

15. Chapman P. R., Rubesin H. W. Temperature and velocity profiles in the compressible laminar boundary layer with arbitrary distribution of surface temperature // J. Aeron. Sci.—1949.—V. 16, N 9.
16. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник.— М.: Энергия, 1972.
17. Спэрроу, Балага, Патанкар. Теплообмен при вынужденной конвекции в экранированной системе с продольными ребрами при наличии и отсутствии торцевого зазора // Тр. Амер. о-ва авиационно-мех. Теплопередача.— 1978.— № 4.

г. Киев

Поступила 3/V 1990 г.,  
в окончательном варианте —  
10/IV 1992 г.

УДК 532.598 : 678.01

Г. И. Канель, З. Г. Толстикова, А. В. Уткин

### ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ОТКОЛЬНОМУ РАЗРУШЕНИЮ ЭЛАСТОМЕРОВ

В настоящее время имеется ограниченная информация о свойствах наполненных эластомеров в условиях ударно-волнового нагружения. Их поведение в нормальных условиях характеризуется рядом специфических особенностей [1, 2]. Представляет интерес вопрос о том, в какой мере эта специфика проявляется при интенсивных импульсных воздействиях. Выполненные в последнее время исследования показали, например, что разрушение эластомеров в волнах разрежения отличается от разрушения металлов и полимеров. Авторам [3, 4] при регистрации скорости свободной поверхности резины после выхода на нее ударной волны не удалось зарегистрировать характерный откольный импульс: измеренный профиль монотонно спадает и отличается от предполагаемых для крайних случаев высокой и пренебрежимо малой динамической прочности на разрыв, причем в [3] на сохраненных образцах не обнаружены явные следы откольного разрушения.

Качественно аналогичные результаты при изучении откола в твердых ракетных топливах и их имитаторах, являющихся высоконаполненными эластомерами, получены в [5]. При регистрации скорости свободной поверхности автор [5] зафиксировал слабо выраженный откольный импульс с последующим монотонным затуханием скорости. Это позволило найти порог начала разрушения, который, как отмечалось в [3], оказался низким: его значение для большинства исследованных составов равно приблизительно 20 МПа. На сохраненных образцах отчетливо наблюдалось образование откольной пластины, когда амплитуда исходного треугольного импульса сжатия почти на порядок превышала порог начала разрушения. При более низких давлениях сохраненный образец внешне выглядит неповрежденным. Исследование микроструктуры аналогичных составов после ударно-волнового воздействия выполнено в [6]: при давлении 52 МПа видны отдельные трещины внутри зерен перхлората аммония, находящихся в плоскости максимальных растягивающих напряжений. На границе со связкой трещины заканчиваются. С повышением давления степень разрушения зерен возрастает, начинает формироваться плоскость откола и при 145 МПа происходит отделение откольной пластины, т. е. амплитуда исходного импульса сжатия, отражение которого от свободной поверхности приводит к возникновению в рассматриваемом образце растягивающих напряжений, должна значительно превышать порог начала разрушения в микросекундном интервале времени.

Отмеченные особенности поведения эластомеров при динамическом растяжении делают актуальным экспериментальное исследование поведения этих материалов в ударных волнах. В частности, представляет

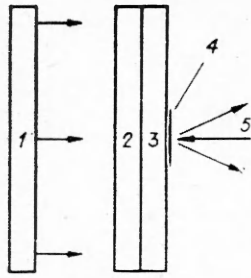


Рис. 1

интерес изучение влияния размера частиц наполнителя на характер разрушения. С этой целью в данной работе проведены исследования резины и двух высоконаполненных эластомеров с различной дисперсностью наполнителя в условиях откола.

**Результаты экспериментов.** Разрушение материалов в условиях откола изучалось методом регистрации скорости свободной поверхности. Схема экспериментов приведена на рис. 1. Ударные волны в образце возбуждались ударником 1, разогнанным продуктами взрыва. Между образцом 3 и ударником обычно помещался экран 2. Регистрация скорости

свободной поверхности осуществлялась лазерным интерферометром 5 VISAR [7] с постоянной интерферометра 80,8 м/с, что позволяет проводить измерения с точностью до 2 м/с. Для отражения зондирующего излучения на поверхность образцов эпоксидным клеем наклеивалась алюминиевая фольга 4 толщиной 8 мкм. Часть опытов проведена при разгрузке в преграду с малой динамической жесткостью.

Образцы резины вырезались из листа толщиной 10 мм. Измеренные плотность  $\rho_0$  и скорость звука  $c_0$  при нормальных условиях равны соответственно 1,34 г/см<sup>3</sup> и 1,5 км/с. Результаты экспериментов приведены на рис. 2 в виде зависимости скорости свободной поверхности  $w$  от времени. Толщина  $h_1$  и скорость  $w_1$  ударника, толщина  $h_2$  и материал экрана, а также толщина образца  $h_3$  для каждого опыта приведены в табл. 1 (номера опытов и линий на рис. 2 совпадают).

Обычно после выхода волны сжатия на свободную поверхность твердого тела на профиле  $w(t)$  регистрируются спад скорости в падающей волне разрежения, а затем ее рост в момент прихода волны сжатия (откольного импульса), образующейся в результате релаксации растягивающих напряжений при откольном разрушении материала. После этого наблюдаются затухающие колебания скорости поверхности вблизи некоторого среднего постоянного значения, что обусловлено многократными отражениями волн в откольной пластине. Спад скорости  $\Delta w$  к моменту выхода на поверхность фронта откольного импульса пропорционален откольной прочности материала  $\sigma^*$ :

$$(1) \quad \sigma^* = 0,5\rho_0 c_0 \Delta w.$$

Результаты экспериментов по оконной методике позволили рассчитать для опыта 1 профиль скорости свободной поверхности в предположении сохранения сжимаемости резины в области отрицательных давлений (штриховая линия на рис. 2). Очевидно, измеренный профиль должен совпадать с рассчитанным, пока на волновой процесс не начнет влиять нарушение сплошности образца под действием отрицательных давлений. Если же материал образца вообще не обладает заметной прочностью на разрыв, скорость его поверхности после выхода ударной волны должна сохраняться постоянной. Во всех проведенных опытах профили скорости свободной поверхности образца занимают промежуточное положение между этими крайними случаями. Небольшой начальный участок соответствует выходу на поверхность падающего импульса нагрузки, затем фиксируется слабая волна сжатия, подобная регистрируемой при отколе. После этого в течение довольно большого времени наблюдается относительно медленный спад скорости поверхности. Визуальный осмотр образцов, сохраненных в опытах 1, 2, не обнаруживает явных признаков разрушения. Значения откольной прочности резины, рассчитанные по величине спада скорости перед откольным импульсом, приведены в табл. 1.

Аналогичные опыты выполнены с модельным высоконаполненным эластомером на основе бутадиен-нитрильного каучука. Содержание наполнителя составляло 75% по массе, в том числе хлористого калия 61,6%. Были приготовлены два типа составов: грубодисперсный (ГД) с

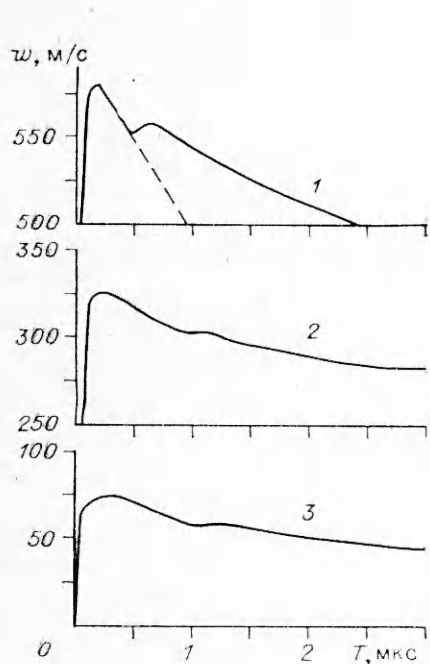


Рис. 2

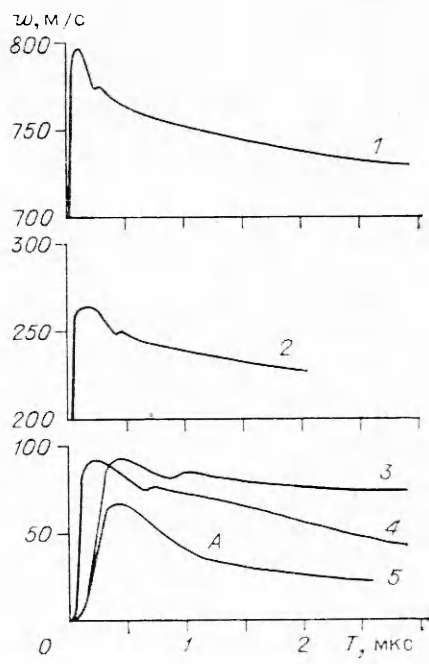


Рис. 3

размером частиц KCl  $160 \div 200$  мкм и мелкодисперсный (МД) с размером частиц  $20 \div 50$  мкм. По остальным параметрам составы совпадали. Начальная плотность образцов  $1,60$  г/см<sup>3</sup>, скорость звука при нормальных условиях  $1,85$  км/с. Для проведения ударно-волновых экспериментов образцы изготавливались в виде дисков диаметром  $70-90$  мм и толщиной  $4,5 \div 5,0$  мм.

Измеренные профили скорости свободной поверхности для МД- и ГД-состава приведены на рис. 3. Соответствующие условия нагружения и величина откольной прочности  $\sigma^*$ , рассчитанная по формуле (1), указаны в табл. 2 (номера опытов и линий на рис. 3 совпадают). Полученные результаты качественно аналогичны приведенным на рис. 2 для резины.

Опыт 5 выполнен с ГД-составом в той же постановке, что и опыты 3, 4, но по оконной методике: разгрузка осуществлялась в гексан. Поэтому растягивающие напряжения возникали на сравнительно большой глубине внутри образца и информация об этом выходит на границу

Таблица 1

Номер опыта	$h_1$ , мм	$w_1$ , м/с	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм	$\sigma^*$ , МПа
1	2,3	800	1,9 (ПММ)	10	27
2	1,5	380	—	10	22
3	1,4	380	5,0 (Cu)	10	16

Таблица 2

Номер опыта	$h_1$ , мм	$w_1$ , м/с	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм	$\sigma^*$ , МПа
1	1,4	850	1,2 (ПММ)	5,0 (МД)	30
2	1,8	850	5,0 (Cu)	4,8 (МД)	24
3	1,7	380	5,0 (Cu)	4,6 (ГД)	15
4	1,7	380	5,0 (Cu)	4,6 (МД)	25
5	1,7	380	5,0 (Cu)	4,6 (ГД)	~10

раздела образец — гексан в момент времени, соответствующий точке  $A$ . До этого скорость границы повторяет форму исходного импульса сжатия. Данный опыт позволяет не только определить форму падающего импульса, но и оценить величину растягивающих напряжений, при которых начинается разрушение материала. Зная ударную адиабату гексана [3] и предполагая, что для исследуемого состава справедливо акустическое приближение, можно показать, что точке излома  $A$  отвечает достижение растягивающих напряжений около 10 МПа. Точность нахождения этой величины невысока в основном из-за неопределенности положения точки  $A$ , тем не менее согласие с результатами опыта 3 удовлетворительное.

В опытах 3 и 4 образцы были сохранены. Явных следов образования откольных пластин на них не наблюдалось, т. е. в соответствии с отмеченной ранее особенностью откольного разрушения эластомеров в микросекундном интервале времен нагружения не происходит отделения пластины, хотя амплитуда исходного импульса сжатия значительно превышает  $\sigma^*$ . Это объясняется тем, что разрыву эластомеров предшествует образование микронесплошностей в образце, которое начинается при достижении порога начала разрушения. Последующий рост пор является обратимым: материал способен претерпевать значительную деформацию без разрушения.

**Обсуждение результатов экспериментов.** Характер поведения эластомеров в условиях откола согласуется с испытаниями на трехосное растяжение вулканизаторов натурального каучука [8]. Образование полостей в этом случае происходило при напряжениях 1—3 МПа и незначительных деформациях, после чего 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.

Таким образом, можно предполагать, что измеренные значения откольной прочности 15—30 МПа характеризуют зарождение микронесплошностей в эластомерах, но не их разрушение. После появления пор эластомеры способны оказывать значительное сопротивление растяжению, что проявляется на профилях скорости поверхности в длительном торможении откалывающегося слоя. Заметим, что по результатам статических испытаний истинное напряжение разрыва при растяжении резинового стержня составляет 88 МПа [3].

Очевидно, при фиксированных условиях нагружения чем выше сопротивление растяжению, тем интенсивнее должно быть торможение. Это вполне согласуется с наблюдаемым изменением крутизны профилей скорости за откольным импульсом при переходе от эластомера с мелкодисперсным наполнителем к грубодисперсному (кривые 3, 4 на рис. 3). Сопоставление с резиной провести сложно из-за различия в условиях нагружения. Так, градиент скорости в разгрузочной части падающего импульса практически одинаков на профилях 2 (рис. 2) и 4 (рис. 3). Близки и скорости торможения. Однако амплитуда волны сжатия в опыте с резиной в 3,5 раза выше, чем в опыте с эластомером, и это необходимо учитывать из-за возможности разрушения частиц наполнителя в фазе сжатия [4]. Поэтому можно лишь утверждать, что торможение в резине не менее интенсивно, чем в эластомере с мелкодисперсным наполнителем.

Торможение откалывающегося слоя может вызываться как упругим компонентом сопротивления обратимого роста несплошностей, так и вязкостью материала. В том и другом случае сопротивление росту пор обратно пропорционально их радиусу. В этой связи интересно отметить, что наблюдаемая скорость торможения также обратно пропорциональна размеру частиц наполнителя — для мелкодисперсного наполнителя она примерно в 3,5 раза выше, чем для грубодисперсных образцов.

Отчетливо видно влияние размера частиц наполнителя на ширину фронта ударной волны (для ГД-состава она почти в 2 раза больше) и на

форму минимума на профиле скорости: в опыте 3 (рис. 3) он значительно более пологий, чем в опыте 4. Последнее можно объяснить, если предположить, что порог начала разрушения ГД-состава ниже 15 МПа, но начальная скорость разрушения мала. Тогда в начавшем разрушаться образце спад скорости свободной поверхности будет продолжаться с меньшим градиентом до тех пор, пока скорость разрушения не возрастет до критической величины, при которой на профиле  $w(t)$  образуется минимум [9]. Это согласуется и с тем фактом, что в опыте 5 крутизна спада скорости до точки А больше, чем средняя крутизна в опыте 3 до момента выхода откольного импульса, тогда как должно быть наоборот.

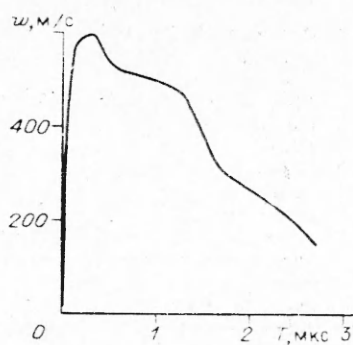


Рис. 4

Ударные адиабаты высоконаполненных составов не определялись, за исключением одной точки, соответствующей 2,4 ГПа, для чего проводилась регистрация профилей давления в двух сечениях образца манганиновыми датчиками. Для расчетов давления использовалась обобщенная ударная адиабата [10], удовлетворительно согласующаяся с этим экспериментом. Выполненная таким образом оценка показывает, что во всех опытах амплитуда волн сжатия не превышала давления фазового перехода в КС1 [11]. Поэтому на профилях скорости (рис. 3) не отмечались связанные с этим особенности. При повышении давления до 2 ГПа и более можно ожидать возникновения двухволновой конфигурации в волнах сжатия и разрежения. На рис. 4 приведены результаты эксперимента для МД-состава, выполненного по оконной методике. Представлена зависимость скорости контактной границы при разгрузке в воду. Импульс сжатия амплитудой 2,4 ГПа создавался в образце с помощью алюминиевого ударника толщиной 2 мм, разогнанного до скорости 660 м/с. В фазе сжатия двухволновая конфигурация не регистрируется, что, вероятно, связано с малой толщиной образца (5 мм), не позволяющей наблюдать расщепления ударной волны. Волна разгрузки, однако, имеет отчетливо выраженную двухступенчатую конфигурацию, что может существенно повлиять на характер зависимости  $w(t)$  при исследовании откольного разрушения при давлении выше давления фазового перехода.

Таким образом, из экспериментов видно, что порог начала разрушения эластомеров в условиях откола составляет 15—30 МПа. Однако затянутость процесса разрушения во времени приводит к тому, что в микросекундном интервале времен воздействия может не наблюдаться образование откольной пластины даже в том случае, когда амплитуда исходного импульса сжатия на порядок превышает  $\sigma^*$ . Показано, что увеличение размера частиц наполнителя не только снижает порог начала разрушения, но и существенно уменьшает скорость торможения свободной поверхности за откольным импульсом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бухина М. Ф. Техническая физика эластомеров.— М.: Химия, 1984.
2. Аскадский А. А. Деформация полимеров.— М.: Химия, 1973.
3. Калмыков Ю. Б., Канель Г. И., Пархоменко И. П. и др. Поведение резины в ударных волнах и волнах разрежения // ПМТФ.— 1990.— № 1.
4. Danker G. R., Newlander C. D., Colella N. J. Analytical modelling of dynamic tensile behavior in loaded Vamac elastomers // Shock compression of condensed matter — 1989: Proc. conf.— Amsterdam a. o.: Elsevier, 1990.
5. Weirick L. J. Characterization of booster-rocket propellants and their simulation // The 9th Symposium (International) on Detonation, Portland, USA.— 1989.— V. 1.

6. Huang F., Bai C., Ding J. Mechanical response of a composite propellant to dynamic loading // Shock compression of condensed matter — 1991: Proc. conf.— Amsterdam a. o.: Elsevier, 1992.
7. 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.
8. Эйрих Ф. Р., Смит Т. Л. Молекулярно-механические аспекты изотермического разрушения эластомеров // Разрушение/Под ред. Г. Либовица.— М.: Мир, 1976.— Т. 7, ч. 2.
9. Уткин А. В., Канель Г. И. Анализ вязкого откольного разрушения материалов в акустическом приближении // Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов при однократном импульсном нагружении: Тез. докл. III Республ. семинара.— Киев, 1991.
10. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. Обобщенная ударная адiabата конденсированных веществ // ПМТФ.— 1969.— № 4.
11. Дремин А. Н., Першин С. В., Погорелов В. Ф. Структура ударных волн в KCl и KBr при динамическом сжатии до 200 тыс. атм // ФГВ.— 1965.— № 4.

г. Черноголовка

Поступила 27/IV 1992 г.

УДК 539.3

С. В. Андреев, В. Н. Паймушин

### СОТНОШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК СО СЛОЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Предложенные к настоящему времени варианты теории трехслойных оболочек со слоями переменной толщины, базирующиеся на различных физических или кинематических гипотезах, построены, как правило, при введении ряда ограничений, накладываемых на величины перемещений, толщины слоев и их изменимость и др. [1—6]. Разнообразие вариантов конструктивного исполнения таких оболочек, выполненных из обычных и композитных материалов, а также условий их эксплуатации требует построения для них разрешающих уравнений более общего вида, свободных от указанных выше ограничений.

В данной работе для трехслойных оболочек, имеющих произвольную геометрию внешних слоев и заполнителя, построен необходимый комплекс соотношений геометрически нелинейной теории при произвольных смещениях, который базируется на хорошо апробированной в расчетной практике статико-кинематической модели ломаной линии [7]. Используемая здесь модель и отвечающие ей уравнения являются предельно упрощенными для построения на их основе линеаризованных уравнений нейтрального равновесия и постановки соответствующих задач по определению смешанных [8] форм потери устойчивости трехслойных элементов конструкций рассматриваемого класса при существенно моментном докритическом их напряженно-деформированном состоянии. В частности, привлечения построенных в работе уравнений общего вида потребовали задачи по анализу напряженно-деформированного состояния и определению критических значений действующих нагрузок для ряда элементов конструкций летательных аппаратов, имеющих значительную переменность толщины заполнителя и находящихся при эксплуатации в условиях поперечного изгиба (закрылки, элероны и предкрылки крыла самолета, выполненные в виде трехслойных пластин и оболочек со слоями переменной толщины, хвостовые отсеки несущего винта вертолета и т. д.), а также некоторые задачи технологической механики трехслойных элементов конструкций.

1. При построении теории трехслойных оболочек со слоями переменной толщины нетривиальными являются вопросы, связанные с построением параметризаций в занимаемых слоями неканонических областях.

© С. В. Андреев, В. Н. Паймушин, 1993