

6. Ляхов Г. М., Охитин В. Н. Сферические волны в многокомпонентных средах.— ПМТФ, 1974, № 2.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
8. Кривцов В. А. Уравнение состояния водонасыщенного песка и границы его применимости.— ПМТФ, 1974, № 4.
9. Буткович Т. Р. Влияние воды в горных породах на эффекты подземных ядерных взрывов.— В кн.: Подводные и подземные взрывы. М., «Мир», 1974.
10. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений.— В сб. Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967.
11. Белинский И. В., Христофоров Б. Д. О диссипации энергии при подземном взрыве.— В сб. Взрывное дело, 76/33, 1976.
12. Кошелев Э. А. Тепловое поле подземного взрыва.— В сб. Использование взрывов в народном хозяйстве, 4.3. Киев, 1970.

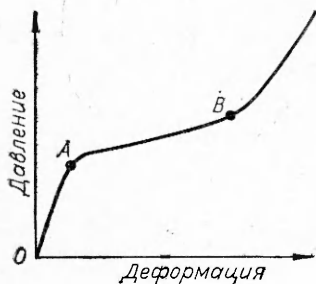
УДК 678.632+620.178.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПЕНОПОЛИСТИРОЛЕ

*С. И. Бодренко, Ю. А. Крысанов, С. А. Новиков*  
(Москва)

При ударном сжатии пенополистирола в области давления меньше 1 ГПа нельзя принимать обычную схему ударного сжатия пористых веществ, предполагающую, что до величины плотности, соответствующей плотности сплошного материала (для полистирола эта плотность равна  $1046 \text{ кг/м}^3$ ), сжатие происходит без сопротивления. Типичная диаграмма ударного сжатия пенополистирола [1, 2] по форме соответствует диаграмме, получаемой при квазистатическом сжатии, приведенной на фиг. 1. Участок упругой деформации *OA* характеризуется линейной зависимостью давления от деформации, небольшой участок резкого изгиба диаграммы в районе точки *A* соответствует пределу текучести. Участок *AB* слабой зависимости давления от деформации соответствует пластической деформации с некоторым упрочнением. При дальнейшей деформации наблюдается резкое возрастание давления при сжатии до плотности, близкой к плотности сплошного материала.

Следовательно, ударное сжатие пенополистирола должно сопровождаться распространением по образцу системы двух волн сжатия: первой ударной волны (УВ) с постоянными для данной плотности образца давлением и скоростью и следующей за ней волны пластического сжатия с параметрами, меняющимися во времени. Обычно скорость ударной волны принимается равной скорости распространения продольных колебаний, определяемой ультразвуковым методом [1, 2]. В литературе отсутствуют прямые измерения давления в УВ в пенополистироле, а измерения предела текучести при динамическом сжатии без учета волнового характера деформации дают противоречивые результаты. Так, в [1—3] утверждается, что динамический предел текучести возрастает более чем в 1,5 раза по сравнению со



Фиг. 1

статическим пределом текучести, а в [4, 5] показано практически полное отсутствие динамического упрочнения. Аналогичные противоречия можно обнаружить и в данных по пенополиуретану, по механическим свойствам близкому к пенополистиролу.

В настоящей работе излагаются результаты прямых исследований структуры и параметров ударной волны сжатия (давление, волновая и массовая скорость) при ударном нагружении пенополистирола.

Исследование проведено на образцах из пенополистирола марки ПС-1 (ППС). С целью снижения неоднородности плотности образцов каждый из них набирался из дисков диаметром 180 мм и толщиной 10 мм, отличающихся от номинальной плотности образца не более чем на  $10 \text{ кг/м}^3$ . Номинальная плотность исследуемых образцов находилась в диапазоне  $100 \dots 580 \text{ кг/м}^3$ .

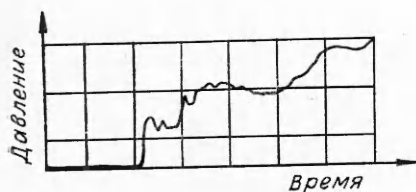
Образец размещался на массивном стальном основании. Ударное нагружение осуществлялось стальной пластиной — ударником, разгоняемой взрывом заряда ВВ. Начальная скорость ударника варьировалась в пределах  $40 \dots 90 \text{ м/с}$ . Стальной ударник и основание рассматривались как жесткие тела, поскольку акустическая жесткость стали более чем на порядок превышает акустическую жесткость полистирола.

В качестве измерителя давления и отметчика времени прихода ударной волны использовался пьезокварцевый датчик давления диаметром 12 мм и высотой 3,2 мм. Погрешность определения величины давления не превышает 15%, завал фронта прямоугольного импульса не превышает 1 мкс [6]. Датчики давления размещались в образце на различных расстояниях от нагружаемой поверхности, что позволило проследить за изменениями параметров ударной волны при ее движении по образцу. Типичная осциллограмма сигнала датчика давления приведена на фиг. 2. Время прихода и давление в ударной волне определялись по схеме фиг. 3, использованной, в частности, в [7]. Индекс 1 на фиг. 3 относится к первой ударной волне, 2 и т. д. — ко второй и последующим волнам сжатия.

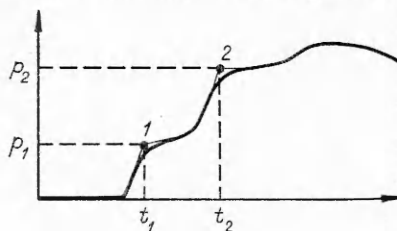
Скорость свободной поверхности образца определялась в специальных опытах методом емкостного датчика [8]. Для проведения этих измерений на поверхность образца напыляли тонкий слой меди. Массовая скорость в первой УВ принималась равной половине скорости свободной поверхности.

Изучение структуры ударной волны показало наличие в ППС двух стационарных ударных волн, за которыми следует волна пластического сжатия (см. фиг. 2). При движении ударных волн по образцу их амплитуда и волновая скорость остаются неизменными и зависят только от относительной плотности ППС, определяемой как отношение плотности образца ППС к плотности полистирола.

Результаты измерений приведены в таблице, где  $\rho$  — плотность ППС;  $c$  — скорость распространения продольных УЗ колебаний;  $U_1, U_2$  — волновая скорость первой и второй УВ соответственно;  $p_1, p_2$  — давление в первой и второй УВ соответственно;  $u_1$  — массовая скорость в первой УВ.



Фиг. 2



Фиг. 3

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , м/с	$U_1$ , м/с	$p_1$ , МПа	$u_1$ , м/с	$U_2$ , м/с	$p_2$ , МПа
100	1030					
100		460—610				
110	1240—1250					
130		560	1,3		180	2,7
130		600	1,6		190	2,7
140		610	1,9			
140		620				
150		570	2,3			
160		620	2,9		280	3,3
200	1240					
210		650				
280	1430—1470					
290		710				
300				32—35		
310	1380					
340		820	8,8		370	12,7
340		840	9,0			
340		830	8,6			
350		820	8,4		400	15,7
380	1525—1540					
390	1410					
400				32—41		
550		1020	22,0			
550		860	20,4		630	32,4
560		1020	21,4			
560		870	22,8		660	35,3
580		900	21,2			
580	1640—1670					

Анализ результатов показал, что зависимость параметров первой и второй ударной волны и скорости звука в ППС от его относительной плотности наилучшим образом описывается степенными функциями.

Скорость распространения продольных УЗ колебаний  $c$  описывается соотношением

$$c = Ad^k,$$

где  $d$  — относительная плотность ( $d = \rho/\rho_0$ );  $A = 1850 \pm 40$  м/с;  $k = 0,20 \pm 0,02$ . Здесь и далее параметры зависимости оценены методом наименьших квадратов, в качестве величины ошибки приведена оценка стандартного отклонения. Предельное значение  $c = A$  при  $d = 1$  хорошо согласуется со значением скорости распространения

продольных колебаний в стержне полистирола 1880 м/с [9]. Следует, однако, осторожно подходить к интерпретации функции  $d^k$  как к возрастанию пути распространения УЗ колебаний вследствие увеличения пористости образца, так как заметное влияние на скорость распространения звука (как и на многие другие механические параметры) может оказывать хорошо известное явление пластификации полистирола продуктами разложения порообразователя [10].

Зависимость для скорости распространения первой УВ имеет вид

$$U_1 = Bd^l,$$

где  $B = 1170 \pm 50$  м/с;  $l = 0,34 \pm 0,02$ .

Предельное значение  $U_1 = B$  при  $d = 1$  хорошо согласуется со значением скорости распространения сдвиговых УЗ колебаний в полистироле  $1143 \pm 11$  м/с [11], и можно предположить, что в первой УВ деформация стенок ячеек в ППС носит изгибный характер. Подобный характер деформации обнаружен при исследовании статическими методами ППС с содержанием полимера  $\leq 20\%$  [12].

Как видно из приведенных соотношений, при изменении относительной плотности ППС в диапазоне 0,11... 0,56 скорость первой УВ в 1,5—2 раза меньше скорости распространения продольных УЗ колебаний.

Давление в первой УВ описывается соотношением

$$p_1 = Ed^m,$$

где  $E = 69,0 \pm 2,6$  МПа;  $m = 1,82 \pm 0,03$ .

Здесь также следует учесть, что функция  $d^m$  описывает не только изменение эффективного сечения полимера при изменении плотности, но и

уменьшение прочности полимера из-за пластифицирующего действия продуктов разложения порообразователя.

Давление в первой УВ хорошо согласуется с результатами измерения квазистатического предела текучести ППС [13—17] по стандартной методике [10] (фиг. 4, точки 1).

Можно заметить, что возрастание динамического предела текучести, обнаруженное в [1, 2], целиком объясняется использованием авторами этих работ в качестве скорости первой УВ значений скорости продольных УЗ колебаний.

Значения массовой скорости, полученные по скорости свободной поверхности, прекрасно согласуются со значениями, оцененными по параметрам первой УВ  $u_1 = p_1/\rho U_1$  и с данными [2], полученными по магнитоэлектрической методике.

Неожиданным явилось наличие в ППС второй стационарной УВ при больших скоростях ударника. Скорость второй УВ зависит от относительной плотности ППС по линейному закону и стремится к значению скорости поперечных колебаний при  $d \rightarrow 1$ . Давление во второй УВ зависит от  $d$  по параболическому закону и практически совпадает с полученной авторами зависимостью квазистатического предела текучести ППС  $p_{20}$  при одноосной деформации, описываемой соотношением

$$p_{20} = Fd^n,$$

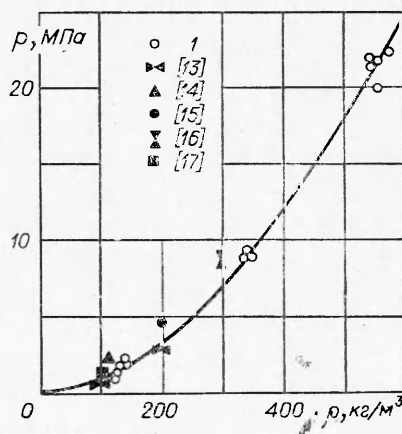
где  $F = 116,1 \pm 3,3$  МПа;  $n = 1,98 \pm 0,03$ .

Наличие двух стационарных ударных волн означает одновременное существование двух пределов текучести в ППС, известных ранее по различным условиям сжатия — при сложном деформируемом состоянии и при одномерной деформации.

Аналогичная сложная структура ударной волны с двумя стационарными ударными волнами и волной пластического сжатия в спеченной меди обнаружена в работе [18], анализ результатов которой показывает, что скорость второй УВ в спеченной меди, как и в ППС, описывается линейной функцией относительной плотности и при  $d \rightarrow 1$  скорость второй УВ стремится к скорости распространения сдвиговых колебаний в меди.

Указанный выше характер зависимости давления и волновой скорости во второй УВ от относительной плотности ППС приводит к тому, что массовая скорость во второй УВ, определяемая по соотношению  $u_2 = p_2/\rho U_2$ , оказывается не зависящей от относительной плотности и равной примерно 90 м/с.

Следует отметить, что надежная регистрация второй УВ в ППС возможна лишь при больших толщинах образцов и сравнительно небольших (порядка 90 м/с) скоростях ударника. В условиях проведения экспериментов [2] при скоростях удара 150... 800 м/с и толщинах образцов 0,6...1,2 см практически невозможно разрешение второй УВ и следующей за ней волны сжатия.



Фиг. 4

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Б. А. Метод построения диаграммы ударного сжатия пенопласта.— «Механика полимеров», 1973, № 3.
2. Абашкин Б. И., Забиров И. Х., Русин В. Г. Динамическая сжимаемость пенополистирола.— «Механика полимеров», 1977, № 1.
3. Hoge K. G., Wasley B. J. Dynamic compressive behaviour varies forms materials.— «Applied Polymer Symposium», 1969, N 12.
4. Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Исследование динамического сжатия пенополистирола.— «Проблемы прочности», 1977, № 8.
5. Melvin J. W., Roberts V. L. Compression of cellular plastics at high strain rates.— «J. Cellular Plastics», 1974, March—April, p. 97—100.
6. Бодренко С. И., Гердюков Н. Н., Новиков С. А., Русак В. Н., Чиждова В. Д. Пьезоэлектрический датчик для измерения параметров ударной волны в диапазоне давлений ниже 500МПа.— В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., 1976.
7. Voade V. R. Principal Hugoniot, second-shock Hugoniot and release behaviour of pressed copper powder.— «J. Appl. Phys.», 1970, vol. 41, N 11.
8. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности.— «Приборы и техника эксперимента», 1963, N 1.
9. Багреев В. В., Зарудный Е. Ф. Некоторые вопросы определения механических свойств пористых материалов динамическим методом.— В кн.: Исследования в области транспортной и строительной механики. М., «Транспорт», 1970.
10. Романенко И. Г. Физико-механические свойства пенистых пластмасс. М., Стандартгиз, 1970.
11. Lamberson D. L., Asay J. R., Guenther A. H. Equation of state of polystyrene and polymethylmethacrylate from ultrasonic measurements at moderate pressure.— «J. Appl. Phys.», 1972, vol. 43, N 30.
12. Дементьев А. Г., Тараканов О. Г. Термомеханические исследования легких пенопластов. ВИНТИ № 2259—70 деп.
13. Моисеев А. А., Дурасова Т. Ф. Технология получения и физико-механические свойства пенополистирола.— «Хим. промышленность», 1957, № 3.
14. Берлин А. А. Основы производства газонаполненных пластмасс и эластомеров. М., Госхимиздат, 1954.
15. Бородин М. Я. и др. Пенопластмассы. М., Филиал ВИНТИ, 1959.
16. Павлов В. В. Технология и свойства антенных обтекателей из пенополистирола.— В кн.: Пенопластмассы. М., Оборонгиз, 1969.
17. Панферов К. В., Колпаков С. В. Механические свойства пенопластов с учетом фактора времени.— «Труды ЦКНИИ стройконструкции», 1962, вып. 11.
18. Voade V. R. Compression of porous copper by shock waves.— «J. Appl. Phys.», 1968, vol. 39, N 12.

УДК 620.171,5 : 772.99

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*В. П. Щепинов, В. В. Яковлев*

(Москва)

Голографическая интерферометрия — высокочувствительный бесконтактный метод — позволяет исследовать характер развития деформации поверхности реальных деталей и конструкций, что очень важно для оценки их работоспособности. Путем сравнения двух состояний поверхности на различных этапах нагружения методом двойной экспозиции определяется в общем случае приращение упругопластической деформации, а при сравнении поверхности в исходном состоянии с ее состоянием после нагрузки и полной разгрузки измеряется остаточная деформация.