

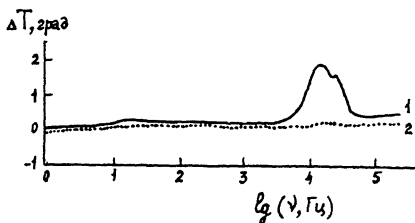


Рис. 2. Частотная зависимость температурного отклика $\Delta T = T - 293$ К на границе образца с наковальной в переменном поле напряженностью в импульсе $E \approx 30$ кВ/см в предкритической $P > 10$ кбар (1) и в докритической $P \lesssim 5$ кбар (2) стадиях сжатия.

где \bar{P}_c^* – порог при $T_* = 293$ К, α и β – безразмерные константы, зависящие от природы материалов и лежащие в пределах $\alpha = -(1.2-1.5)$ и $\beta = (2.1-2.3) \cdot 10^{-3}$. Без учета теплового сопротивления пленки при $T = 304$ К порог в оценке падает до значений $\bar{P}_c \sim 23-24$ кбар, которые находятся в некотором соответствии с реальным $\bar{P}_c \sim 20$ кбар в провале. Кроме этого, заметим, что зависимость порога возбуждения РВ от напряженности поля во втором минимуме $\bar{P}_c(\nu, E)$ (рис. 1, вставка) коррелирует с уровнем тепловыделения в пике диэлектрических потерь, поскольку $T \propto W \propto E^2 \cdot \text{const}$ [2], и $\bar{P}_c(E)$ имеет вид (1) с E^2 вместо T .

Таким образом, появление провала порога возбуждения РВ в образце КОА на частоте ν_2 вполне можно объяснить вышеописанными диссипациями энергии электрического поля. Однако причина появления провала P_c на частоте ν_1 осталась во многом неясной. Возможно, этот провал обусловлен дегидратацией КОА на этой частоте, ибо, как известно [16], индуцированные электрическим полем распады в некоторых кристаллогидратах действительно наблюдаются на низких частотах.

Автор признателен В.А. Жорину за стимулирующую дискуссию.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ф и н к е л ь В.М. Физические основы торможения разрешения. М.: Металлургия, 1977. 360 с.
- [2] Б р и ц и н Н.Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты. М.: Наука, 1965. 234 с.
- [3] N i e l s e n L.E., B u c h d a h l B. // J. Appl. Phys. 1950. V. 21. P. 607-613.
- [4] F i t z g e r a l d E.R., F e r r y J.D. // J. Colloid Sci. 1953. V. 8. P. 1-5.

- [5] B r i d g m a n P.W. // Phys. Rev. 1935. V. 48. N 15. P. 825-847.
- [6] Я р о с л а в с к и й М.А. Реологический взрыв. М.: Наука, 1982. 193 с.
- [7] Е н и к о л о п я н Н.С., М х и т а р я н М.С., К а р а г е з я н А.А. // ДАН СССР. 1987. Т. 292. В. 4. С. 887-890.
- [8] Ф а т е е в Е.Г., Х а н В.П. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 20. С. 51-55.
- [9] Х а н В.П., Ф а т е е в Е.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 81-84.
- [10] Б о н д а р е н к о Е.И., Т о п о л о в В.Ю. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 3. С. 10-13.
- [11] К r a u z m a n M., G o d e t L. // Europhys. Lett. 1988. V. 6. N 1. P. 37-42.
- [12] F u k a i M., M a t s u o T. // J. Phys. Chem. Solids. 1989. V. 50. P. 743-751.
- [13] S c h m i d t H., S c h w a b l F. // Phys. Lett. B. 1977. V. 61. P. 476-480.
- [14] P o o n W.C.K. // J. Phys.: Condens. Matter. 1991. V. 3. P. 1207-1210.
- [15] Л ы к о в А.В. Теория теплопроводности. Л.: Госэнергоиздат, 1952. 290 с.
- [16] Д у х и н С.С., Ш и л о в В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. Киев: Наукова думка, 1972. 207 с.

Институт прикладной техники
УрО РАН, Ижевск

Поступило в Редакцию
8 апреля 1993 г.