

УДК 678.01:539.3

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛИМЕРНОГО РАЗРЕЗНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

А. С. Юношев, В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Разработана методика испытаний на сжатие разрезного стержня Гопкинсона с мерными стержнями и ударником, изготовленными из органического стекла (материала с низкими значениями плотности и скорости звука). Методика предназначена для определения диаграмм деформирования при больших скоростях нагружения высокодеформативных материалов с низкими значениями плотности и прочности, таких как пластики, пенопласты и резины. Приведены динамические диаграммы напряжение — деформация сжатия для сферопластика, пенопласта и резины, полученные с использованием данной методики.

**Введение.** Для исследования влияния скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$  на механические характеристики различных материалов в диапазоне скоростей  $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$  широко используется разрезной стержень Гопкинсона [1–4]. Для изучения динамического поведения вязкоупругих пластиков с акустическим импедансом  $I = \rho c \geq 1 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$  ( $\rho$  — плотность материала стержней,  $c$  — скорость звука в стержне) в качестве материала мерных стержней применяются алюминиевые сплавы с импедансом  $14 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$ . Однако для тестирования материалов с импедансом порядка  $0,1 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$  алюминиевые и материалы с  $I \sim 10 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$  не подходят. При исследовании высокодеформативных полимерных и пористых материалов, малопрочных и малоплотных веществ с предельными деформациями, достигающими 50 % и более, возникают две проблемы. Во-первых, амплитуда прошедшей волны мала из-за значительного различия акустических импедансов рабочих стержней и исследуемого материала, и существует проблема регистрации профиля прошедшей волны на фоне шумов регистрирующей системы. Во-вторых, в случае, когда при исследовании полимеров используются металлические мерные стержни, предельная деформация, как правило, не достигается из-за ограниченной длительности падающего импульса, что обусловлено конечной длиной ударника и большой скоростью звука  $c \approx 5 \text{ км/с}$  для материала ударника. Для того чтобы определить значение предельной деформации, необходимо увеличить длительность рабочего импульса, что приводит к существенному увеличению длин ударника, подводящего и отводящего стержней и связано с техническими трудностями (изготовлением мерных стержней длиной 2–3 м и метанием ударника длиной 0,5–1 м со скоростью 5–20 м/с).

Возможное решение указанных проблем предложено в [5, 6] и заключается в использовании методики разрезного стержня Гопкинсона с мерными стержнями и ударником, изготовленными из материала с плотностью  $\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$  и скоростью звука  $c \approx 1,5 \div 2 \text{ км/с}$ , т. е. в два-три раза меньшими, чем для металлов. При той же длительности падающего импульса это приводит к трехкратному сокращению длин ударника и рабочих стержней или при той же длине установки — к трехкратному увеличению длины падающего

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 99-01-00516, 00-15-96181) и Федеральной целевой программы “Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы” (грант № 274).

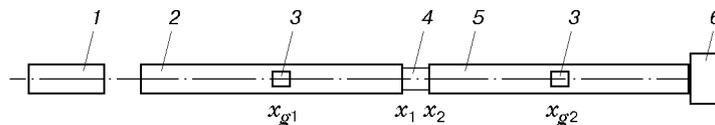


Рис. 1. Схема разрезного стержня Гопкинсона:

1 — ударник, 2 — передающий стержень, 3 — тензодатчики, 4 — образец из исследуемого материала, 5 — опорный стержень, 6 — демпфирующий упор

импульса. Примерно на порядок уменьшается акустический импеданс материала мерных стержней, значительно увеличивается амплитуда прошедшей волны. В результате возможно исследование динамического деформирования малоплотных материалов при больших деформациях.

При использовании мерных стержней из полимерных материалов возникает проблема описания динамического деформирования материала стержней, так как простые уравнения упругого деформирования не применимы. Необходимо привлекать более сложные вязкоупругие модели, учитывающие влияние скорости деформирования на величину механических напряжений. Отметим, что распространение волн по полимерным стержням сопровождается значительным декрементом затухания  $\alpha \approx 0,1 \div 1 \text{ м}^{-1}$ . В результате профиль волны деформации, измеряемый тензодатчиком в месте его расположения на стержне, не совпадает с профилем волны на торце стержня, т. е. в месте расположения образца из исследуемого материала. Значения напряжения и скорости вещества в волне не могут быть определены умножением деформации на постоянную величину. В этом случае для построения  $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы исследуемых материалов необходимо использовать общие соотношения методики разрезного стержня Гопкинсона, для чего необходимо развить технику восстановления профилей напряжения и скоростей на границах образца по профилям волн деформаций, измеряемым на значительном расстоянии от образца.

В [5] для описания распространения волн в полимерных стержнях предложено использовать вязкоупругую модель стандартного линейного тела (СЛТ). Техника обработки экспериментальных профилей волн, получаемых на разрезном стержне Гопкинсона, с помощью модели СЛТ изложена в [6]. Впервые данная методика применена в экспериментах с использованием мерных стержней из литого поликарбоната ( $c \approx 1,5 \text{ км/с}$ ) [7, 8]. При длинах мерных стержней 2,5 м и ударника из поликарбоната 1,07 м получена длительность нагружения до 1400 мкс и достигнута динамическая деформация 50–80 % при сжатии поликарбоната и высокопористых материалов с плотностью 0,05–1,2 г/см<sup>3</sup> и прочностью 1–300 МПа при скоростях деформирования 500–2300 с<sup>-1</sup>.

Целью данной работы является разработка методики разрезного стержня Гопкинсона с рабочими стержнями из органического стекла для испытания материалов на сжатие. Использовались мерные стержни из оргстекла марки СОЛ длиной 920 мм и диаметром 20 мм (рис. 1). Возбуждение импульса напряжения на свободном торце подводящего стержня осуществлялось ударом стержня-бойка из оргстекла длиной до 200 мм. Импульсы деформации в падающей волне имели длительность до 200 мкс и форму, близкую к трапеции. Между образцом из исследуемого материала и торцами рабочих стержней помещались пластинки из титана ВТ-6 толщиной 1 мм для предотвращения повреждения торцов стержней при сжатии образца. Торцевые поверхности образца покрывались легкой смазкой для уменьшения трения [9]. Профили деформации на мерных стержнях в сечениях  $x_{g1}$  и  $x_{g2}$ , расположенных на расстоянии 420 мм от испытываемого образца, регистрировались с помощью двух пар тензодатчиков из фольги длиной 3 мм, наклеенных в диаметрально противоположных точках для компенсации изгибных колебаний, и восьмиканального быстродействующего аналого-цифрового преобразователя L-1211 с частотой дискретизации до 1 МГц.

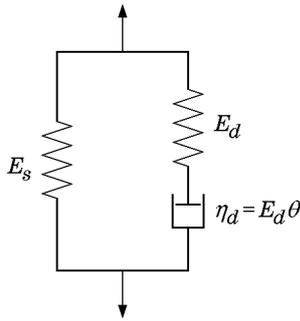


Рис. 2. Механическая модель стандартного линейного тела

**1. Общие соотношения для методики разрезного стержня Гопкинсона.** Среднее динамическое напряжение в образце  $\sigma_s(t)$  определялось как полусумма напряжений на левом и правом торцах образца (сечения  $x_1$  и  $x_2$  на рис. 1):

$$\sigma_s(t) = \frac{S_b}{2S_s} [\sigma(x_1, t) + \sigma(x_2, t)] = \frac{S_b}{2S_s} [\sigma_i(x_1, t) + \sigma_r(x_1, t) + \sigma_t(x_2, t)], \quad (1)$$

где  $S_b, S_s$  — площади поперечного сечения стержней и образца; индексами  $i, r, t$  обозначены величины, относящиеся к падающей, отраженной и прошедшей волнам соответственно.

Скорость деформирования материала образца  $\dot{\varepsilon}_s(t)$  определялась разностью скоростей движения  $u(x, t)$  левого и правого торцов образца:

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = (u(x_2, t) - u(x_1, t))/l_s = (u_t(x_2, t) - u_i(x_1, t) - u_r(x_1, t))/l_s, \quad (2)$$

где  $l_s$  — первоначальная длина образца.

Деформация вычислялась по формуле

$$\varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(t) dt = \frac{1}{l_s} \int_0^t [u_t(x_2, t) - u_i(x_1, t) - u_r(x_1, t)] dt. \quad (3)$$

Исключая время  $t$  из уравнений (1), (3), получим искомую динамическую  $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграмму для исследуемого материала при скорости деформирования, определяемой по (2). Отметим, что в общем случае в уравнениях (1)–(3) используются профили трех волн: падающей, отраженной и прошедшей.

В уравнениях (1)–(3) профили напряжений и скоростей соответствуют сечениям на торцах образца. В эксперименте профили деформации определяются на расстоянии не менее десяти диаметров стержней от сечений  $x_1$  и  $x_2$ . Для упругих металлических стержней профили волн существенно не изменяются при распространении волны от точек измерения до места расположения образца, и для описания распространения волн по мерным стержням используется приближение упругого линейного тела. В этом случае уравнения (1)–(3) значительно упрощаются и могут быть записаны в терминах деформации.

Для стержней из полимерного материала наблюдается существенное изменение профилей деформации вследствие вязкоупругих эффектов. Поэтому требуется восстановление значений скоростей движения и напряжений на торцах образца по экспериментальным профилям деформации, регистрируемому на большом расстоянии от места расположения образца.

Для решения задачи о распространении вязкоупругой волны в полимерном стержне уравнения движения и неразрывности должны быть дополнены уравнением, связывающим величину механического напряжения  $\sigma$  и деформацию  $\varepsilon$ . Например, для механической модели стандартного линейного тела, состоящей из параллельно соединенных упругого элемента и элемента Максвелла (рис. 2), эти уравнения имеют вид [1, 2]

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\theta} = (E_s + E_d) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{E_s}{\theta} \varepsilon. \quad (6)$$

Уравнение (6) записано в приближении относительно слабых волн, когда величина деформации не превышает 1–2 % и эффекты нелинейной упругости несущественны [5]. Модуль упругости  $E_s$  определяется на основе стандартных квазистатических измерений [10]. Выбранная вязкоупругая модель включает только один элемент Максвелла и соответственно одно время релаксации  $\theta$  и одно значение динамического модуля упругости  $E_d$ . Эти приближения соответствуют условиям методики разрезного стержня Гопкинсона, но требуют подтверждения, что и является одной из целей работы.

Для определения параметров модели  $E_d$ ,  $\theta$  воспользуемся частным решением системы (4)–(6), которым является бегущая волна с экспоненциально уменьшающейся амплитудой [1, 6]:  $f(x, t) = A \exp(\pm \alpha x) \exp(i(\omega t \pm kx))$ . В общем случае коэффициент затухания  $\alpha$  и волновое число  $k$  — функции частоты  $\omega$ , что является следствием дисперсии и диссипации волн в вязкоупругих стержнях. Представляет интерес высокочастотное приближение  $\omega \gg 1/\theta$ , что соответствует частотам при динамических испытаниях. Фазовая скорость  $C$  для высокочастотных волн не зависит от  $\omega$  и равна скорости упругих волн  $C_v$  для модели с двумя упругими параллельными элементами:

$$C^2 = \omega^2/k^2 = (E_s + E_d)/\rho = C_v^2. \quad (7)$$

Коэффициент затухания можно записать в виде

$$\alpha = \frac{E_d}{2\theta C_v (E_s + E_d)}. \quad (8)$$

Формулы (7), (8) связывают динамические параметры модели стандартного линейного тела  $E_d$ ,  $\theta$  с экспериментально измеряемыми величинами  $C_v$ ,  $\alpha$ .

Для расчета по уравнениям (4)–(6) профилей деформации  $\varepsilon(x_{g2}, t)$ , напряжения  $\sigma(x_{g2}, t)$  и скорости частиц  $u(x_{g2}, t)$  в сечении  $x_{g2} > x_{g1}$  по профилю деформации  $\varepsilon(x_{g1}, t)$  в сечении  $x_{g1}$  использовалась численная реализация метода характеристик, подробно рассмотренная в [6].

**2. Определение параметров модели стандартного линейного тела.** С целью определения динамических параметров модели СЛТ для мерных стержней из оргстекла проведена серия экспериментов, в которых измерялись скорость распространения возмущений  $C_v$  и коэффициент затухания  $\alpha$ . Зная эти значения, а также статический модуль упругости  $E_s = 5$  ГПа [10], можно рассчитать значения динамического модуля упругости и времени релаксации напряжений:

$$E_d = C_v^2 \rho_0 - E_s, \quad \theta = E_d/[2\alpha C_v (E_s + E_d)].$$

В работе [11] показано, что в упругих стержнях при распространении импульсов продольной деформации передняя часть импульса достигает точки измерения до момента времени  $z/C_v$  ( $z$  — расстояние, на котором наблюдается изменение формы импульса). К моменту  $z/C_v$  деформация достигает примерно 1/3 конечного значения. Поэтому в данной работе скорость распространения возмущений измерялась следующим образом. После удара стержнем-бойком по торцу мерного стержня регистрировались импульсы деформации  $\varepsilon(t)$  с амплитудой примерно 0,5 % с двух тензодатчиков, последовательно расположенных вдоль стержня на расстоянии  $z = 920$  мм. Согласно вышеизложенному интервал времени, необходимый для измерения  $C_v$ , определялся по скоростям точек переднего фронта импульсов деформации, находящихся на уровне 1/3 максимальной амплитуды импульса.

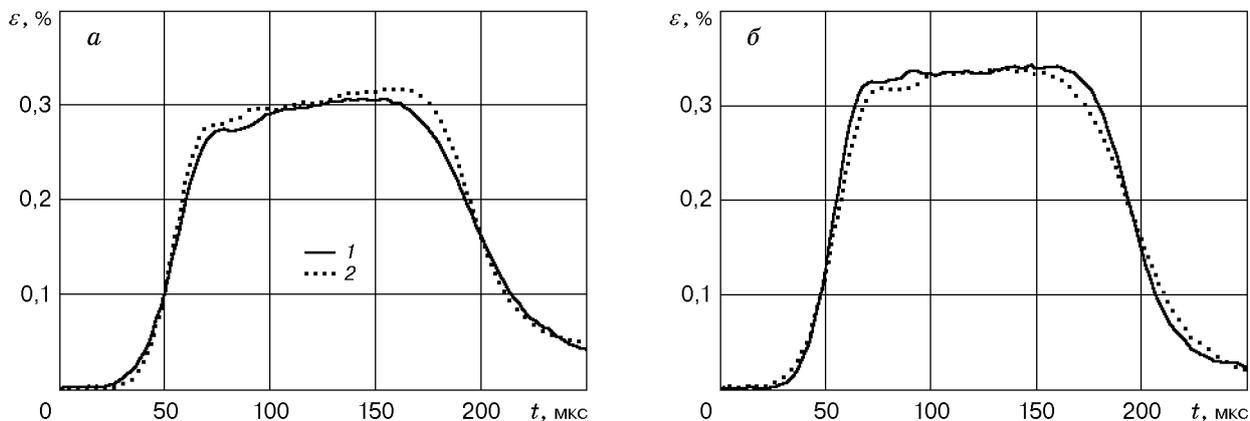


Рис. 3. Пример решения прямой задачи в сечении  $x_{g2}$  (а) и обратной задачи в сечении  $x_{g1}$  (б): 1 — эксперимент, 2 — теория

По профилям  $\varepsilon(t)$  измерялся коэффициент затухания. По результатам тестовых расчетов для случая трапециевидного импульса определена точка на профиле импульса деформации, соответствующая заложенному в алгоритм метода характеристик коэффициенту затухания и находящаяся на пересечении асимптот переднего фронта и плато профиля импульса деформации. Поэтому при экспериментальном определении коэффициента затухания находились ординаты  $Y_1$  и  $Y_2$  точек пересечения касательных к переднему фронту и плато для двух экспериментальных профилей импульсов деформаций. Значение коэффициента затухания вычислялось по формуле  $\alpha = \ln(Y_1/Y_2)/z$ . Определенные таким образом параметры модели СЛТ для оргстекла равны:  $E_s = 5$  ГПа,  $E_d = 0,7$  ГПа,  $C_v = (2,2 \pm 0,1)$  км/с,  $\alpha = (0,2 \pm 0,02)$  м<sup>-1</sup>,  $\theta = 141$  мкс.

### 3. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими результатами.

С целью проверки справедливости выбранной модели для стержней из оргстекла проводилось сравнение экспериментальных зависимостей, полученных с тензодатчиков  $\varepsilon(x_{g1}, t)$  и  $\varepsilon(x_{g2}, t)$ , расположенных в сечениях  $x_{g1}$  и  $x_{g2}$  на расстоянии 920 мм, с теоретическими зависимостями. На рис. 3,а приведены экспериментальный профиль  $\varepsilon(x_{g2}, t)$  и расчетный профиль, полученный по профилю  $\varepsilon(x_{g1}, t)$ . На рис. 3,б приведены экспериментальный профиль  $\varepsilon(x_{g1}, t)$  и расчетный профиль, полученный по профилю  $\varepsilon(x_{g2}, t)$ . На рис. 3 видно хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов. Так, среднеквадратичное отклонение рассчитанного профиля деформации от экспериментального при решении как прямой (рис. 3,а), так и обратной (рис. 3,б) задач составляет менее 3%.

Из полученных результатов следует, что простая вязкоупругая модель СЛТ достаточно хорошо описывает изменение формы импульса деформации в волне сжатия, распространяющейся по цилиндрическому стержню из органического стекла. При изменении материала стержней вновь требуется определение параметров модели, так как даже для литого полиметакрилата разных марок параметры модели существенно различаются [5, 6].

Для проверки методики проведены эксперименты по определению  $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы деформирования материала, не чувствительного к скорости деформирования, при использовании стальных стержней и мерных стержней из оргстекла. Независимость от  $\dot{\varepsilon}$  важна, так как из-за различия акустических импедансов металлов и полимеров размеры образцов для испытаний на стальных стержнях и стержнях из оргстекла должны быть различны для получения близких значений  $\dot{\varepsilon}$  в обоих случаях. Совпадение результатов в этих случаях и должно подтверждать работоспособность методики разрезного стержня Гопкинсона с полимерными мерными стержнями.

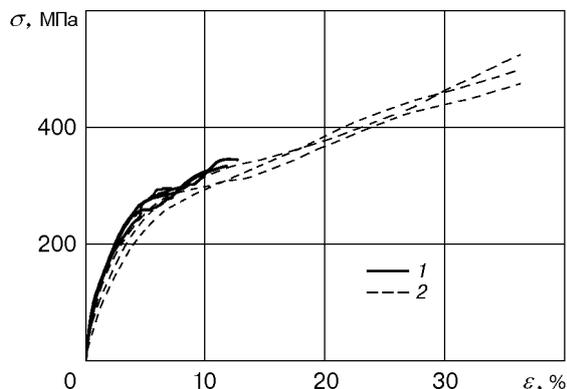


Рис. 4

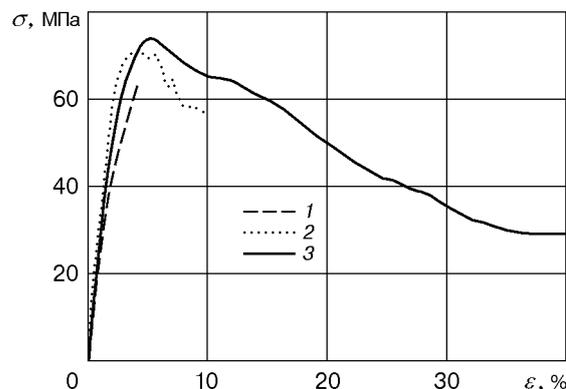


Рис. 5

Рис. 4. Динамические диаграммы деформирования дюралюминия Д16 ( $I = 14 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$ ) с использованием мерных стержней из стали при  $\dot{\epsilon} \approx 6000 \text{ с}^{-1}$  (кривые 1) и оргстекла при  $\dot{\epsilon} \approx 2200 \text{ с}^{-1}$  (кривые 2)

Рис. 5. Статическая диаграмма (кривая 1) и динамические диаграммы сжатия сферопластика ( $\dot{\epsilon} \approx 3000 \text{ с}^{-1}$ ,  $I = 1,38 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$ ) с использованием мерных стержней из стали (кривая 2) и оргстекла (кривая 3)

Согласно [3]  $(\sigma-\epsilon)$ -диаграмма алюминиевых сплавов не зависит от скорости деформирования в диапазоне  $\dot{\epsilon} \sim 10^{-6} \div 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому в качестве тестового материала выбран дюралюминий Д16 [4]. По изложенной выше методике получены  $(\sigma-\epsilon)$ -диаграммы деформирования Д16. В экспериментах использовались мерные стержни из стали и оргстекла. В первом случае при построении диаграмм деформирования использовались закон Гука и стандартная обработка сигналов в отраженной и прошедших волнах, во втором — вязкоупругая модель СЛТ и обработка сигналов для трех волн по общим формулам (1)–(3).

На рис. 4 представлены динамические диаграммы сжатия дюралюминия Д16 для шести опытов. С учетом статистического разброса данных и погрешности методики разрезного стержня Гопкинсона динамическое поведение дюралюминия Д16 при использовании стальных стержней и стержней из оргстекла практически одинаково. Однако при использовании мерных стержней из полимера требуется более сложная обработка сигналов деформации с тензодатчиков. Приведенные на рис. 4 динамические кривые деформирования иллюстрируют повторяемость результатов экспериментов. Определенный по этим кривым динамический предел текучести для Д16 равен  $(250 \pm 20) \text{ МПа}$ .

**4. Определение динамических диаграмм сжатия высокодеформативных материалов.** Для демонстрации возможностей методики полимерного разрезного стержня Гопкинсона получены диаграммы деформирования для нескольких материалов с акустическим импедансом от 0,06 до 1,4 МПа · с/м. Размеры цилиндрических образцов выбирались в соответствии с рекомендациями авторов работы [9]: диаметр  $D_s = 4 \div 12 \text{ мм}$ , длина  $l_s = 2 \div 6 \text{ мм}$  при  $l_s/D_s \approx 0,5$ .

**Сферопластик.** Материал является квазиизотропным композитом с эпоксидной матрицей и дисперсным наполнителем в виде стеклянных микросфер. Объемная плотность материала  $0,63 \text{ г/см}^3$ , статический предел прочности при сжатии примерно 60 МПа. Для данного материала диаграммы деформирования получены на стальных стержнях и стержнях из оргстекла при длине нагружающего импульса около 150 мкс и скорости деформирования  $(3000 \pm 300) \text{ с}^{-1}$  (рис. 5). Наблюдается хорошее соответствие результатов при деформациях менее 10%. Данные подтверждают отмеченное ранее увеличение предела

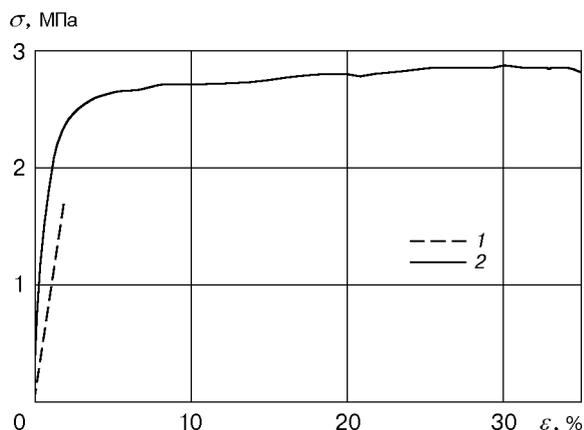


Рис. 6

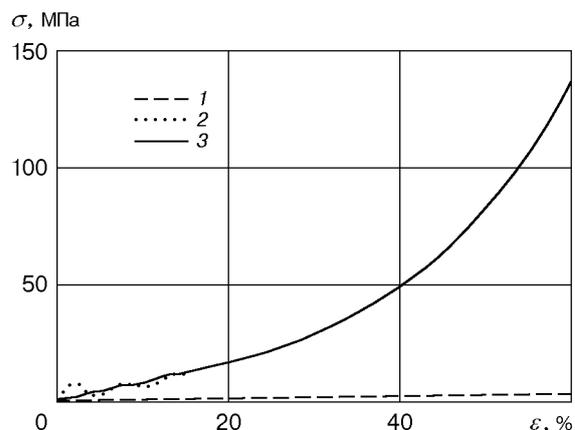


Рис. 7

Рис. 6. Статическая (1) и динамическая (2) диаграммы деформирования пенопласта ПХВ ( $I = 0,05 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$ ,  $\rho = 0,1 \text{ г/см}^3$ ) с использованием мерных стержней из оргстекла

Рис. 7. Статическая диаграмма (кривая 1) и динамические диаграммы сжатия резины ( $I = 0,06 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$ ,  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ ) с использованием мерных стержней из стали (кривая 2) и оргстекла (кривая 3)

прочности при динамическом сжатии в 1,5 раза [12]. Наблюдается также переход в состояние вынужденной эластичности при  $\varepsilon > 4 \div 6 \%$ . Диаграмма сжатия практически не отличается от определенной ранее при  $\varepsilon < 15 \%$  на стальных мерных стержнях, что свидетельствует о достоверности результатов, полученных на мерных стержнях из оргстекла. В то же время удается существенно расширить диапазон деформаций (до 40 %).

*Пенопласт ПХВ.* Диаграмма сжатия пенопласта, имеющего малую плотность (примерно  $0,1 \text{ г/см}^3$ ), наиболее полно демонстрирует возможности методики (рис. 6). Измеренный предел текучести при скорости деформирования  $3000 \text{ с}^{-1}$  равен 2,6 МПа и превышает значение  $1,5 \div 2 \text{ МПа}$  для статических испытаний [10]. Определить диаграмму деформирования пенопласта с использованием металлических мерных стержней не удастся из-за малости амплитуды прошедшей волны.

*Техническая резина.* Данный материал с плотностью  $1,2 \text{ г/см}^3$  выбран как пример высокодеформативного материала с низкими значениями скорости звука (примерно  $50 \text{ м/с}$ ) и модуля упругости. По диаграмме сжатия можно судить о высокой чувствительности диаграммы деформирования материала к скорости нагружения (рис. 7). Так, при статических испытаниях модуль упругости резины при сжатии составляет  $3 \div 5 \text{ МПа}$  [10]. Значение модуля упругости в динамических испытаниях (определялся по наклону участка кривой деформирования при  $\varepsilon \leq 10 \%$ ) при скорости деформирования  $3000 \text{ с}^{-1}$  достигает 100 МПа, что по крайней мере в 20 раз больше статической величины. По-видимому, резина является примером материала с очень высокой чувствительностью диаграммы деформирования к скорости нагружения. Качественно этот результат коррелирует со значительным изменением модуля упругости резины от 25 до 9000 МПа, деформируемой при квазистатических испытаниях на сжатие при гидростатическом давлении 5–10 кбар [13]. Выполняется общий принцип температурно-временной аналогии, согласно которому увеличение скорости деформирования качественно эквивалентно уменьшению температуры испытаний или увеличению внешнего статического давления. При этом уменьшается подвижность основных структурных составляющих материала, что и приводит к резкому увеличению модуля упругости материала.

Необходимо отметить, что при больших деформациях сжатия требуется коррекция (уменьшение) напряжений из-за увеличения площади сечения образца исследуемого материала в процессе сжатия. На данном этапе исследования она не выполнялась, поскольку неясно, как влияет высокая скорость деформирования на значение коэффициента Пуассона для однородных материалов и не происходит ли разрушения твердого каркаса пористых материалов с последующей паковкой материала в процессе сжатия без существенного увеличения диаметра образца. Однако качественный характер динамических диаграмм сжатия при выполнении этой коррекции не изменится.

**Заключение.** В рамках модели стандартного линейного тела реализована техника восстановления профилей деформации, скорости движения материала и напряжения в любом сечении вязкоупругого мерного стержня по профилю деформации, регистрируемому в одном сечении. Хорошее количественное соответствие экспериментальных и расчетных профилей деформации позволяет утверждать, что модель СЛТ адекватна рассматриваемой задаче и выбранному материалу мерных стержней и может быть использована для восстановления профилей скорости и напряжений на торцах образца из исследуемого материала, необходимых для расчета диаграммы деформирования материала на основе метода разрезного стержня Гопкинсона. Достоверность методики подтверждена на примере определения динамической диаграммы дюралюминия Д16 при использовании полимерных и стальных мерных стержней. Возможности методики продемонстрированы на примерах определения динамических диаграмм сжатия низкоплотных малопрочных высокодеформативных материалов (сферопластика, пенопласта ПХВ с плотностью  $0,1 \text{ г/см}^3$  и технической резины) с акустическим импедансом  $0,05\text{--}1,4 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$  и характерными значениями напряжений  $1\text{--}100 \text{ МПа}$  и деформаций до  $50\%$ .

Авторы выражают благодарность А. В. Пластинину за помощь в подготовке и проведении экспериментов на начальной стадии работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кольский Г.** Волны напряжения в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
2. **Дейвис Р. М.** Волны напряжений в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
3. **Николас Т.** Поведение материалов при высоких скоростях деформации // Динамика удара / Под ред. С. С. Григоряна. М.: Мир, 1985. С. 198–256.
4. **Брагин А. М.** Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформирования  $10^2\text{--}10^5 \text{ с}^{-1}$ : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород: Нижегород. ун-т, 1998.
5. **Labibes K., Wang L., Pluvilage G.** On determining the viscoelastic constitutive equation of polymers at high strain-rates // DYMAT J. 1994. V. 1, N 2. P. 135–151.
6. **Wang L., Labibes K., Azari Z., Pluvilage G.** Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars // J. Impact Engng. 1994. V. 15, N 5. P. 669–686.
7. **Sawas O., Brar N. S., Ramamurthy A. C.** High strain rate characterization of plastics using polymeric split Hopkinson bar // Shock compression of condensed matter-1995 / Ed. by S. C. Schmidt, W. C. Tao. N. Y.: Amer. Inst. Phys., 1995. Pt 1. P. 581–584.
8. **Sawas O., Brar N. S., Brockman R. A.** High strain rate characterization of low density low-strength materials // Shock compression of condensed matter-1997 / Ed. by S. C. Schmidt, D. P. Dandekar, J. W. Forbes. N. Y.: Amer. Inst. Phys., 1997. P. 855–858.
9. **Davies E. D., Hunter S. C.** The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar // J. Mech. Phys. Solids. 1963. V. 11. P. 155–178.
10. **Материалы** в машиностроении. Т. 5. Неметаллические материалы: Справ. / Под ред. В. А. Попова. М.: Машиностроение, 1969.

11. **Curtis C. W.** Propagating of an elastic strain pulse in a semi-infinite bar // Intern. symp. on stress waves propagation in material / Ed. by D. Norman. N. Y.: Intersci. Publ., Inc., 1960. P. 15–43.
12. **Пластинин А. В., Сильвестров В. В., Горшков Н. Н.** Определение динамической диаграммы сжатия сферопластика // Механика композит. материалов. 1990. № 3. С. 451–454.
13. **Weaver C. W., Paterson M. S.** Stress-strain properties of rubber at pressures above the glass transition pressure // J. Polymer Sci. 1969. V. 7, pt A-2, N 3. P. 587–591.

*Поступила в редакцию 16/X 2000 г.*

---