

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ВЫШЕ ПРЕДЕЛА УПРУГОСТИ

Б. М. ЖИРЯКОВ, В. Г. МАЛИНИН, В. Ф. ОБЕСНЮК

(Москва)

Эпоксидные смолы находят широкое применение в качестве оптических чувствительных датчиков напряжений как при статических, так и при динамических способах нагружения. Их фотоупругие свойства хорошо изучены в области упругого деформирования вплоть до времен нагружения порядка  $10^{-5}$  с [1, 2]. Однако для сжатия выше предела упругости такие экспериментальные данные в литературе практически отсутствуют по причине хрупкого разрушения стекловидных полимеров. В данной работе при нагружении материала импульсами сжатия длительностью около  $10^{-7}$  с удалось провести измерения фотоупругого эффекта в более широкой области давлений.

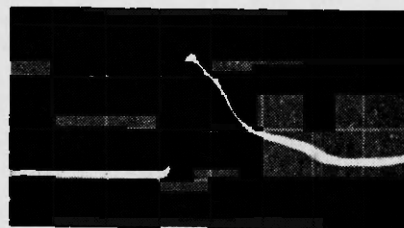
**1. Экспериментальная установка и методика измерений.** Импульсы сжатия создавались с помощью лазера, работающего в режиме модулированной добротности. Длительность лазерного импульса составляла 30 нс на полувывоте. Выходная энергия 0,65 Дж, диаметр пятна фокусировки около 1 мм. Фокусировка производилась на образец из ЭД-6, поверхность которого покрывала медная фольга толщиной 50 мкм. С целью получения достаточно больших давлений сверху на фольгу наносился слой дистиллированной воды толщиной около 1 мм. Амплитуда импульсов давления в полимере составляла при этом величину порядка 1 ГПа при длительности около  $10^{-7}$  с. Профиль импульса сжатия (масштаб временной сетки 50 нс), полученный с помощью тонкого (100 мкм) кварцевого датчика, показан на фиг. 1. Он несколько затянут по сравнению с импульсом излучения. Это связано в основном с многократными отражениями и интерференцией импульса давления в фольге из-за существенного отличия акустических импедансов меди и эпоксидной смолы.

Для наблюдения эффекта фотоупругости в динамике использовалась стандартная методика [1]. Применялся вариант, в котором просвечивающее излучение проходило через образец, помещенный между скрещенными поляризатором и анализатором. Изображение с помощью щелевой разветки во времени фиксировалось на киноплёнку типа КН-4 скоростной камерой СФР-1М. В качестве монохроматического яркого источника света использовался другой рубиновый лазер ( $\lambda = 0,693$  мкм), синхронизированный во времени с действующим лазером и камерой СФР-1М. Работа просвечивающего лазера в режиме гладкого импульса длительностью около 0,8 мс (фиг. 2) обеспечивала необходимую экспозицию фотопленки.

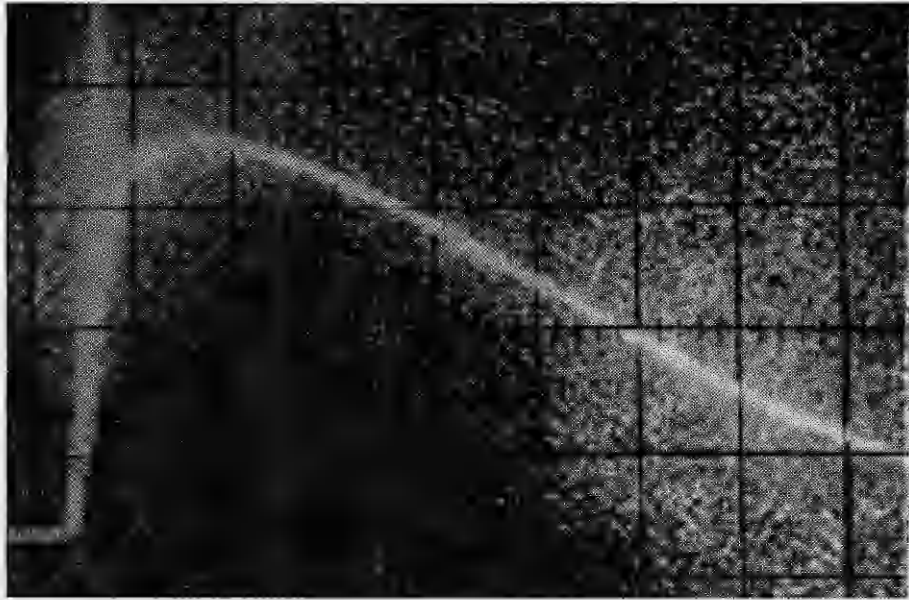
Характерная регистрограмма на эпоксидном образце высотой 15 мм, шириной 30 мм и толщиной просвечивания 1,98 мм приведена на фиг. 3. На регистрограмме отчетливо видны линии (в координатах  $z, t$ ), вдоль которых распространяются продольная и сдвиговая волны. Из-за того что нагружение имеет характер, близкий к точечному, сдвиговая волна является довольно мощной. Линия распространения переднего фронта продольной волны сжатия немного искривлена. Искривление тем больше, чем ближе к поверхности нагружения. Вдали от этой поверхности скорость распространения приближается к скорости звука, которая для контроля измерялась также независимым способом. Такое поведение скорости связано с нелинейными акустическими свойствами эпоксидной смолы. Ее определение позволяет по регистрограмме рассчитать давление на фронте, используя известное соотношение Гюгонно [3]  $\sigma_{zz} = \rho_0 D u$  и линейную связь скорости ударной волны с массовой скоростью  $D = c_0 + B u$ , где  $c_0$  — константа, близкая к скорости звука в эпоксидной смоле;  $u$  — массовая скорость;  $D$  — скорость ударной волны;  $\rho_0$  — плотность перед фронтом волны сжатия;  $\sigma_{zz}$  — давление на фронте волны;  $B$  — константа нелинейности (для эпоксидной смолы  $B = 1,52$  [4]).

**2. Результаты эксперимента и обсуждение.** Зависимость амплитуды давления в ударной волне от пройденного расстояния для регистрограммы фиг. 3 приведена на фиг. 4. Сопоставление давлений и наблюдаемых порядков интерференционных полос позволило построить зависимость, показанную на фиг. 5. Описанная методика не обеспечивала необходимой точности при  $\sigma_{zz} \leq 100$  МПа, поэтому для малых давлений использовалась несколько иная конструкция мишени. Между фольгой и эпоксидной смолой помещался полимерный компаунд с малым модулем сжатия. При давлениях около 100 МПа в компаунде еще заметно превышение скорости ударной волны над скоростью звука, что обеспечивало, в свою очередь, необходимую точность и в области малых давлений. Пример такой регистрограммы приведен на фиг. 6.

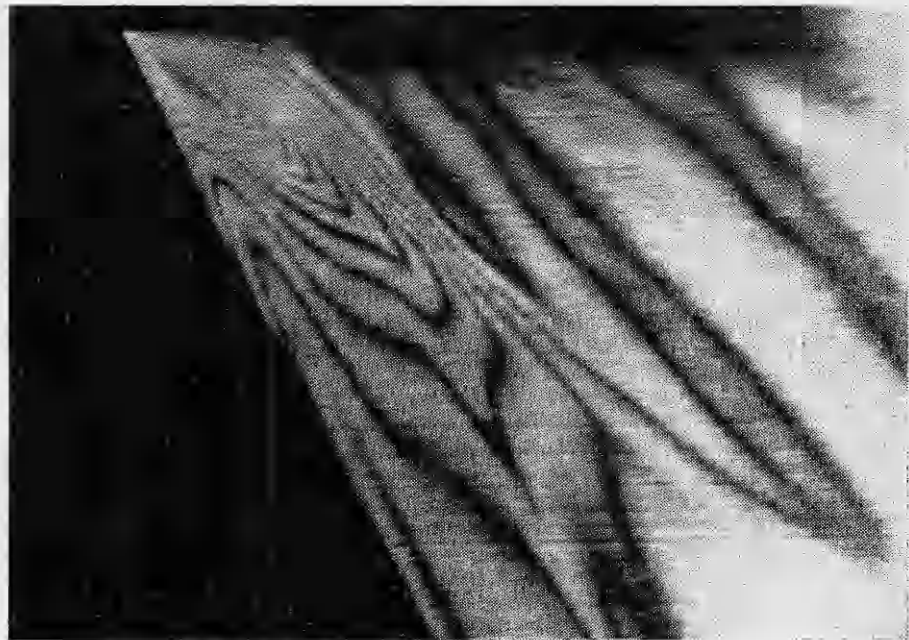
На фиг. 5 видно, что экспериментальная зависимость приближенно аппроксимируется двумя прямыми линиями. Константа фотоупругости, определяемая как



Фиг. 1



Фиг. 2



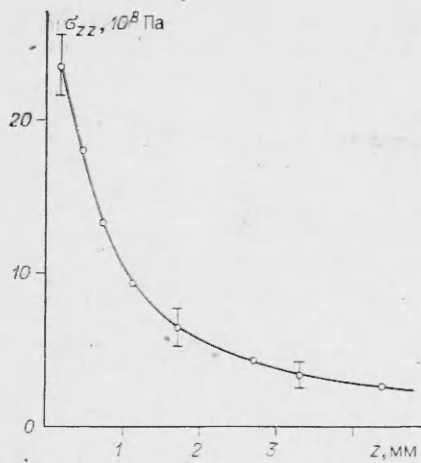
Фиг. 3

$$(1) \quad \sigma^{0,1} = d\delta\sigma_{zz}/\delta m,$$

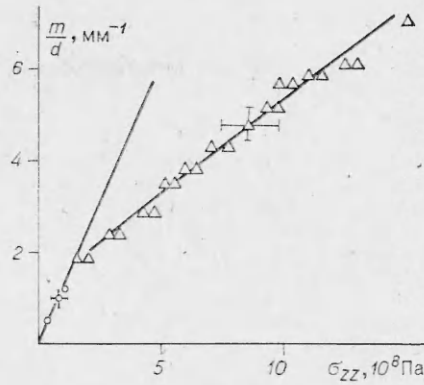
заметно изменяется в области около 150 МПа от значения 80 кПа·м до значения 230 кПа·м. В формуле (1)  $d$  — эффективный рабочий размер вдоль направления просвечивания;  $m$  — порядок полосы фотоупругости;  $\delta$  — малое приращение.

Обе величины заметно отличаются от статической константы фотоупругости, которая была нами измерена по стандартной методике на диске и балке [1], составила  $\sigma_0^{0,1} = 24$  кПа·м. В области до 150 МПа сравнение статической и динамической констант выполнялось с учетом различий одноосно-напряженного состояния в статике и одноосно-деформированного — в динамике. В последнем случае при упругом деформировании все главные напряжения являются ненулевыми [3]:

$$(2) \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = [\nu/(1 - \nu)]\sigma_{zz},$$



Фиг. 4

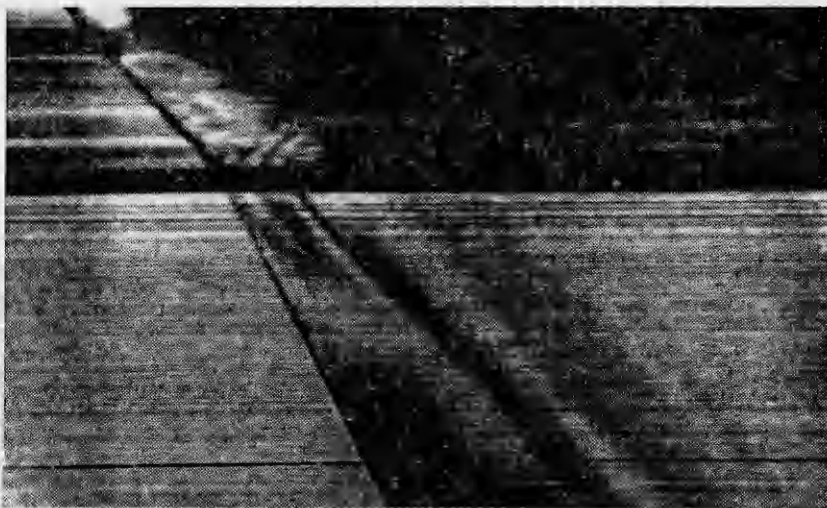


Фиг. 5

$\nu$  — динамический коэффициент Пуассона. В результате оптический эффект, пропорциональный разности главных напряжений, оказывается меньше в  $(1 - \nu)/(1 - 2\nu)$  раз. Тогда  $(1 - \nu)/(1 - 2\nu)\sigma_0^{0,1} \approx 60$  кПа·м, что довольно близко к экспериментальному значению динамической константы при малых давлениях.

Резкое изменение оптических свойств вблизи 150 МПа естественно связать с превышением динамического предела упругости смолы ЭД-6. Если это так, то, исходя из эксперимента, необходимо признать, что с ростом амплитуды  $\sigma_{zz}$  динамический предел  $Y$  приблизительно линейно растет по крайней мере до  $\sigma_{zz} \approx 1,5$  ГПа, так как с увеличением амплитуды наблюдается рост оптического эффекта, пропорционального разности главных напряжений [1]. Как и при упругопластическом деформировании, согласно условию Мизеса — Треска  $(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) = Y$  выше предела упругости, из формулы (2) и фиг. 5 можно определить  $\delta Y / \delta \sigma_{zz} \approx 0,16$ . Такая оценка хорошо согласуется по величине с экспериментально наблюдавшимся увеличением предела упругости на сдвиг для других стекловидных полимеров [5] при гидростатическом сжатии.

Однако остаточные деформации образцов в наших экспериментах были минимальны. При наблюдении в скрещенных поляризаторах однократно нагруженного образца никаких видимых изменений не было, поэтому можно утверждать, что уровень остаточных напряжений не превышал 30 МПа (что соответствует примерно четверти половины). При более чем десятикратном воздействии такие изменения накапливались и были заметны. Они концентрировались вблизи поверхности в зоне с размером около 1 мм. Отмеченное поведение является веским доводом к тому, что в нашем эксперименте наблюдалось явление вынужденной эластичности эпоксиной смолы при сжатии выше предела упругости, т. е. была возможна почти полная деформационная обратимость. Однако современный взгляд на вынужденную эластичность (см. [6]) сам по себе не описы-



Фиг. 6

вает поведения оптических свойств, показанных на фиг. 5. По этой причине нельзя обойтись без привлечения представлений о пределе упругости смолы при давлениях в импульсе  $\sim 1$  ГПа.

Другим интересным фактом оказалось увеличение при высокоскоростной деформации ( $10^6$ — $10^7$  с $^{-1}$ ) предельной прочности на сжатие примерно на порядок. Общеизвестно мнение, что для стеклообразных полимеров (например, ПММА, полистирол) увеличение скорости нагружения приводит к тому, что практически сразу после превышения предела упругости ( $\sim 100$  МПа) вместе с началом пластических деформаций развивается система трещин, т. е. наблюдается хрупкое разрушение [1, 7, 8]. В нашем случае это не происходило. Следует отметить, что контрольные эксперименты проводились также с полиметилметакрилатом.

Таким образом, экспериментально показано, что результаты определения фотоупругих свойств стеклообразных полимеров при упругоупругом деформировании могут быть использованы для изучения физики высокоскоростного деформирования материалов, а также для применения эпоксидных смол в качестве датчиков давления.

Метод фотоупругости является, по-видимому, единственным, обладающим хорошей чувствительностью и позволяющим непосредственно получать информацию о разности главных напряжений при ударном сжатии. Более грубые методы [9] отмеченного выше перегиба в зависимости не обнаружили.

Авторы хорошо понимают, что выполненная работа в большей мере ставит вопросы, чем дает ответы. Поэтому они будут заранее благодарны за любые обсуждения изложенных результатов с заинтересованными исследователями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.
2. Метод фотоупругости. Т. 1, 2/Под ред. Н. А. Стрельчука, Г. Л. Хесина. М.: Стройиздат, 1975.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
4. Мак-Куин Р., Марш С. и др. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследования ударных волн.— В кн.: Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973.
5. Silano A. A., Pae K. D., Sauer J. A. Effects of hydrostatic pressure on shear deformation of polymers.— J. Appl. Phys., 1977, vol. 48, N10.
6. Аскадский А. А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973.
7. Ramsteiner F. Einfluß von Verarbeitungs- und Produktparametern auf die Schlagzähigkeit von Styrol-Polymerisaten.— Kunststoffe, 1977, Bd 67, N 9.
8. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: ИЛ, 1955.
9. Chartagnac P. F. Determination of mean and deviatoric stress in shock loaded solids.— J. Appl. Phys., 1982, vol. 53, N 2.

Поступила 22/IX 1983 г.

УДК 539.3

#### АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ИДЕАЛЬНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЛА ПРИ УСЛОВИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ТРЕСКА

Г. И. БЫКОВЦЕВ, А. В. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, П. Н. СЫГУРОВ

(Куйбышев)

Автомодельные решения уравнений динамики идеального упругоупругого тела при условии пластичности Мизеса рассматривались в [1—4], где решения краевых задач сводятся к решению двухточечных задач нелинейных дифференциальных уравнений с особыми точками. Ниже показывается, что при условии пластичности Треска эти уравнения интегрируются в квадратурах, что позволяет достигнуть значительных упрощений.

1. Уравнения, описывающие поведения тела Прандтля — Рейсса, имеют вид

$$(1.1) \quad e_{ij} = e_{ij}^p + e_{ij}^e, \quad e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \sigma_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}^e$$

$$(1.2) \quad \sigma_{i,j,j} - \rho \dot{v}_i = 0, \quad v_i = \dot{u}_i,$$

где  $u_i$  — перемещение; точка обозначает дифференцирование по времени.