

Ю. Б. Калмыков, Г. И. Канель, И. П. Пархоменко,  
А. В. Уткин, В. Е. Фортвов

## ПОВЕДЕНИЕ РЕЗИНЫ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ И ВОЛНАХ РАЗРЕЖЕНИЯ

В литературе отсутствуют сведения о свойствах наполненных эластомеров в условиях ударно-волнового нагружения. Между тем резиноподобные материалы используются для демпфирования импульсов ударного сжатия и решения других практических задач. Поведение таких материалов в нормальных условиях характеризуется рядом специфических особенностей [1, 2]; представляет интерес вопрос о том, в какой мере специфика наполненных эластомеров проявляется при интенсивных импульсных воздействиях.

В данной работе приведены результаты регистрации ударного сжатия, разгрузки и динамического растяжения белой вакуумной резины марки 7889.

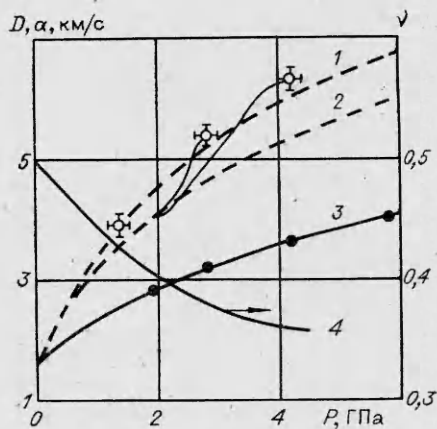
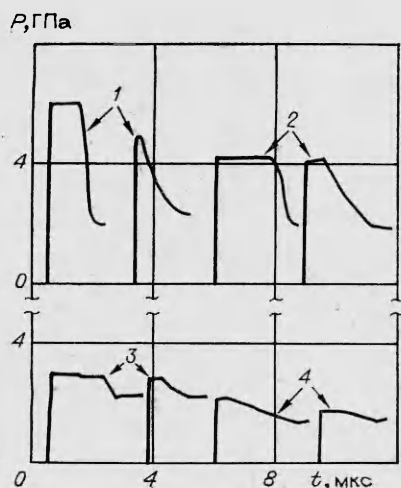
Образцы вырезались из листа толщиной 1 см. Измеренная плотность образцов составляла  $1,34 \text{ г/см}^3$ , скорость звука при атмосферном давлении  $1,5 \text{ км/с}$ . Испытания на простое растяжение со скоростью  $10^{-2}$ — $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  показали, что начальный модуль Юнга резины находится в пределах 2—3 МПа, истинное напряжение разрыва  $S_K = 88 \text{ МПа}$ . В момент разрыва относительное удлинение рабочей части образца составило 609 %, остаточная деформация после разрыва  $\sim 10 \%$ .

Плоские ударные волны (УВ) в образцах создавались ударниками из алюминия или оргстекла толщиной 2—7 мм, а также детонацией взрывных линз в непосредственном контакте с образцом. Метание ударников осуществлялось с использованием взрывных устройств [3, 4]. Давление ударного сжатия варьировалось изменением скорости ударников, а также применением экранов с различной динамической жесткостью, располагаемых между образцом и ударником. С помощью манганиновых датчиков фиксировались профили давления  $P(t)$  в образце на границе с экраном и на заданном удалении от него. Кроме того, методом лазерной доплеровской интерферометрии [5, 6] проведена регистрация профилей скорости тыльной поверхности образцов  $u(t)$  при выходе импульса сжатия в преграду с малой динамической жесткостью или в воздух.

Результаты измерения эволюции профилей  $I$ — $4$  давления в резине представлены на рис. 1, соответствующие условия нагружения указаны в таблице. В исследованном диапазоне давлений от 2 до 6 ГПа на профилях  $P(t)$  не фиксируются какие-либо качественные особенности, связанные со специфическими свойствами резины. Неполнота разгрузки в волнах разрежения объясняется относительно высокой динамической жесткостью использовавшихся ударников и экранов.

Непосредственно по результатам измерений определялись давление ударного сжатия  $P$ , скорость УВ  $D$  и лагранжевы скорости распространения фронта и последующих участков волны разрежения  $a(P) = c(P)V_0/V$ . Результаты измерений и рассчитанные по ним значения массовой скорости  $u$ , степени сжатия  $V/V_0$  и скорости звука в ударно-сжатой резине  $c$  приведены в таблице. С учетом измеренной скорости звука при атмосферном давлении ударная адиабата резины в исследованном диапазоне с погрешностью, равной погрешности измерений, описывается выражением

Профиль (рис. 1)	$P$ , ГПа	$D$ , км/с	$u$ , км/с	$\frac{V}{V_0}$	$c$ , км/с
1	5,80	4,02	1,10	0,726	—
2	4,20	3,65	0,88	0,760	4,80
3	2,80	3,20	0,67	0,792	4,33
4	1,95	2,84	0,52	0,816	—
4	1,36	—	—	—	3,18



Р и с. 2

Р и с. 1

$$(1) \quad D = 1,5 + 2,89u - 0,53u^2,$$

где  $D$  и  $u$  в км/с.

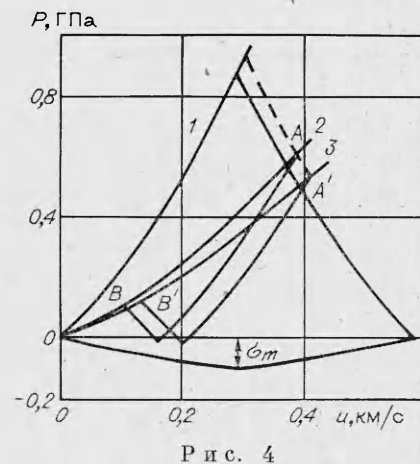
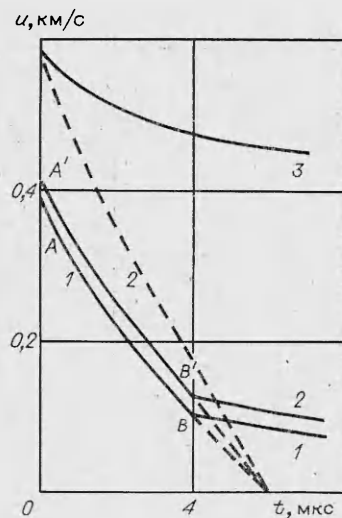
Результаты измерений лагранжевых скоростей распространения фронта волн разрежения представлены на рис. 2 светлыми точками с указанием экспериментальной погрешности. Сплошные кривые, выходящие из этих точек, соответствуют лагранжевой скорости распространения фиксированных уровней давления в волнах разгрузки. Там же приведены измеренные значения скорости УВ (темные точки) и ударная адиабата (кривая 3), построенная по зависимости (1). Кривая 2 представляет зависимость лагранжевой скорости звука от давления, рассчитанную в квазиакустическом приближении, т. е. в предположении совпадения ударной адиабаты и изоэнтропы разгрузки в координатах  $P - u$ . Квазиакустическое приближение дает хорошее согласие с результатами измерений объемной скорости звука в металлах [7] в широком диапазоне давлений ударного сжатия. Оценкой сверху для объемной скорости звука является производная  $c_H = (dP/d\rho)^{1/2}$  вдоль ударной адиабаты; равенство этой величины равновесной скорости звука означает, что коэффициент Грюнайзена вещества равен нулю. Кривая 1 на рис. 2 есть зависимость  $a_H(P) = c_H(P)V_0/V$ . Видно, что значения скорости фронта волны разрежения примерно равны или выше  $a_H(P)$ . Иными словами, фронт волны разрежения в ударно-сжатой резине распространяется со скоростью, превышающей равновесное значение объемной скорости звука.

Высокие скорости волны разрежения, которые почти вдвое выше соответствующих значений скорости УВ, приводят к быстрому затуханию УВ в резине, что и делает ее эффективным материалом для ослабления ударно-волновых воздействий.

По мере разгрузки измеренная фазовая скорость в волне приближается к кривой 2 (рис. 2), рассчитанной в квазиакустическом приближении. Естественно связать такой характер изменения фазовых скоростей в волне разрежения с упругопластическими свойствами ударно-сжатой резины. В этом случае, принимая кривую 2 в качестве зависимости скорости звука от давления, можно оценить коэффициент Пуассона ударно-сжатой резины

$$\nu = \frac{3(c_b/c_l)^2 - 1}{3(c_b/c_l)^2 + 1},$$

где  $c_b$ ,  $c_l$  — объемная и продольная скорости звука. Результаты оценки показаны на рис. 2 (кривая 4). Видно, что коэффициент Пуассона резины по мере роста давления ударного сжатия уменьшается от типичного для



Р и с. 3

эластомеров, близкого к 0,5 ( $\nu_0 = 0,4998$ ), до 0,36 при давлении 4,2 ГПа, характерного для твердых тел. Это означает, что под влиянием высокого давления происходит затвердевание резины. Ранее в условиях статического сжатия [8] наблюдалось стеклование резины под действием давления при нормальной температуре. При этом в узком диапазоне давлений на два-три порядка возрастали модули Юнга и предел текучести материала.

С целью определения динамической прочности резины на разрыв проведена регистрация профилей скорости  $u(t)$  тыльной поверхности образцов, находящихся в контакте с преградой из материала с малой динамической жесткостью. В подобной постановке изучались отклонные явления в жидкостях [9] и твердых телах [10]. Измерения проведены лазерным доплеровским интерферометром. Для отражения зондирующего излучения на поверхность образца наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 20 мкм. Импульсы ударного сжатия возбуждались в образцах толщиной 10 мм ударниками из оргстекла толщиной 2 мм, имеющими скорость 850 м/с. Ударные адиабаты плексигласа и резины близки, поэтому применение плексигласа в качестве материала ударника и экрана обеспечивает полноту разгрузки в первой волне разрежения.

Результаты измерений представлены на рис. 3, где кривая 1 получена в опыте с преградой из этанола, 2 — в опыте с гексаном. Сведения об ударной сжимаемости этих веществ взяты из [11, 12]. С учетом скорости звука при атмосферном давлении ударные адиабаты материалов преград в диапазоне давлений до 10 ГПа представлялись в виде  $D = 1,08 + 2,23u - 0,197u^2$  для гексана и  $D = 1,16 + 2,23u - 0,181u^2$  для этанола.

На выходе из образца импульс сжатия имеет треугольный профиль и значительно ослаблен. Через 4 мкс после выхода УВ на контактную поверхность на профилях  $u(t)$  фиксируется резкое уменьшение крутизны волны разрежения. Очевидно, что этот излом появляется в результате волновых взаимодействий в образце. На рис. 4 приведены диаграммы изменения состояния при взаимодействии волн в координатах  $P - u$ . Цифрами 1—3 обозначены ударные адиабаты резины, этанола и гексана, штриховая линия — адиабата разгрузки резины в опытах с гексаном и этанолом, соответствующая скорости плексивого ударника 850 м/с, буквенные обозначения отвечают рис. 3. После выхода УВ на поверхность раздела с преградой в образце появляется отраженная волна разрежения, взаимодействие которой с падающей волной приводит к дополнительному спаду давления. В результате в образце генерируются растягивающие напряжения, величина которых определяется на диаграмме  $P - u$  пересечением траекторий изменения состояния вдоль соответствующих  $c_+$ - и  $c_-$ -характеристик. Анализ  $P - u$ -диаграмм показывает, что точки изло-

ма  $B$  и  $B'$  на профилях  $u(t)$  отвечают достижению нулевого или несколько меньшего (порядка 10 МПа) давления в образце. Это означает, что появление излома на профиле  $u(t)$  можно объяснить разрывом резины под действием малых растягивающих напряжений. Тогда последующий медленный спад скорости объясняется переотражением волны разрежения от поверхности разрушения. Однако предположение о малой прочности резины на разрыв противоречит результатам статических испытаний.

Если прочность тела пренебрежимо мала, то после выхода УВ на его свободную поверхность скорость последней должна сохраняться постоянной независимо от спада параметров в импульсе нагрузки. Профиль скорости поверхности образца резины при выходе УВ в воздух приведен на рис. 3 (кривая 3). Скорость плексигласового ударника в этом опыте примерно на 5 % ниже, чем в предыдущих. На рис. 3 штриховой линией показан также профиль скорости свободной поверхности образца, рассчитанный по результатам опытов с преградами в предположении сохранения его сплошности.

Измеренный профиль скорости свободной поверхности отличается от предполагаемых для крайних случаев высокой и пренебрежимо малой динамической прочности резины на разрыв. Центральная часть образца полной толщины в этом опыте была сохранена. При визуальном осмотре осевого сечения образца невооруженным глазом и под микроскопом с увеличением до  $\times 400$  не обнаружено явных признаков разрушения. Таким образом, поведение резины при динамическом растяжении имеет существенные отличия от случаев твердых тел или жидкостей.

Известно [13], что разрыву эластомеров предшествует образование микронесплошностей в образце, которое начинается при напряжениях, намного меньших разрывных. Само по себе образование несплошностей, вызванное отслоением или образованием пор, еще не есть разрушение. Так, при испытаниях на трехосное растяжение вулканизаторов натурального каучука [14] образование полостей происходило при напряжениях 1—3 МПа и незначительных деформациях; после этого образцы претерпевали дальнейшую деформацию в несколько сотен процентов, сопровождаемую ростом (с малым модулем) растягивающих напряжений. После образования полостей режим деформирования в их окрестности отклоняется от трехосного, появляется возможность реализации больших обратимых деформаций.

Указанные особенности деформирования эластомеров объясняют аномальное поведение резины при динамическом растяжении. Образование и обратимый рост полостей приводят к уменьшению модуля объемной упругости и скорости звука в резине в области отрицательных давлений. Падение скорости звука вызывает уменьшение крутизны волны разрежения на профиле скорости свободной поверхности образца.

Значение лагранжевой скорости звука  $a_p$  в растянутой резине можно оценить из сопоставления реальной и расчетной (в предположении сохранения начального модуля объемной упругости) крутизны профилей скорости свободной поверхности. Если принять, что нулевое давление при взаимодействии падающей и отраженной волн разрежения достигается на некоторой траектории, имеющей в координатах расстояние  $x$  — время  $t$  наклон  $c_0$ , а скачок модуля упругости происходит в момент, когда давление равно нулю, то из простого анализа  $t$  —  $x$ -диаграммы процесса получаем  $a_p = c_0 / (2\dot{u}_p / \dot{u} - 1)$ , где  $\dot{u}_p$ ,  $\dot{u}$  — крутизна  $du/dt$  расчетного и экспериментального профилей скорости свободной поверхности. В рассматриваемом случае  $\dot{u}_p = 100$  м/(с·мкс),  $\dot{u} = 30$  м/(с·мкс). Принимая  $c_0$  равной скорости звука в нормальных условиях ( $c_0 = 1,5$  км/с), находим для начального участка экспериментального профиля  $u(t)$   $a_p = 0,27$  км/с. Как видно из рис. 3, крутизна измеренного профиля  $u(t)$  со временем еще уменьшается, что говорит о дальнейшем падении модуля объемной упругости.

Зная величину скорости звука, можно оценить наклон  $dP/du = \pm \rho_0 a$  траекторий изменения состояния резины вдоль характеристик для области  $P < 0$  и тем самым оценить максимальные значения растягивающих напряжений, имевших место в экспериментах по разгрузке резины в воздух. Соответствующие построения приведены на рис. 4. Из них следует, что наблюдаемое уменьшение скорости на рис. 3 (кривая 3) отвечает достижению растягивающего напряжения не более 20 МПа. Максимальный уровень отрицательных напряжений  $\sigma_m$ , который может быть достигнут в резине в данных условиях нагружения, оценивается в 100 МПа.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов указывают на специфичность поведения резины при ударно-волновом нагружении. Отличия в динамических свойствах резины связаны с ее затвердением под действием давления ударного сжатия и возможностью обратимого роста несплошностей при динамическом растяжении.

Авторы благодарят В. Э. Згаевского и В. К. Голубева за дискуссии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бухина М. Ф. Техническая физика эластомеров.— М.: Химия, 1984.
2. Аскадский А. А. Деформация полимеров.— М.: Химия, 1973.
3. Канель Г. И., Молодец А. М., Воробьев А. А. О метании пластин взрывом // ФГВ.— 1974.— № 6.
4. Канель Г. И. Сопротивление металлов откольному разрушению // ФГВ.— 1982.— № 3.
5. Asay J. R., Barker L. M. Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity // J. Appl. Phys.— 1974.— V. 45, N 6.
6. Белолов М. И., Вовченко В. И. и др. Применение лазерных интерферометрических измерителей скорости во взрывных экспериментах // ЖТФ.— 1987.— Т. 57, № 5.
7. Дремин А. Н., Канель Г. И. Преломление фронта косой ударной волны на границе с менее жесткой средой // ПМТФ.— 1970.— № 3.
8. Weaver C. W., Paterson M. S. Stress-strain properties of rubber at pressures above the glass transition pressure // J. Polym. Sci.— 1969.— V. 7, pt A—2, N 3.
9. Erlich D. C., Wooten D. C., Crewdson R. C. Dynamic tensile failure of glycerol // J. Appl. Phys.— 1971.— V. 42, N 13.
10. Степанов Г. В. Поведение конструкционных материалов в упругопластических волнах нагрузки.— Киев: Наук. думка, 1978.
11. Walsh J. M., Rice M. H. Dynamic of liquids from measurements on strong shock waves // J. Chem. Phys.— 1957.— V. 26, N 4.
12. Ahrens I. J., Ruderman M. H. Immersed-foil method for measuring shock wave profiles in solids // J. Appl. Phys.— 1966.— V. 37, N 13.
13. Эйрих Ф. Р., Смит Т. Л. Молекулярно-механические аспекты изотермического разрушения эластомеров // Разрушение/Под ред. Г. Либовица.— М.: Мир, 1976.— Т. 7, ч. 2.
14. Gent A. N., Lindley P. B. Internal rupture of bouded rubber cylinders in tension // Proc. Roy. Soc. (London).— 1959.— Ser. A, V. 249, N 1.

г. Черноголовка

Поступила 1/III 1988 г.,  
в окончательном варианте — 19/VIII 1988 г.

УДК 539.375

В. А. Сарайкин

### ДВИЖЕНИЕ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАКЛОННОЙ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРЕЩИНЫ

Внутренние дефекты, динамически развивающиеся в материале, излучают возмущения. В геофизике с целью опознания типа, ориентации и протяженности крупномасштабных дефектов — очагов землетрясений — широко применяется упругая модель распространяющегося дислокационного разрыва [1—4]. Согласно ей, на месте разрыва задается скачок вектора перемещений, описывающий подвижку берегов разрыва, безотносительно к деталям распределения исходного поля внутренних на-

© 1990 Сарайкин В. А.