

21. Батюков Ю. В., Вишневецкий Е. Д. Аппаратура для измерения импульсных давлений пьезорезистивными датчиками в диапазоне 0,1—20 ГПа.— В кн.: Тезисы докладов II Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М.: изд. ВНИИФТРИ, 1976.
22. Справочник по пластическим массам. Т. 1, 2/Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. М.: Химия, 1975.

УДК 539.4

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Г. В. Степанов

(Киев)

Одна из основных задач механических испытаний материалов — определение их прочностных и деформационных характеристик в зависимости от температурно-временных условий нагружения. При фиксированных температуре и скорости деформации сопротивление исследуемого материала определяется его структурным состоянием (будем условно обозначать  $C$ ), изменяющимся в процессе деформирования в результате совместного действия процессов, связанных с ростом величины пластической деформации и процессов, развивающихся во времени. Их влияние на уровень сопротивления сдвигу  $\tau$  можно оценить модулями деформационного упрочнения  $M_d = \partial\tau/\partial e_p (\partial\tau/\partial t = 0)$  и разупрочнения  $R = -\partial\tau/\partial t (\partial\tau/\partial e_p = 0)$  [1], так что при фиксированной скорости пластического сдвига  $\dot{e}_p$

$$(1) \quad \tau_{\dot{e}_p = \text{const}} = \tau(C_0, \dot{e}_p) + \int_{e_p^0}^{e_p} \left[ M_d - \frac{R}{\dot{e}_p} \right] de_p$$

(индекс 0 соответствует начальному состоянию).

Изменение при фиксированной структуре материала скорости деформации приводит к изменению вязкой составляющей сопротивления. Характеризуя влияние скорости коэффициентом вязкости  $\mu$  — коэффициентом пропорциональности между приращениями скорости и вязкой составляющей сопротивления, — находим

$$(2) \quad \tau_{C=\text{const}} = \tau(C, \dot{e}_p) + \int_{\dot{e}_p^0}^{\dot{e}_p} \mu(C) d\dot{e}_p$$

Учитывая выражения (1), (2), получаем зависимость сопротивления от истории предшествующего деформирования  $e_p(t)$  в виде

$$\tau = \tau(C_0, \dot{e}_p^0) + \int_0^t \left[ M_d \frac{de_p(t)}{dt} - R \right] dt + \int_{\dot{e}_p^0}^{\dot{e}_p} \mu(C) d\dot{e}_p$$

Обычно результаты экспериментальных исследований со сложным режимом нагружения обрабатываются с использованием интегральных уравнений нелинейной наследственной вязкопластичности, например, вида [2]

$$(3) \quad \tau = \varphi(e_p) - \int_{(t)} Q_1(t - \xi) \tau(\xi) d\xi,$$

в которых влияние скорости на вязкую составляющую сопротивления и на изменение структурного состояния как результата взаимодействия процессов деформационного упрочнения и релаксации не разделяется. Такой подход встречает серьезные трудности при описании процесса деформирования со ступенчатым изменением скорости деформации, в котором структура материала практически не изменяется за время изменения скорости, так что изменение сопротивления связано только с изменением его вязкой составляющей. Поэтому более удобным является выделение вязкой составляющей сопротивления и описание изменения сопротивления, связанного с изменением структуры материала, с помощью интегрального уравнения 
$$\int_{(t)} [M_d \dot{e}_n(t) - R] dt = \int_{(t)} Q(t - \zeta) \tau(\zeta) d\zeta.$$

Уравнение деформирования материала (3) при этом преобразуется к виду

$$(4) \quad \tau = \tau(e_n, \dot{e}_n^0) + \int_{(\dot{e}_n^0)}^{\dot{e}_n} \mu d\dot{e}_n,$$

$$\tau(e_n, \dot{e}_n^0) = \tau(e_n^0, \dot{e}_n^0) + \int_{(t)} Q(t - \zeta) \tau(\zeta) d\zeta,$$

где  $\tau(e_n, \dot{e}_n^0)$  — кривая деформирования при статической скорости деформации  $\dot{e}_n^0$  (минимальной для исследуемого диапазона условий нагружения).

При высоких скоростях деформирования влияние процессов, связанных с влиянием времени на структуру материала, несущественно и сопротивление определяется только процессом деформационного упрочнения и вязкой составляющей

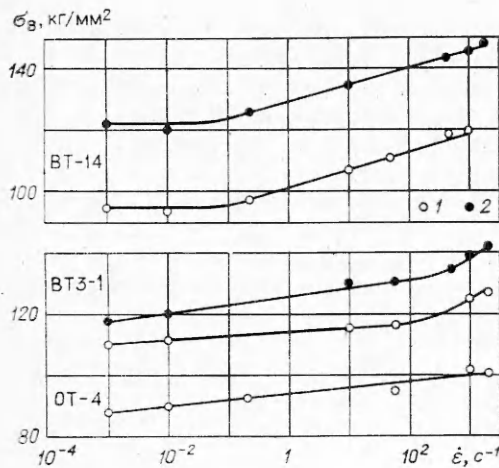
$$(5) \quad \tau = \tau(e_n^0, \dot{e}_n^0) + \int_{(e_n)} M_d de_n + \int_{(\dot{e}_n)} \mu d\dot{e}_n.$$

Используя представление о предельной кривой деформирования как кривой, соответствующей нулевому влиянию процессов релаксации и нулевой величине вязкой составляющей сопротивления,  $\varphi(e_n) = \tau(e_n^0, \dot{e}_n^0) + \int_{(e_n)} M_d de_n$ , получим из (4) выражение

$$(6) \quad \tau = \varphi(e_n) - \int_{(t)} J(t - \zeta) \tau(\zeta) d\zeta + \int_{(\dot{e}_n)} \mu d\dot{e}_n.$$

Уравнение деформирования вида (5) в общем виде представляет зависимость  $\tau = \tau(e_n, \dot{e}_n)$ , которая соответствует поведению материала, нечувствительного к истории предшествующего нагружения. Уравнение (4) или (6) учитывает влияние на кривую деформирования материала предыстории нагружения. Проведение испытаний с постоянной скоростью деформации обеспечивает получение данных о влиянии скорости на характеристики прочности, связанных с изменением структуры материала при деформировании с постоянной скоростью и с изменением вязкой составляющей сопротивления. Эти результаты только при высоких скоростях деформации можно считать не связанными с заданным законом деформирования.

По результатам экспериментальных исследований в диапазоне скоростей  $\dot{e}_n < 10^2 - 10^3 \text{ с}^{-1}$  сопротивление является кусочно-линейной функцией логарифма скорости деформации  $\tau = \tau_1 + K(e_n) \ln(\dot{e}_n/\dot{e}_1)$  ( $\tau_1$  — сопротивление при скорости  $\dot{e}_1$ ,  $K(e_n)$  — коэффициент динамичности,



Ф и г. 1

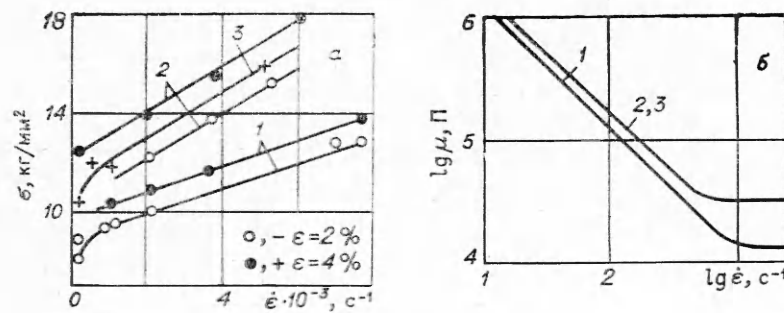
$K = \partial\tau/\partial \ln \dot{\epsilon}_n$ ). На фиг. 1 приведены результаты испытаний образцов из титановых сплавов с рабочей частью диаметром 4 мм и длиной 10 мм (точки 1 — пределы прочности в состоянии поставки, 2 — в термоупрочненном состоянии).

В диапазоне высоких скоростей деформации ( $\dot{\epsilon}_n > 10^3 \text{ c}^{-1}$ ) сопротивление является линейной функцией скорости деформации [3, 4]. Такой характер зависимости сопротивления от скорости деформации по дислокационной модели пластического течения металлов связан с термоактивируемым освобождением дислокаций

от закрепления в точках с потенциальным барьером примерно одного уровня (при  $\dot{\epsilon}_n < 10^3 \text{ c}^{-1}$ ) и с атермическим движением дислокаций при высоких скоростях деформации.

Наличие нескольких участков линейной зависимости сопротивления от логарифма скорости деформации может быть связано с различным типом барьеров в точках закрепления дислокаций, контролирующих их движение в ограниченном диапазоне скоростей деформации. Вследствие отмеченного выше возможного влияния истории предшествующего нагружения коэффициент вязкости  $\mu_c = (\partial\tau/\partial\dot{\epsilon}_n)_{c=\text{const}}$  не является коэффициентом пропорциональности между приращением сопротивления и скорости деформации в таких испытаниях, совпадая с ним только при высоких скоростях деформации ( $\dot{\epsilon}_n > 10^3 \text{ c}^{-1}$ ) или низких температурах (по сравнению с температурой рекристаллизации). Поэтому влияние скорости на сопротивление металлов деформации по результатам квазистатических испытаний связано с ростом вязкой составляющей сопротивления, определяемой коэффициентом вязкости  $\mu_c = (\partial\tau/\partial\dot{\epsilon}_n)_{c=\text{const}}$  и влиянием процессов релаксации. «Кажущийся» коэффициент вязкости  $\mu = (\partial\tau/\partial\dot{\epsilon}_n)_{\dot{\epsilon}_n=\text{const}}$  является основной характеристикой, определяемой в экспериментах с различной скоростью деформирования, служащей для характеристики чувствительности материала к скорости деформации.

Если исследование материалов при скоростях деформации ниже  $10^3 \text{ c}^{-1}$  не представляет затруднений и может быть проведено путем квазистатических испытаний (в объеме рабочей части образца поддерживается однородное напряженное и деформированное состояние в процессе



Ф и г. 2

испытания, как и при статических испытаниях), то исследование при более высоких скоростях требует использования специальных методик. Влияние эффектов продольной и радиальной инерции, волновых процессов в образце и других элементах цепи нагружения приводит к нарушению заданного напряженного состояния в рабочей части образца и снижению точности определения напряжений; поэтому для диапазона высоких скоростей деформации наиболее приемлемо испытание с постоянной скоростью деформирования (ускорения и усилия, связанные с инерционными эффектами, несущественны при таком законе нагружения). Методики таких испытаний на растяжение со скоростью до  $4,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  и на сжатие — до  $2,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  приведены в работах [5, 6].

Определенный по результатам квазистатических испытаний коэффициент  $\mu = \partial\tau/\partial\dot{e}_n$  снижается с ростом скорости деформации до некоторой минимальной величины при скорости  $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

На фиг. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных работы [7] для температур испытаний 295; 194 и 77,4 К (кривые 1 — 3 соответственно). Проследить эту зависимость в области скоростей деформации выше  $10^5 \text{ с}^{-1}$  по результатам квазистатических испытаний невозможно вследствие нарушения однородности деформации в рабочей части образца.

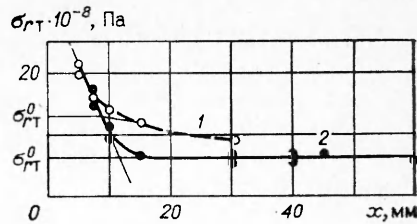
Наиболее надежным методом изучения особенностей высокоскоростного деформирования является анализ закономерностей распространения продольных упругопластических волн нагрузки. Возможность не учитывать влияния истории нагружения позволяет использовать при анализе уравнение состояния в виде  $F(\tau, e_n, \dot{e}_n) = 0$ . Наиболее высокая скорость деформации имеет место на фронте пластической волны, однако проявление реологического поведения материала только в изменении скорости волны затрудняет нахождение параметров поведения материала, характеризующих процесс высокоскоростной деформации. Поэтому анализ приведенных в литературе данных ограничен оценкой величины динамического предела текучести по амплитуде упругого предвестника. Аналитические решения для затухания амплитуды упругого предвестника плоской волны в материале с постоянным коэффициентом вязкости и модулем деформационного упрочнения могут быть использованы для нахождения коэффициента вязкости металлических материалов при наиболее высоких скоростях деформирования. Методика оценки коэффициента вязкости и скорости пластической деформации по экспериментальной кривой затухания амплитуды упругого предвестника приведена ниже.

Для материала с постоянным коэффициентом вязкости  $\mu = (\partial\tau/\partial\dot{e}_n)_{e_n}$  и постоянным модулем деформационного упрочнения  $M = \partial\tau/\partial e_n$  напряжения и деформации при распространении волны, вызванной плоским соударением со скоростью  $v_0$  пластин из одного материала, определяются выражениями [8]

$$(7) \quad \frac{\sigma_r - \sigma_{rT}^0}{\sigma_{rT}^0} \approx H(t - x/a_0) v_n (B + cA);$$

$$(8) \quad \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{rT}^0}{\varepsilon_{rT}^0} \approx H(t - x/a_0) v_n (B + A), \quad v_n = \frac{v_0}{2a_0 \varepsilon_{rT}^0} - 1,$$

$$B = \exp\left(-\frac{1+c}{2\zeta}t + \frac{cx}{a_0\zeta}\right) I_0\left(\frac{1-c}{2\zeta}\sqrt{t^2 - x^2/a_0^2}\right), \quad A = \int_{x/(a_0\zeta)}^{t/\zeta} B dt,$$



Ф и г. 3

Т а б л и ц а 1

Материал	$\nu$	$\frac{E \cdot 10^{-4}}{\text{кг/мм}^2}$	$\frac{G \cdot 10^{-4}}{\text{кг/мм}^2}$	$\alpha$ , мм	$\sigma_{rT}^0 (\sigma_{rT}^0)$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{rT} (\sigma_{rT})$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\xi$ , мкс	$\mu \cdot 10^{-4}$ , $\frac{\text{г}}{\text{см}}$	$\dot{\epsilon}_{\text{II}}$ , с <sup>-1</sup>
Сплав В95	0,31	0,74	0,27	7	70(38,5)	160(88)	0,063	1,7	$1,4 \cdot 10^5$
Ст. 20	0,29	2,10	0,81	5	90(53,0)	210(124)	0,047	3,8	$4,4 \cdot 10^4$
Алюминий *	0,31		0,27	1,7	6,5(3,6)	9,0(5,0)	0,015	0,4	$1,1 \cdot 10^4$

\* Расчет по экспериментальным результатам, приведенным в работе [9].

где  $\sigma_{rT}^0, \epsilon_{rT}^0$  — статические предел текучести и соответствующая деформация для плоской волны;  $K, G$  — модули объемной упругости и сдвига соответственно;  $I_0$  — функция Бесселя от мнимого аргумента;

$c = (K + \frac{4}{3}M) / (K + \frac{4}{3}G)$ ;  $\xi = \frac{\mu}{G}$ ;  $a_0 = \sqrt{(K + \frac{4}{3}G) / \rho_0}$ ;  $H(\varphi)$  — единичная функция Хевисайда.

Скорость пластической деформации на фронте упругого предвестника плоской волны ( $\dot{\epsilon}_{\text{II}} = \dot{\epsilon}_r - \dot{\tau}/G$ ) определяется с использованием преобразования по Лапласу выражением

$$(9) \quad \zeta \dot{\epsilon}_{\text{II}}(p, x) = \frac{p}{p+1} \left(1 - \frac{M}{G}\right) \bar{\epsilon}_r(p, x),$$

$$\dot{\epsilon}_{\text{II}}(t, x) \approx H(t - x/a_0) v_{\text{II}} \frac{\dot{\epsilon}_{rT}^0}{\xi} \left(1 - \frac{M}{G}\right) B,$$

полученным с учетом зависимости сопротивления сдвигу  $\bar{\tau} = \tau - \tau_T$  от деформации  $\bar{\epsilon}_r = \epsilon_r - \epsilon_{rT}^0$  при напряжениях выше статического предела текучести  $\bar{\tau}(p, x) = \frac{p+M/G}{p+1} \bar{\epsilon}_r(p, x) G$ .

Из выражений (7) — (9) находим напряжение, деформацию и скорость пластической деформации на фронте упругого предвестника и вблизи него ( $x = a_0 t$ ):

$$(10) \quad \sigma_{rT} - \sigma_{rT}^0 \approx H(t - x/a_0) \rho_0 a_0 \left(\frac{v_0}{2} - \frac{\sigma_{rT}^0}{\rho_0 a_0}\right) \exp\left(-\frac{1-c}{2\xi a_0} x\right),$$

$$\epsilon_{rT} - \epsilon_{rT}^0 \approx H(t - x/a_0) \left(\frac{v_0}{2} - \frac{\sigma_{rT}^0}{\rho_0 a_0}\right) \exp\left(-\frac{1-c}{2\xi a_0} x\right) / a_0,$$

$$\dot{\epsilon}_{\text{II}} \approx H\left(t - \frac{x}{a_0}\right) \left(\frac{v_0}{2} - \frac{\sigma_{rT}^0}{\rho_0 a_0}\right) \exp\left(-\frac{1-c}{2\xi a_0} x\right) / (a_0 \xi).$$

Выражения (10) справедливы при постоянных  $M$  и  $\mu$ . Для реальных материалов они не являются константами и изменяются в зависимости, как указано выше, от деформации и скорости деформации (их пластических составляющих). Считая, что в каждый момент времени затухание предвестника определяется соответствующим этому моменту уровнем напряжений и коэффициента вязкости, можно определить величину последнего

$$(11) \quad \mu = G\xi = \frac{2}{3} G \frac{(G-M)}{\left(K + \frac{4}{3}G\right) a_0} \frac{\sigma_{rT} - \sigma_{rT}^0}{\left(\frac{\partial \sigma_{rT}}{\partial x}\right)}$$

На фронте упругого предвестника скорость пластической деформации связана с амплитудой предвестника:

$$(12) \quad \dot{\epsilon}_{\text{II}} = (\sigma_{rT} - \sigma_{rT}^0) \left(1 - \frac{M}{G}\right) / (\rho_0 a_0^2 \xi).$$

Таблица 2

Метод экспериментального определения	Материал	$\dot{\epsilon}_n, \epsilon^{-1}$	$\mu, \text{E}$	Источник экспериментальных данных
I	Алюминиевый сплав	До $6 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$	[10]
	Ст. 6	До $6 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$	
II	Ниобий		$2,2 \cdot 10^6$	[11]
	Ст. 3		$3,9-4,8 \cdot 10^5$	
III	Армко-железо	$>10^3$	$2,5 \cdot 10^4$	[5]
	Мягкая сталь	$>10^3$	$2,1 \cdot 10^4$	[4]
	Ст. 20	$10^4-5 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	[15]
	Ст. 45	$>10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	[5]
	Алюминий	$>10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	[8]
	Сплав Д16	$10^4-5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	[15]
	»	$10^4-1,5 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$	[6]
IV	Сплав АЛ9	$4 \cdot 10^5-8 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$	[13]
	Свинец	$\sim 10^7$	$3,7 \cdot 10^4$	
	Ртуть		$0,8 \cdot 10^4$	[12]
	Вода		$2,2 \cdot 10^4$	
V	Ст. 20	$10^4-10^5$	$3,2 \cdot 10^4$	По скоростной зависимости откольной прочности [14]
	Сплав В95	$10^4-10^5$	$0,5 \cdot 10^4$	
	Алюминиевый сплав	$10^4-10^5$	$3 \cdot 10^4$	
VI	Сплав В95	$1,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^4$	По затуханию упругого предвестника (см. табл.1)
	Ст. 20	$4,4 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	
	Алюминий	$1,1 \cdot 10^4$	$0,4 \cdot 10^4$	

Используя выражение (11) для коэффициента вязкости, из (12) находим

$$(13) \quad \dot{\epsilon}_n = \frac{3}{2} \frac{v_0}{G} \frac{\partial \sigma_{rT}}{\partial x}$$

Представляет интерес количественная оценка скорости деформации на фронте упругого предвестника в металлах. По расчетам при времени релаксации  $0,05 \text{ мкс}$ ,  $v_0 - v_T = 200 \text{ м/с}$  скорость пластического сдвига равна  $4,5 \cdot 10^3$  и  $3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  на удалении 5 и 10 мм от нагружаемой поверхности соответственно. Оценка подтверждает указанный ранее вывод о протекании процессов высокоскоростной деформации только вблизи поверхности нагружения (принято  $M = 0$ ,  $\sigma_{rT}^0$  — точка пересечения двух участков кривых на фиг. 3).

С использованием выражений (13) величина предела текучести, рассчитанная по амплитуде упругого предвестника,  $\sigma_T = \sigma_{rT} \frac{1-2\nu}{1-\nu}$  ( $\nu$  — коэффициент Пуассона) может быть определена как функция скорости и сопоставлена с результатами квазистатических испытаний в общем для них диапазоне скоростей. Основной источник погрешности в величине коэффициента вязкости и скорости деформации — пренебрежение величиной модуля деформационного упрочнения, величина которого при высокоскоростной деформации неизвестна.

Расчетные значения пределов текучести и коэффициентов вязкости при высокоскоростном деформировании стали Ст. 20 и алюминиевого сплава В95, определенные по затуханию амплитуды упругого предвестника (кривые 1 и 2 на фиг. 3), приведены в табл. 1. Скорость пластической де-

формации и коэффициент вязкости определялись по наклону участков кривой при  $x < 10$  мм. Массовая скорость за фронтом волны 200 м/с.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов вязкости, определенные различными методами при  $T = 20^\circ\text{C}$ . По результатам квазистатических испытаний III, по скоростной зависимости откольной прочности V и по затуханию упругого предвестника VI значения коэффициентов близки (результаты, полученные одинаковыми методами, представлены в группах строк I—VI).

Поступила 11 XII 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г. В. Модель механического поведения металлических материалов при действии нагрузок импульсного характера.— Проблемы прочности, 1978, № 5.
2. Работнов Ю. Н. Теория ползучести.— В кн.: Механика в СССР за 50 лет. Т. 3. М.: Наука, 1972.
3. Weertman J. High velocity dislocations.— In: Response of metals to high velocity deformation. N. Y.—L.: Interscience Publ., 1961.
4. Campbell J. D., Fergusson W. G. The temperature and strain — rate dependence of the shear strength of mild steel.— Rhilos. Mag., 1970, vol. 21, N 1.
5. Степанов Г. В. Упругоэластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок.— Киев: Наукова думка, 1979.
6. Степанов Г. В., Астанин В. В. Испытание металлов на ударное сжатие с высокой скоростью.— Проблемы прочности, 1980, № 2.
7. Hauser F. E. Techniques for measuring stress — strain relation at high strain rates.— Exp. Mech., 1966, N 8.
8. Степанов Г. В. Распространение плоских волн в вязкопластичном материале с линейным упрочнением.— Проблемы прочности, 1975, № 8.
9. Arvidsson T. E., Gupta Y. M., Duvall G. E. Precursor decay in 1060 aluminium.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 10.
10. Попов С. М. Абсолютная вязкость стали.— Инженерный сб., 1941, № 1.
11. Захаренко И. Д., Мали В. И. Вязкость металлов при сварке взрывом.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
12. Минеев В. Н., Зайдель Р. М. Вязкость воды и ртути при ударном нагружении.— ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 6.
13. Минеев В. Н., Савинов Е. В. Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии.— ЖЭТФ, 1967, т. 52, № 3.
14. Степанов Г. В. Взаимосвязь сопротивления деформации при одноосном напряженном состоянии и разрушающих напряжений при отколе для металлов.— Проблемы прочности, 1979, № 12.
15. Степанов Г. В. Испытание на растяжение с высокой скоростью металлических листовых материалов.— Проблемы прочности, 1980, № 7.

УДК 620.178.7

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ТРУБЧАТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕШЕРОВ

*Б. В. Багрянов, Г. А. Касков, С. А. Новиков, В. А. Синицын*

*(Москва)*

При исследовании динамической прочности конструкций и материалов нагружение объектов испытаний обычно осуществляется прямоугольными или трапецеидальными импульсами давления. При этом их амплитуда и длительность действия варьируются в широких пределах. Такой нагружающий импульс давления можно получить при ударном нагружении через специальный демпфер, у которого зависимость усилия от величины сжатия имеет участок, где сжимающее усилие постоянно. Примером материала такого демпфера может служить пенополистирол [1—3]. Однако широкому использованию пенополистирола для этих целей препятствуют нестабильность его прочностных характеристик, ухудшающая воспроизводимость результатов испытаний, и сравнительно малая прочность, ограничивающая уровень создаваемых нагрузок. В этом отношении более универсальными возможностями обладают трубчатые крешеры при их осевом сжатии.