

- при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1983.— № 1.
8. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение разномасштабных цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1986.— № 4.
 9. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Динамическая прочность оболочек из стеклопластика // *Механика композит. материалов.*— 1989.— № 3.
 10. Цыпкин В. И., Русак В. И., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1987.— № 5.
 11. Цыпкин В. И., Русак В. И., Иванов А. Г. Высокоскоростное растяжение тканей из неорганического волокна // *Механика композит. материалов.*— 1986.— № 1.
 12. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Сырунин М. А. и др. Поведение композитных оболочек с высокоэластичным связующим при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1988.— № 2.
 13. Сырунин М. А., Федоренко А. Г. Динамическая прочность комбинированных композитных материалов // I Всесоюз. совещ. «Динамические материалы в экстремальных условиях», Суздаль, янв. 1990: Докл.— М.: ГИИТ АН СССР, 1990.— Т. 2.
 14. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Шитов А. Т. Прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика различной структуры при нагружении взрывом // *ФГБ.*— 1989.— № 4.
 15. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Влияние структуры армирования ориентированных стеклопластиков на прочность круговых цилиндрических оболочек при взрывном нагружении изнутри // *Механика композит. материалов.*— 1991.— № 4.
 16. Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. Влияние структуры армирования на предельную деформируемость и прочность оболочек из ориентированного стеклопластика при взрывном нагружении изнутри // *ПМТФ.*— 1992.— № 4.
 17. Воронцова О. С., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. и др. Экспериментальное исследование коэффициентов вариации прочностных характеристик стеклопластиковых цилиндрических оболочек при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1987.— № 4.

г. Арзамас

Поступила 21/1 1992 г.

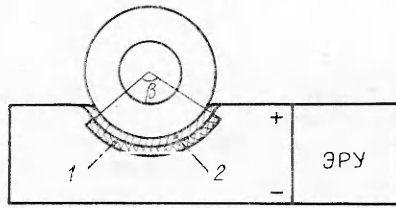
УДК 532.598 : 678.01

А. В. Острик, В. П. Петровский

ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Полимерные материалы широко используются в различных областях техники. В процессе эксплуатации элементы конструкций из высоконаполненных резиноподобных материалов работают в самых разнообразных режимах, допускающих деформирование деталей в широком диапазоне скоростей, включая и область скоростей, характерных для ударно-волнового нагружения.

Влияние скорости деформирования на прочностные свойства полимерного материала, состоящего в основном из целлюлозы, описаны в [1]. Особенности поведения наполненных эластомеров на примере резины при интенсивных импульсных воздействиях рассмотрены в [2]. В [3] исследованы условия откольного разрушения смесового топлива на основе полиуретанового каучука. В [2, 3] изучены откольные явления, обусловленные отражением волн напряжений от плоских границ, причем в основном рассмотрены разрушения, связанные с растягивающими напряжениями, возникающими либо при отражении одного фронта волны, либо в результате взаимодействия двух и более отраженных фронтов волн. В то же время практически отсутствуют работы по изучению разрушения эластомеров, связанных с интерференцией волн напряжений, происходящей в результате отражения от искривленной поверхности. Представляет практический интерес вопрос, в какой мере специфика свойств



Р и с. 1

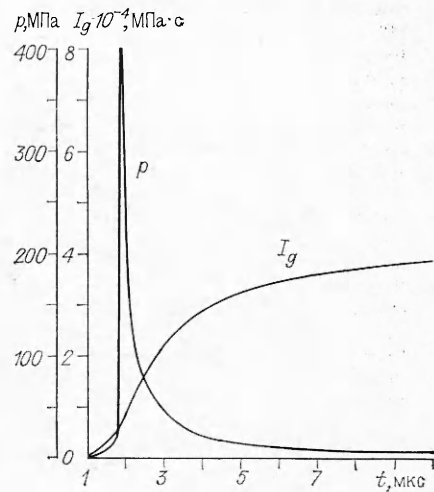
высоконаполненных эластомеров, а также геометрические особенности конструкций повлияют на характер откольных разрушений при интенсивных импульсных нагрузках.

В опытах использовались образцы с наружным диаметром 4 см и длиной 6 см. Размеры и форма внутреннего канала варьировались. Измеренная плотность составляла 1,8 г/см³, скорость звука при атмосферном давлении 1,7 км/с. Испытания эластомеров на одноосное растяжение при скоростях деформирования в диапазоне от 10⁻⁶ до 10³ с⁻¹, проведенные на базе испытательного комплекса института механики МГУ [4], показали существенную зависимость деформационных свойств испытываемого эластомера от скорости деформирования. Если при статических скоростях деформирования $\epsilon = 10^{-6} - 10^1$ с⁻¹ эластомер ведет себя как типичный вязкоупругий материал с максимальным напряжением на разрыв до 5 МПа, то в области скоростей деформирования $10^3 > \epsilon > 10^2$ с⁻¹ проявляется эффект динамического стеклования и образцы разрушаются упруго при напряжениях 30–50 МПа.

Ударные волны в цилиндрических конструкциях создавались электрическим взрывом фольги в непосредственном контакте с поверхностью нагружения. Подрыв фольги осуществлялся с помощью специальной электроразрядной установки (ЭРУ). Схема проведения опытов показана на рис. 1. Используемая ЭРУ имела следующие параметры: емкость конденсаторных батарей $C = 18$ мкФ, максимальное напряжение, подводимое к фольге, $U = 35$ кВ, запасенная энергия $E = 11$ кДж. Необходимая интенсивность импульсного воздействия обеспечивалась соответствующим выбором подводимого напряжения подпиральной пластины 1 и параметров фольги 2 (материал, толщина, площадь). Размеры области нагружения при неизменной ширине фольги определялись углом β . Основная часть опытов была выполнена с алюминиевой фольгой марки А5 толщиной 20 мкм, шириной 2 см и общей площадью 15 см² при $U = 20$ кВ.

Эксперименты, включающие подрыв фольги, сопровождаются существенными электрическими помехами и измерение параметров волнового процесса традиционными методами (электромагнитным и пьезоэлектрическим) затруднено. Поэтому для получения количественной информации о параметрах создаваемой нагрузки проводились специальные эксперименты и численные расчеты. В результате предварительных экспериментов были определены методом мерных пластин величины удельных импульсов давления в зависимости от условий подрыва фольги. Метод мерных пластин заключается в следующем. Тонкая пластина известной массы, расположенная в непосредственном контакте с фольгой, разгоняется с помощью взрыва последней. Полет пластины фиксируется высокоскоростной камерой ЖЛВ-2. На основании покадровой развертки определяется средняя скорость полета пластины, а затем рассчитывается удельный импульс давления по соотношению

$$I_g = P v / g S,$$



Р и с. 2

Условия подрыва фольги	Напряжение ЭРУ, кВ	
	20	25
	I_g , МПа·с	
Без подпирющей пластины	0,00008	0,00012
Подпор — полиэтиленовая пленка $\delta = 220$ мкм	0,00034	0,0005
Подпор — оргстекло $\delta = 1000$ мкм	0,00062	0,0015

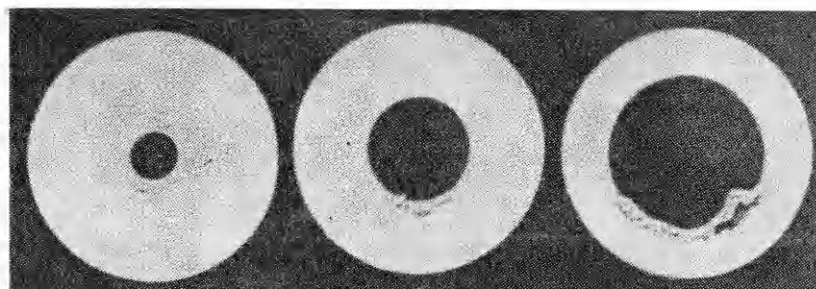
где P — вес пластины; v — средняя скорость; g — ускорение свободного падения; S — площадь. Результаты измерения удельных импульсов давления I_g в зависимости от условий подрыва фольги представлены в таблице.

Полученные по методике [5] результаты численных расчетов профилей и импульсов давления на поверхности образцов при электрическом взрыве фольги (ЭВФ) для условий, аналогичных эксперименту, представлены на рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что по величине I_g отличие составляет не более 15 %.

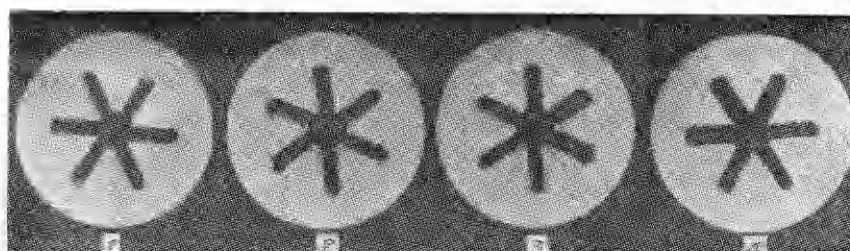
Приведенные на рис. 3 сечения цилиндрических образцов после воздействия нагрузкой с $I_g = 0,00034$ МПа·с и профилем давления на рис. 2 качественно показывают влияние несимметричности нагрузки, геометрии и свойств образцов на характер и фактические размеры разрушений. Видно, что разрушение образцов с цилиндрическими каналами имеет характерную серповидную форму. При этом фактический объем поврежденного материала падает с уменьшением диаметра внутреннего канала. Подобные особенности откольного разрушения цилиндрических образцов связаны, по-видимому, как с затуханием так и с геометрической кумуляцией волн напряжений, амплитуда которых возрастает как $r^{-1/2}$ [6].

Качественно другая картина разрушений получается в случае образцов со звездообразными формами внутренних каналов (рис. 4). Угол нагрузки β (см. рис. 1) в этих опытах составлял 30, 60, 90 и 120° (снимки 1—4). Видно, что наряду с характерными зонами вблизи свободной поверхности проявляются особенности разрушений, связанные с развитием трещин между лучами. Наличие лучей и их ориентация по отношению к центру нагрузки существенным образом влияют на характер разрушений. В отличие от случая цилиндрического канала основная доля энергии волн разрежения концентрируется в области между лучами звезды даже тогда, когда область расположена не непосредственно под центром нагрузки. Концентрация энергии в межлучевом пространстве обусловлена интерференцией волн, отраженных от боковых сторон лучей и внутренней части канала.

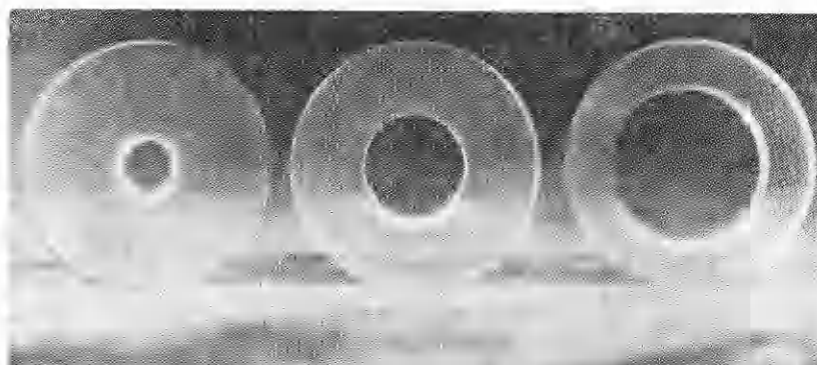
Для сравнения полученных результатов и установления некоторых количественных условий откола эластомера была проведена серия экспериментов с геометрически подобными цилиндрическими образцами из плексигласа. На сегодняшний день этот материал является наиболее



Р и с. 3



Р и с. 4



Р и с. 5

изученным и обладает хорошей прозрачностью, что делает его особо удобным в экспериментах.

Фотографии сечений образцов после испытаний нагрузкой с $I_g = 0,00034$ МПа·с и профилем давления (см. рис. 2) представлены на рис. 5. Характер разрушения по форме и объему близок к отколу, полученному на образцах из эластомера. Поскольку образцы из плексигласа в соответствии с результатами [7, 8] при $\dot{\epsilon} = 10^4 - 10^5$ начинают разрушаться при 100–110 МПа, а при 170 МПа наступает разрушение с отделением откольного слоя, то допустимо предположить, что в рассматриваемом диапазоне скоростей деформирования образцы эластомера разрушаются при условиях, близких к условиям разрушения плексигласа. Этот вывод в некотором смысле подтверждается результатами [2], где показано, что коэффициент Пуассона резины по мере роста давления ударного сжатия уменьшается от типичного для эластомеров 0,5 до 0,36, характерного для твердых тел. Под влиянием высокого давления в условиях ударно-волнового деформирования происходит динамическое стеклование эластомера, в результате которого возрастают механические характеристики, и он по своим свойствам становится близким к плексигласу.

Таким образом, результаты исследования волновых разрушений в цилиндрических полимерных конструкциях с круглыми и шестилучевым звездообразным каналами показывают, что имеют место два основных вида повреждений: серпообразный при отражении от цилиндрической поверхности канала и в виде радиальных трещин между лучами звезды. При этом форма и характерные размеры откольных разрушений образцов из эластомера и плексигласа оказываются подобными и происходят при близких параметрах импульсных воздействий.

Авторы выражают благодарность Г. С. Романову и А. С. Сметанникову за предоставленные численные расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зезин Ю. П., Козырев Ю. И., Малинин Н. И. Влияние скорости деформирования на механические свойства полимерных материалов на основе целлюлозы // МКМ.— 1983.— № 6.
2. Калмыков Ю. Б., Канель Г. И., Пархоменко И. П. и др. Поведение резины в ударных волнах и волнах разрежения // ПМТФ.— 1990.— № 1.
3. Murri W. J., Curran D. R., Seaman L. Fracture model for energy propellant // Shock Waves in Condensed Matter — 1981.— N. Y.: AIP, 1982.
4. Зезин Ю. П., Козырев Ю. И., Малинин Н. И. и др. Испытательные машины для испытания полимерных материалов, созданные в отделе пластичности НИИ механики МГУ // Всесоюз. науч.-техн. симпоз. «Методы и техника экспериментального исследования механических свойств пластмасс».— М., 1976.
5. Романов Г. С., Сметанников А. С. Моделирование плоского сильноточного разряда. Расчет динамики разряда в МГД-приближении // ТВТ.— 1990.— Т. 28, № 2.
6. Зельдович Я. Б. Цилиндрические автомоделные акустические волны // ЖЭТФ.— 1957.— Т. 33, вып. 3(9).
7. Свиридов В. А., Глушак Б. Л., Новиков С. А. и др. Особенности поведения полиметилметакрилата при импульсных нагрузках // ЖТФ.— 1983.— Т. 53, вып. 5.
8. Рыбаков А. П. Исследование откольного разрушения конденсированных тел // ПМТФ.— 1981.— № 5.

г. Сергиев Посад

Поступила 13/XI 1990 г.,
в окончательном варианте — 17/XII 1991 г.

УДК 539.37

А. П. Бобряков, А. Ф. Ревуженко

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ В ДЕФОРМИРУЕМОЙ ОБЛАСТИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

В механике всегда был большой интерес к процессам, в которых так или иначе возникают структуры. Классические примеры таких процессов — формирование ячеек Бенара при конвективном всплывании слоя жидкости, вихрей Тейлора в сдвиговых течениях между коаксиальными цилиндрами, образование регулярной системы вихрей в стратифицированном сдвиговом течении (неустойчивость Кельвина — Гельмгольца) и др. [1]. Механика горных пород и сыпучих сред также дает много интересных подобных примеров. Наверное, все наблюдали системы полигональных трещин, образующихся при высыхании земли после дождя. Здесь может формироваться иерархия структур, когда образуются большие блоки с одним масштабом, затем они делятся на блоки с меньшим масштабом и т. д. Для горных пород такая ситуация типична [2].

Регулярные структуры могут возникать и в сыпучей среде. Возьмем самую простую ситуацию — однородный сдвиг образца сыпучего материала. Фактически речь идет о течении Куэтта между параллельными пластинами. Его можно реализовать на специальном приборе однородного сдвига (необходимость в этом связана с тем, что в отличие от вязких жидкостей для сыпучих материалов условия прилипания на границе нет). При малых сдвигах течение носит плоскопараллельный характер, а затем в материале формируется пространственная и довольно упорядоченная структура. Весь материал разбивается на отдельные ячейки, и сдвиг локализуется на их границах [3].

В зависимости от свойств среды и условий нагружения структура может носить пространственный, временной или смешанный характер. Вообще все процессы течения жидкостей и других более сложных сред (для краткости сюда включим и процессы деформирования твердых тел) можно разбить на три больших класса: 1) процессы, в которых формирования структур не происходит; 2) процессы с образованием структур;