

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ

В. В. Астанин, Г. В. Степанов

(Киев)

В настоящее время диэлектрический датчик давления используется многими исследователями для регистрации профиля импульса давления в твердых телах, вызванного ударным или взрывным нагружением. Недостаточное понимание физических процессов работы датчика и особенностей его применения может стать причиной противоречивой оценки работоспособности датчика и недостаточной надежности результатов измерений, получаемых с его помощью. В данной работе приведен краткий обзор и результаты последних исследований, проведенных в Институте проблем прочности АН УССР, по разработке и применению диэлектрического датчика для регистрации импульса нагрузки в твердых телах. Основные результаты исследований с применением диэлектрических датчиков опубликованы в [1—5].

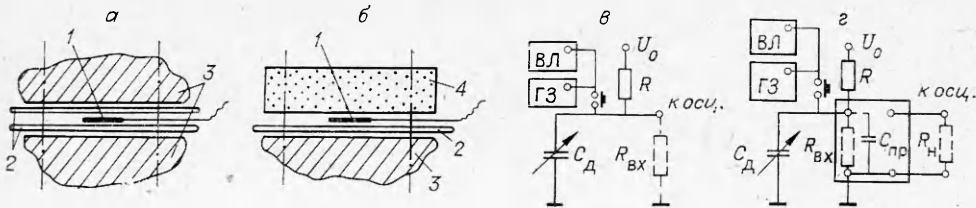
Диэлектрический датчик давления первоначально разработан для регистрации импульса давления, действующего в плоскости фронта плоских волн нагрузки. Наиболее простым и технологичным является конструктивное выполнение датчика в виде плоского конденсатора (фиг. 1, а), центральный электрод 1 которого вместе с выводом расположен между двумя слоями диэлектрической пленки 2, а второй электрод 3 (поверхности проводящих металлических материалов) заземлен. В случае неметаллических материалов вторым электродом является тонкая металлическая фольга, обернутая вокруг диэлектрических пленок (на фиг. 1 не показана). Для повышения разрешающей способности по времени применяется один слой диэлектрика, который вместе с центральным электродом прижимается к исследуемому материалу пластиной 4 из материала, акустическая жесткость которого примерно равна акустической жесткости диэлектрической пленки, например из оргстекла (фиг. 1, б).

Измерение давления основано на регистрации изменения при сжатии емкости датчика. Последний емкостью C_d заряжается от источника постоянного напряжения U_0 через сопротивление R , которое столь велико, что влияние процесса подзарядки конденсатора в течение всего времени процесса регистрации t_p несущественно:

$$(1) \quad RC \gg t_p,$$

где $C = C_d + C_{пр}$, $C_{пр}$ — присоединенная емкость (емкость кабеля и входа цепи регистрирующей аппаратуры).

При сжатии датчика заряд конденсатора $Q = C_0 U_0 \approx CU$ (индекс 0 соответствует начальному значению) сохраняется практически неизменным (проводимостью пленки пренебрегаем), а изменение емкости, вызванное сжатием диэлектрика, приводит к изменению разности потенциалов ΔU на электродах датчика, регистрируемой прибором с высокоомным входом, сопротивление $R_{вх}$ которого также удовлетворяет условию (1). В зависимости от конкретных условий регистрации диэлектрический датчик может соединяться непосредственно с пластинами вертикального отклонения электронно-лучевой трубки осциллографа коротким отрезком кабеля (фиг. 1, в) либо через катодный повторитель (КП) или усилитель с высокоомным входом (фиг. 1, г), что позволяет передавать сигнал по со-



Ф и г. 1

гласованному кабелю на значительные расстояния. При коротком отрезке кабеля длиной L , не согласованного с входным сопротивлением цепи регистрации, переходными процессами можно пренебречь при их длительности $t = (5-10) \frac{L}{c_{эм}}$ ($c_{эм}$ — скорость электромагнитной волны в кабеле), пренебрежимо малой по сравнению с временем регистрации, $t \ll t_p$.

Изменение разности потенциалов на электродах датчика определяется выражением [3]

$$\Delta U = - \int_0^p \frac{C_0 U_0}{C^2} \frac{dC}{dp} dp,$$

где p — величина давления в волне сжатия.

Амплитуда электрического сигнала датчика пропорциональна величине поляризующего напряжения и примерно обратно пропорциональна присоединенной емкости

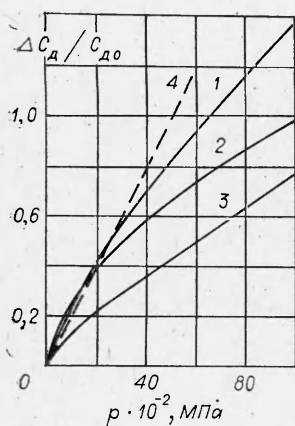
$$\Delta U = -(U_0 \Delta C_d / C_0) (1 + \Delta C_d / C_0)^{-1},$$

что позволяет обеспечить высокую чувствительность датчика. Так, при напряжении поляризации $U_0 = 800$ В датчик с триацетатной пленкой толщиной 0,2 мм имеет чувствительность 0,24 В/МПа в области малых давлений и снижается почти в 3 раза при повышении давления до 10000 МПа при малой величине присоединенной емкости ($\Delta C_d \approx C_0$). Нелинейная тарировочная кривая $\Delta C_d / C_{д0} = f(p)$ диэлектрического датчика при ее надежной экспериментальной оценке не вызывает существенного снижения точности и усложнения обработки осциллограмм. Как показано в [3], тарировочная кривая может быть удовлетворительно описана выражением

$$f(p) = \frac{\Delta C_d}{C_{д0}} = \left(1 - \frac{1}{\epsilon_0}\right) \left(\frac{np}{\rho_0 a_0^2} + 1\right)^{2/n} + \frac{1}{\epsilon_0} \left(\frac{np}{\rho_0 a_0^2} + 1\right)^{1/n} - 1,$$

где $C_{д0}$, ΔC_d — соответственно начальная емкость датчика и ее изменение под давлением; ϵ_0 , ρ_0 — диэлектрическая проницаемость и плотность диэлектрической пленки; n , a_0 — показатель степени в уравнении состояния и начальная скорость звука диэлектрической пленки. Это выражение основано на расчете изменения емкости датчика, обусловленного уменьшением толщины пленки и изменением ее диэлектрической проницаемости ϵ_0 . Следует отметить, что первоначальные линейные тарировочные зависимости для ряда диэлектрических материалов [2] основаны на недостаточно надежной методике тарировки и не могут быть использованы при проведении точных экспериментальных исследований. Более того, возможное различие характеристик пленок, связанное с их химическим составом, технологией изготовления и т. п., требует индивидуальной тарировки каждой партии пленок.

Высокая величина используемого поляризующего напряжения обусловлена необходимостью повышения стабильности измерений. При низкой величине U_0 на сигнал влияют процессы ударной поляризации в диэлектрической пленке датчика при прохождении волны нагрузки, которые не характеризуют профиль давления, что приводит к количественному и качественному искажению амплитуды и формы сигнала. По результатам экспериментальных исследований в слое триацетатной пленки толщиной 0,2 мм наличие электрического поля, вызванного поляризующим напряжением $U_0 \geq 400$ В приводит к подавлению ударной поляризации (при изменении полярности поля на обратную сигнал не изменяется по амплитуде и форме). Однако в некоторых случаях высокая величина поляризующего напряжения является препятствием к практическому использованию датчика. Понижение напряжения, например, при использовании датчика с более тонкой пленкой позволяет устранить указанный недостаток, однако при этом возрастает вероятность пробоя пленки в местах понижен-



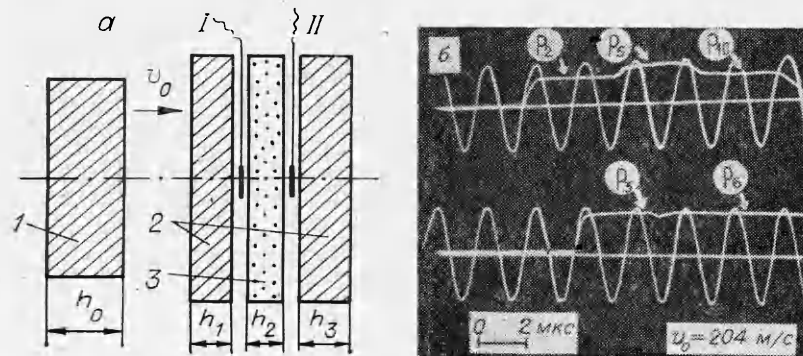
Ф и г. 2

тарировочная кривая из работы [6] для датчика с лавсановой пленкой толщиной 0,04 мм.

Использование толстых слоев диэлектрика [7] вызывает увеличение переходного времени выравнивания давления в датчике и окружающем материале и требует повышения уровня поляризующего напряжения пропорционально толщине. Аналогично применению сапфира такой датчик, соединенный с малой нагрузкой R (по короткозамкнутой схеме), удовлетворяющей условию $RC \ll t_p$, обеспечивает регистрацию импульса нагрузки на поверхности образец — датчик в течение времени прохождения волны давления по толщине диэлектрического слоя. Экспериментально установлено, что датчик с диэлектриком из оргстекла толщиной 10 мм при поляризующем напряжении $U_0 = 1000$ В удовлетворительно регистрирует профиль волны нагрузки на границе сталь — оргстекло, связанный с отражением от границы раздела упругопластической волны в стали, в том числе и профиль волны разгрузки. Для обработки осциллограмм может быть использована тарировочная кривая, полученная для датчика с тонкой диэлектрической пленкой.

На основании многочисленных экспериментальных исследований и анализа особенностей применения диэлектрического датчика для регистрации однократной импульсной нагрузки установлено, что при достаточной величине поляризующего напряжения, подавляющего эффекты ударной поляризации диэлектрика в волне нагрузки, обработка осциллограмм с использованием тарировочной зависимости $\Delta C_d / C_{d0} = f(p)$ обеспечивает надежное определение импульса давления как по амплитуде, так и по профилю.

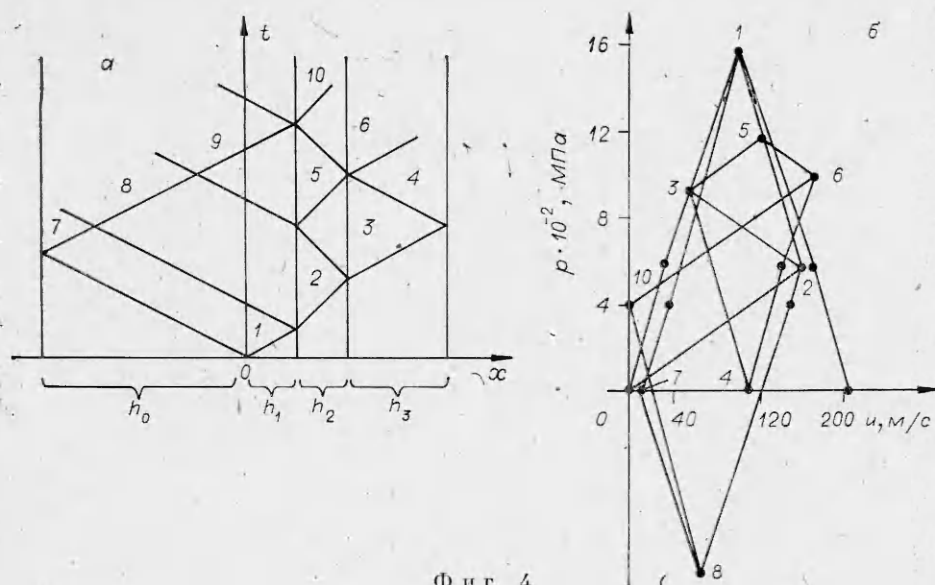
С целью установления особенностей регистрации диэлектрическим датчиком повторных волн догрузки или разгрузки проведена специальная серия экспериментов, схема которых показана на фиг. 3, а. Плоская волна



Ф и г. 3

ной электрической прочности, связанной с влиянием микронеоднородности и микродефектов пленки, ее разнотолщинности и других несовершенств. По этой причине оказались непригодными для использования датчики с лавсановой пленкой толщиной менее 0,04 мм — микродефекты в таких тонких пленках вызывают пробой в процессе подготовки эксперимента (при подаче поляризующего напряжения $U_0 = 100$ В) или утечку заряда в процессе регистрации, что приводит к завышенной величине сигнала.

Эти явления отсутствуют при использовании лавсановой пленки толщиной 0,06 мм. На фиг. 2 приведены тарировочные кривые датчика (1 — с триацетатной пленкой толщиной 0,2 мм, 2 — целлулоидной пленкой — 0,14 мм, 3 — лавсановой пленкой — 0,06 мм). Там же линией 4 дана тарировочная кривая из работы [6] для датчика с лавсановой пленкой толщиной 0,04 мм.



Ф и г. 4

нагрузки, вызванная ударом бойка 1 из сплава Д16 толщиной $h_0 = 20$ мм по слоистому образцу алюминий 2 — оргстекло 3 — алюминий 2 (толщины слоев h_1, h_2, h_3 соответственно 6; 6; 10 мм), регистрировались диэлектрическими датчиками на двух поверхностях раздела металл — оргстекло. Осциллограммы сигналов датчиков приведены на фиг. 3, б (датчики с лавсановой пленкой толщиной 0,06 мм). Диаграммы ($x - t$) и ($p - u$) волновых процессов в образце приведены на фиг. 4. Расчет величины давления по приведенным диаграммам с использованием упругопластической модели материала удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями давления на участках его постоянства $P_2, P_5, P_{10}, P_3, P_6$. Для обработки осциллограмм использовалась тарировочная зависимость $\Delta C_d / C_{d0}$, полученная в опытах с однократным сжатием.

Указанное в [6] снижение сигнала датчика при регистрации волны догрузки объясняется нелинейностью тарировочной зависимости датчика. Это подтверждается тем, что отношение амплитуд сигналов, связанных с прохождением первой волны нагрузки и следующей волны догрузки, на приведенной в указанной работе осциллограмме соответствует тарировочной зависимости 3 на фиг. 2.

Использованная в [6] тарировочная зависимость резко отличается от зависимости, приведенной в данной работе, по-видимому, из-за утечки заряда в процессе регистрации в результате применения лавсановой пленки толщиной 0,04 мм.

Следует отметить, что применение диэлектрического датчика для регистрации давления в плоскости, параллельной фронту волны, связано с одноосной деформацией пленки и неизменностью площади электрода датчика. При регистрации давления в расходящихся волнах, а также давления в плоскости, деформирующейся при нагружении, необходим учет изменения как площади электрода, так и толщины диэлектрика (количества диполей в слое, образующем плоский конденсатор). Пример применения диэлектрического датчика для регистрации давления в плоскости, перпендикулярной фронту плоской волны, приведен в [5]. Не представляет затруднений и использование датчика для регистрации давления в плоскости фронта расходящихся цилиндрической или сферической волн, когда деформация в плоскости датчика может быть рассчитана по осциллограмме, записанной датчиком.

Таким образом, на основании выполненных ранее и дополнительных исследований, изложенных в данном сообщении, можно сделать вывод о

применимости диэлектрического датчика для регистрации сложного профиля давления, в том числе в волнах догрузки и разгрузки, при наличии единой тарировочной зависимости, определяемой изменением емкости датчика с давлением.

Поступила 11 VIII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г. В. О методике регистрации упругопластических волн напряжений в твердых телах с помощью диэлектрического датчика.— Проблемы прочности, 1972, № 10.
2. Фот Н. А., Алексеевский В. П., Ярош В. В. Диэлектрический датчик импульсного давления.— Приборы и техника эксперимента, 1973, № 2.
3. Степанов Г. В. Анализ методики измерения давления в интенсивных волнах нагрузки диэлектрическими датчиками.— Проблемы прочности, 1974, № 4.
4. Степанов Г. В., Астанин В. В. Ударное сжатие некоторых конструкционных материалов со скоростью до 1000 м/с.— Проблемы прочности, 1975, № 9.
5. Степанов Г. В., Астанин В. В. Определение сопротивления сдвигу за фронтом плоской ударной волны.— Проблемы прочности, 1976, № 4.
6. Батьков Ю. В., Новиков С. А. и др. Некоторые особенности измерения импульсных давлений с помощью диэлектрического датчика.— ПМТФ, 1981, № 2.
7. Степанов Г. В., Проныкин А. П. Исследование связи электрического сигнала в системе проводник — диэлектрик — проводник с параметрами плоской волны нагрузки.— Проблемы прочности, 1976, № 10.
8. Graham R. A., Ingram G. E. A shock-wave stress gauge utilizing the capacitance change of solid dielectric disc.— In: Behaviour of dense media under high dynamic pressures. Paris — N. Y., 1968.

УДК 621.375.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПОГЛОЩАЮЩЕМ СЛОЕ ВЕЩЕСТВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

А. А. Бакеев, А. П. Соболев, В. И. Яковлев
(Москва)

В настоящее время для сверления и скрайбирования полупроводниковых и диэлектрических материалов используются импульсные лазеры. Если обрабатываемые материалы частично прозрачны для лазерного излучения, то возможны такие режимы обработки, при которых термоупругие напряжения являются определяющими в технологическом процессе. В связи с этим рассмотрение напряжений представляет интерес с прикладной точки зрения. Термоупругие напряжения, возникающие в веществе при облучении его лазерным импульсом, теоретически исследовались в ряде работ [1—5]. В [1, 2] решена несвязанная задача термоупругости для изотропного полупространства, на поверхность которого падает поток лучистой энергии. Громоздкость выражений, описывающих возникающие напряжения, затрудняет использование полученных в [1, 2] решений для практических оценок.

В [3—5] напряжения, возникающие в полупространстве при лазерном нагреве, находились путем численного решения уравнений газовой динамики совместно с обобщенным уравнением состояния. На основании анализа полученных пространственно-временных распределений напряжений в [3, 5] сделан вывод о возможности откольного разрушения вещества (в том числе стекол) со стороны облучаемой поверхности. Этот вывод позднее подтвержден экспериментально [6]. В [7—9] поверхностные разрушения диэлектриков связываются с возникновением термоупругих напряжений.

В данной работе на основе решения несвязанной задачи термоупругости для полупространства определена область изменения безразмерных параметров, характеризующих вещество и лазерное воздействие, в которой возможно существование откольных разрушений со стороны облучаемой поверхности. Очевидно, что при прочих равных условиях величина термоупругих напряжений будет наибольшей, если охлаждением поглощающего слоя вещества за время энерговыделения можно пренебречь.

При высоких значениях плотности потока лазерного излучения, для которых характерны откольные разрушения, роль конвективного теплообмена с облучаемой поверхности пренебрежимо мала. Охлаждение же поглощающего слоя за счет теплопроводности во время действия лазерного импульса τ_n будет мало при выполнении следующего условия: