

полнения пор. При большем содержании ВВ процесс односкоростной и ведется ударной волной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хотин В.Г., Пономарев В.А. К вопросу о структуре детонационных волн в малоплотных зарядах конденсированных ВВ // ФГВ. — 1973. — 9, № 2. — С. 304—309.
2. Шведов К.К., Анискин А.И., Ильин А.Н. и др. Исследование детонации сильно разбавленных пористых ВВ. II. Влияние инертной добавки на структуру фронта, параметры и время реакции // ФГВ. — 1982. — 18, № 1. — С. 79—90.
3. Бабайцев И.В., Панарин Ю.П., Тышкевич В.Ф. Давление детонации смесей взрывчатых веществ с инертной добавкой // Взрывное дело. — М.: Недра, 1973. — № 72/29. — С. 20—24.
4. Бойко М.М., Крамаренко В.Н., Соловьев В.С. Особенности детонации низкоплотных ВВ с открытой пористостью // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. — Черноголовка, 1977. — С. 58—62.
5. Андреев В.В., Зубков П.И., Киселев Г.И. и др. Об одном из режимов детонации в порошковых ВВ малой плотности // Динамика сплошной среды. — Новосибирск, 1972. — Вып. 10. — С. 183—188.
6. Андреев В.В., Лукьянчиков Л.А. К механизму распространения детонации с малой скоростью в порошковом тэне при искровом инициировании // ФГВ. — 1974. — 10, № 6. — С. 912—919.
7. Андреев В.В., Ершов А.П., Лукьянчиков Л.А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Там же. — 1984. — 20, № 3. — С. 89—93.
8. Пинаев А.В., Лямкин Г.А. Низкоскоростная детонация ВВ в вакуумированной пористой среде // ДАН. — 1992. — 325, № 3. — С. 498—501.
9. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. — Л.: Химия, 1960.
10. Воробьев А.А., Дремин А.Н., Саввин Л.И. др. Использование катушек Гельмгольца в электромагнитном методе // ФГВ. — 1983. — 19, № 4. — С. 146—150.
11. Дремин А.Н., Савров С.Д. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.

630090, г. Новосибирск,
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 23/VII 1993,
после доработки — 14/X 1993

УДК 539.89 + 637.226 + 678

С.С. Набатов, В.В. Якушев

АНАЛИЗ ОТКЛИКА ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКУЮ УДАРНУЮ ВОЛНУ

Рассмотрена феноменологическая модель пьезополимерных датчиков давления, предназначенных для регистрации плоских ударно-волновых импульсов. Анализ отклика датчиков проведен с учетом физических явлений, наблюдаемых в поляризованных полимерных пленках при воздействии УВ высокой интенсивности, термодинамического состояния материала чувствительного элемента и параметров измерительной цепи. Проведено сопоставление численных расчетов с экспериментальными данными для датчиков из поливинилиденфторида в диапазоне динамических давлений до 16 ГПа. Показано, что при таких давлениях электрический отклик в основном определяется изменением остаточной поляризации пьезопленки за счет ее сжатия.

Анализ способов и средств регистрации динамических давлений показывает перспективность использования для этих целей датчиков на основе пьезопленочных полимерных материалов (ППМ). Под такими материалами будем понимать полимерные пленки, в которых специальным образом создана стабильная остаточная электрическая поляризация P_r в направлении, перпендикулярном плоскости образца.

Считается (например, [1—4]), что наиболее перспективным материалом для изготовления чувствительных элементов пленочных датчиков динамических давлений является поляризованный поливинилиденфторид (ПВДФ). Не исключено, однако, что для ряда конкретных областей применения оптимальными могут оказаться и некоторые другие пьезопленки.

© С.С. Набатов, В.В. Якушев, 1994.

В настоящей работе на основании феноменологической модели отклика ППМ датчика дан анализ влияния характера нагружения и возможной быстрой частичной деполяризации материала чувствительного элемента на зависимость выделившегося во внешней цепи датчика заряда от времени. Представлены примеры использования полученных результатов для интерпретации экспериментальных осциллограмм.

Феноменологическая модель датчика

Рассмотрим одномерную задачу об электрическом отклике датчика в предположении, что поляризованная пленка при динамическом воздействии остается хорошим диэлектриком, т.е. ее собственная электропроводность не влияет на регистрируемый сигнал.

Принципиальная электрическая схема датчика представлена на рис. 1. Его чувствительным элементом является поляризованный участок l полимерной пленки 2, на который нанесены токосъемные электроды 3. Будем считать, что толщина последних пренебрежимо мала. Пьезопленка изолирована с обеих сторон диэлектрическими прокладками 4. Электроды подключены к измерительной цепи, имеющей электрическую емкость C_e и сопротивление R_e . Датчик размещен в исследуемой среде 5, по которой распространяется плоский ударно-волновой импульс b произвольного профиля.

При динамическом нагружении происходит изменение остаточной поляризации пьезопленки, и в измерительной цепи возникает электрический сигнал. Задача модели заключается в нахождении связи между этим сигналом и зависимостью давления от времени.

Можно показать, что дифференциальное уравнение, описывающее электрический отклик, имеет следующий общий вид:

$$(C_g + C_e) \frac{dV}{dt} + V \frac{d}{dt} (C_g + C_e) + \frac{V}{R_e} = -S_0 \frac{d}{dt} \frac{\int_0^l \frac{P_r}{\epsilon} dx}{\int_0^l \frac{1}{\epsilon} dx}, \quad (1)$$

где C_g — емкость чувствительного элемента; V — регистрируемое напряжение; S_0 — площадь чувствительного элемента; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость пьезопленки; l — текущая толщина элемента. Данное уравнение имеет общий характер и описывает электрический отклик с учетом реверберационных процессов в пьезопленке при достижении в ней давления окружающей среды.

Предположим теперь, что толщина датчика достаточно мала, чтобы этими процессами можно было пренебречь. Иными словами, остаточная поляризация практически мгновенно подстраивается под давление окружающей среды. В этом случае уравнение (1) упрощается и принимает вид

$$(C_g + C_e) \frac{dV}{dt} + V \frac{d}{dt} (C_g + C_e) + \frac{V}{R_e} = -S_0 \frac{d\bar{P}_r}{dt}, \quad (2)$$

где под \bar{P}_r следует подразумевать усредненную по толщине пьезопленки остаточную поляризацию.

Существуют два предельных режима работы датчика, представляющие практический интерес. Первый режим реализуется в короткозамкнутой цепи (режим генератора тока). Положив в (2) $V(t) \equiv 0$ и проинтегрировав полученный ток по времени с момента входа волны сжатия в пьезопленку, для удельного заряда $q(t)$, выделившегося в измерительной цепи, получим

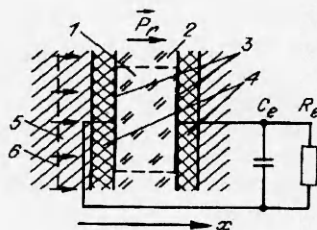


Рис. 1. Электрическая схема датчика.

$$q(t) = \bar{P}_r(t) - \bar{P}_r^0, \quad (3)$$

где \bar{P}_r^0 — начальная остаточная поляризация.

Второй режим реализуется в разомкнутой цепи ($R_c = \infty$, $t = 0$). Нетрудно показать, что в данном случае

$$V(t) = S_0 q(t) / (C_g + C_c). \quad (4)$$

Этот режим работы датчика можно назвать режимом измерения заряда.

Анализ имеющихся экспериментальных результатов показывает, что изменение исходной электрической поляризации пьезопленок при динамическом нагружении, кроме тривиального вторичного пьезоэффекта за счет сжатия вещества, может определяться индуцированной ударной волной поляризацией и высокоскоростной деполяризацией [5].

Известное явление ударной поляризации есть следствие неравновесных процессов внутри фронта, приводящих к разделению зарядов, и не имеет однозначной связи с профилем давления за фронтом. Быстрая деполяризация может приводить к частичному или полному разрушению поляризованного состояния. Она имеет сложный и неоднозначный характер и зависит не только от давления и времени ее действия, но и от характера деформации чувствительного элемента.

Очевидно, что с точки зрения создания датчиков давления полезен только пьезоэлектрический эффект. Другие электрические явления при ударном сжатии пьезопленок могут, вообще говоря, существенно исказить показания датчика. Поэтому о них нужно иметь ясное представление и в необходимых случаях учитывать.

Положим теперь, что $\bar{P}_r(t)$ связана с коэффициентом сжатия $\sigma(t)$ пьезопленки следующим соотношением:

$$\bar{P}_r(t) = f(t)\sigma(t)\bar{P}_r^0. \quad (5)$$

Здесь $f(t)$ — некоторая функция, которая учитывает отклонение величины остаточной поляризации от ее значения, соответствующего проявлению только вторичного пьезоэффекта ($f \equiv 1$). С учетом (5) выражение для выделившегося заряда переписется в виде

$$q(t) = \bar{P}_r^0 [f(t)\sigma(t) - 1]. \quad (6)$$

Отсюда, в частности, следует, что на основе экспериментально определяемых в процессе ударно-волнового воздействия $\sigma(t)$ и $q(t)$ можно рассчитать $f(t)$ при известном значении \bar{P}_r^0 .

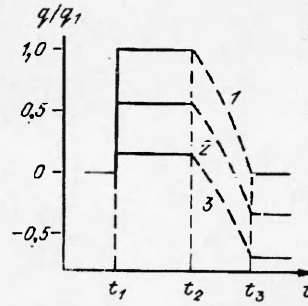
Такие исследования позволяют определять предельные режимы нагружения датчика, до которых соблюдается однозначная связь между выделившимся зарядом и величиной сжатия пьезопленки. Следует отметить, что формула (6) включает в себя как частный случай соотношение, приведенное в [6], где заранее предполагалось, что датчик работает по принципу вторичного пьезоэффекта. Также следует упомянуть, что в указанной работе использовалась относительная деформация материала датчика вместо параметра ($\sigma - 1$), что корректно делать только для небольших степеней сжатия ($\sigma \approx 1,1$).

Для иллюстрации на рис. 2 приведены рассчитанные на основе формулы (6) отклики датчика для трех различных значений функции f . При расчетах для определенности было положено, что сжатие является однократным ударным до $\sigma = 1,3$ и нагрузка и разгрузка осуществляются по одной и той же кривой в координатах давление p — удельный объем v .

На графиках заряд нормирован на величину заряда q , соответствующего ударно-сжатому состоянию при $f \equiv 1$ (кривая 1). Кривые 2 и 3 построены для случая, когда во фронте ударной волны происходит частичная деполяризация материала датчика (параметр f скачкообразно уменьшается и в дальнейшем остается неизменным). Как видно из рис. 2, при $f \equiv 1$ после спада давления q принимает нулевое значение. В случае же частичной

Рис. 2. Схематическая иллюстрация влияния деполяризации на электрический отклик датчика.

t_1 — вход УВ в пьезопленку; t_2 — приход волны разгрузки; t_3 — время окончания действия динамического давления; $1 - f = 1$; $2 - f = 1$ ($t < t_1$), $f = 0,9$ ($t \geq t_1$); $3 - f = 1$ ($t < t_1$), $f = 0,8$ ($t \geq t_1$).



деполяризации амплитуда отклика на фазе сжатия уменьшается, и в процессе разгрузки заряд меняет знак.

В действительности могут наблюдаться и другие формы откликов из-за того, что деполяризация может происходить на любой стадии регистрации ударно-волнового импульса и иметь сложную временную зависимость.

Как следует из соотношения (6), для интерпретации показаний ППМ датчика необходимо знать зависимость $\sigma(p)$ для материала чувствительного элемента в процессе регистрации ударно-волнового импульса. Что касается однократного ударного сжатия, то в данном случае достаточно воспользоваться ударной адиабатой пьезопленки, которая может быть определена с необходимой степенью точности экспериментально. При других режимах нагружения (ступенчатое или изоэнтропическое), а также в процессе разгрузки приходится применять расчетные методы в рамках тех или иных предположений.

В настоящей работе для анализа показаний ППМ датчика на основе ПВДФ определены изоэнтропы нагрузки и разгрузки материала пленки в координатах $\sigma - p$. При этом предполагалось, что ударная адиабата материала датчика известна и задана линейной зависимостью $U = a + bu$, где U — скорость фронта ударной волны; u — массовая скорость вещества за фронтом.

В процессе расчета первоначально определяли температуру T в зависимости от удельного объема v вдоль ударной адиабаты и изоэнтроп. При этом считалось, что параметр $(\partial p / \partial T)_v$ и удельная теплоемкость при постоянном объеме C_v являются константами. Затем, используя $p - v$ -зависимость для ударной адиабаты, определяли изоэнтропы в этих же координатах по рассчитанным температурам через параметр $(\partial p / \partial T)_v$. Для продолжения изоэнтропы разгрузки до атмосферного давления использовали кривую теплового расширения от начального объема до объема разгруженного состояния. Величины C_v , $(\partial p / \partial T)_v$ и $(\partial v / \partial T)_p$ находили из соотношений

$$C_v = C_p^0 - T_0 v_0 \frac{\alpha_0^2}{\beta_0}, \quad \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{\alpha_0}{\beta_0}, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \alpha_0 v_0,$$

где C_p^0 — удельная теплоемкость при постоянном давлении; α_0 — коэффициент объемного теплового расширения; β_0 — коэффициент объемной изотермической сжимаемости. Индекс нуль означает, что параметры соответствуют начальным условиям.

Используемые для анализа феноменологической модели характеристики ПВДФ приведены ниже.

Ударная адиабата поляризованной пленки при $\rho_0 = 1,80 \text{ г/см}^3$, построенная в диапазоне динамических давлений 1—30 ГПа на базе экспериментальных данных [1], имеет вид

$$U = 2,16 + 1,68u \text{ км/с},$$

$C_p^0 = 1,38 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ [7], $\alpha_0 = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, $\beta_0 = 2,39 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$ [8]. Для расчета величины выделившегося заряда использовали $P_r^0 = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$ [2]. Из этой же работы взяты и экспериментальные данные по калибровке датчика до $p = 16 \text{ ГПа}$.

Расчетные зависимости $q(p)$ показаны на рис. 3. Отметим, что экспериментальные точки фактически получены для квазиизоэнтропического

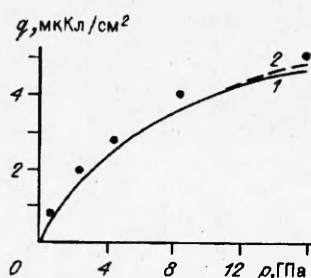


Рис. 3. Расчетные зависимости $q(p)$ для ПВДФ пленки ($f \equiv 1$).
1 — сжатие вдоль ударной адиабаты; 2 — сжатие вдоль изэнтропы; точки — данные калибровки [2].

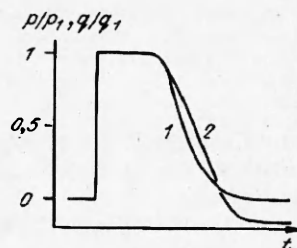


Рис. 4. Гипотетический профиль давления (1) и соответствующая ему форма электрического отклика датчика (2); $p = 14,5$ ГПа, $f = 1$, p_1 — амплитуда ударно-волнового импульса, q_1 — максимальная плотность заряда.

сжатия пьезопленки, поскольку для давлений, начиная с 2,6 ГПа, датчик был размещен в среде с большей динамической жесткостью, чем ПВДФ.

Оказалось, что в рассмотренном диапазоне давлений параметр f феноменологической модели находится в пределах 1,0—1,03. Из этого следует, что основной вклад в электрический отклик датчика дает вторичный пьезоэлектрический эффект. Кривая $q(p)$ имеет нелинейный характер в соответствии с нелинейной зависимостью $p(\sigma)$.

В рамках сделанных предположений при $p \leq 16$ ГПа показания датчика не должны сильно отличаться друг от друга при разных режимах нагружения чувствительного элемента. Так, при $p = 16$ ГПа различие между показаниями датчика в условиях однократного ударного сжатия и изоэнтропического нагружения будет составлять $\sim 5\%$. Однако в волне разгрузки, если пьезопленка нагружена однократной УВ, ошибка будет возрастать по мере падения давления. Если $p < 5$ ГПа, рассмотренными выше различиями можно пренебречь.

Для примера на рис. 4 показана расчетная форма электрического отклика датчика при регистрации профиля ударно-волнового импульса для случая нагружения датчика однократной УВ. Из рис. 4 видно, что заряд при разгрузке меняет полярность за счет остаточного разогрева.

Анализ экспериментальных результатов

Рассмотрим примеры обработки результатов динамических экспериментов в рамках приведенной выше модели. Опыты выполнены с датчиками, изготовленными на основе отечественной пленки ПВДФ марки Ф2-МЭ. Измеренная по петле гистерезиса в процессе электрической поляризации величина \bar{P}_1^0 составляла 6,3 мКл/см². Толщина пленки 30 мкм, диаметр поляризованной области 6 мм. Для регистрации электрического заряда, генерируемого датчиком, использовали пассивную интегрирующую схему.

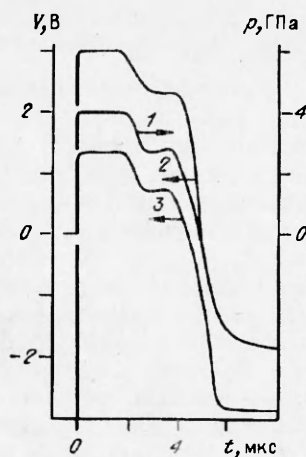
Интегратор состоял из конденсатора емкостью $C_q = 0,16$ мкФ и сопротивления 75 Ом, равного волновому сопротивлению соединительного кабеля. Падение напряжения на конденсаторе V регистрировали цифровым осциллографом С9-8 с входным сопротивлением 1 МОм. Так как емкость датчика $C_g \ll C_q$, то

$$S_0 q(t) = C_q V(t). \quad (7)$$

Датчик размещали между двумя пластинами из плексигласа и нагружали алюминиевым ударником диаметром 90 и толщиной 7 мм. Ударник разгоняли при помощи генератора плоской детонационной волны, состоящего из парафина (внутренняя часть) и заряда ВВ (внешняя оболочка). Профиль давления в плоскости размещения пьезополимерного чувствительного элемента, зарегистрированный манганиновым датчиком, приведен на рис. 5, 1. Осциллограммы 2 и 3 отражают характерные особенности изменения динамического давления. Однако после полной разгрузки пьезополимерные

Рис. 5. Сравнение экспериментальных результатов ($p = 4$ ГПа).

1 — экспериментальный профиль давления, полученный манганиновым датчиком; 2, 3 — электрические сигналы ПВДФ датчиков.



датчики продолжают генерировать электрический заряд, но уже противоположной полярности. При этом абсолютные величины сигналов, соответствующие процессам нагрузки и разгрузки, сравнимы между собой.

На основе рассмотренной выше модели вычислены значения параметра f на всех стадиях регистрации динамического импульса. Оказалось, что в случае рис. 5, 2 параметр $f \approx 1$ за все время существования динамического давления. Во втором же случае $f = 0,89$. Это указывает на то, что используемая пьезопленка не обладала достаточной стабильностью от опыта к опыту и в отдельных случаях происходила ее частичная деполяризация во фронте ударной волны. Помимо этого необходимо отметить, что наблюдаемые во всех экспериментах отрицательные значения отклика следует отнести как за счет проявления деполяризации во фронте УВ (если таковая имела место), так и за счет дополнительной деполяризации чувствительных элементов, но уже в разгруженном состоянии.

Авторы выражают благодарность А.П. Курто, предоставившему образцы чувствительных элементов, и А.В. Лебедеву, выполнившему термодинамические расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bauer F. Behavior of Ferroelectric Ceramics and PVF₂ Polymers Under Shock Loading // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter. 1981 / Am. Inst. of Physics, 1982. — P. 251—267.
2. Graham R.A., Bauer F., Lee L.M. et al. The Standardized Bauer Piezoelectric Polymer Shock Gauge // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter. Elsevier Science Publishers, 1988. — P. 47—50.
3. Bauer F., Graham R.A., Anderson M.U. et al. Response of the Piezoelectric Polymer PVDF to Shock Compression Greater than 10 GPa // Proc. of Shock Compression of Condensed Matter. — 1991. Elsevier Sci. Publ. B.V., 1992. — P. 887—890.
4. Charest J.A., Lynch C.S. A Simple Approach to Piezofilm Stress Gauges // Ibid. — P. 897—900.
5. Антипенко А.Г., Курто А.П., Якушев В.В. Электрические эффекты при ударном сжатии полимерных электретов // Детонация: Матер. II Всесоюз. совещания по детонации. — Черногловка, 1981. — Вып. 2. — С. 118—123.
6. Lynch C.S., Charest J.A. Practical Considerations on the Piezofilm Gauge Technique // Elsevier Sci. Publ. B.V., 1992. — P. 901—904.
7. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. — Л.: Химия, 1978. — 230 с.
8. Электреты / Под ред. Г. Сесслера. — М.: Мир, 1983. — 486 с.

142432, п. Черногловка,
ИХФ в Черногловке

Поступила в редакцию 15/11 1993,
после доработки — 26/X 1993

УДК 535. 552. 529. 5

А.Б. Британ, Е.И. Васильев, В.А. Куликовский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСЛАБЛЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЭКРАНОМ ИЗ ПЕНЫ

В одномерной постановке рассматривается задача о распаде разрыва в вертикальной ударной трубе при наличии в канале газозвеси из водяных капель. Подобный подход используется для численного моделирования условий физического эксперимента в ударной трубе, содержащей экран из пены. Обсуждаются динамика волновых процессов прохождения

© А.Б. Британ, Е.И. Васильев, В.А. Куликовский, 1994.