

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. Минсеев В. Н., Зайдель Р. М. Вязкость воды и ртути при ударном нагружении.— ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 6.
13. Минсеев 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.

В работе [4] приводятся результаты статических испытаний крешеров, изготовленных из тонкостенных (отношение толщины стенки  $h$  к радиусу срединной поверхности  $R < 0,05$ ) алюминиевых трубок. Результаты статических и динамических испытаний трубчатых крешеров, изготовленных из поливинилхлорида, приведены в работе [5]. Оба типа крешеров деформировались сходным образом. Процесс осевого сжатия сопровождался потерей устойчивости в малом с образованием осесимметричных и неосесимметричных складок [6]. Усилие сжатия крешера в процессе образования складок изменялось, колеблясь около некоторого среднего значения.

В данной работе приводятся результаты динамических испытаний трубчатых крешеров, изготовленных из стандартных труб (ГОСТ 1947-56; алюминиевые сплавы АД1М, АМцМ, АМг6М, Д16Т). Размеры испытанных крешеров (чаружный диаметр  $d$ , толщина стенки  $h$ , длина  $l$ , относительная толщина стенки  $h/R$ ) и некоторые справочные характеристики трубок, из которых они изготавливались (предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и временное сопротивление  $\sigma_B$ ), приведены в таблице, где даны также некоторые деформационные характеристики крешеров, полученные при обработке результатов экспериментов по динамическому сжатию крешеров: среднее усилие  $N_{ср}$  сжатия крешера на участке диаграммы сжатия без резко выраженного упрочнения, максимальная деформация крешера в экспериментах  $\varepsilon_m$ , величина относительного изменения усилия сжатия на рабочем участке диаграммы сжатия  $\Delta N_1/2N_{ср}$ , величина относительной амплитуды колебаний усилия сжатия крешера при образовании складок  $A_m/2N_{ср}$ .

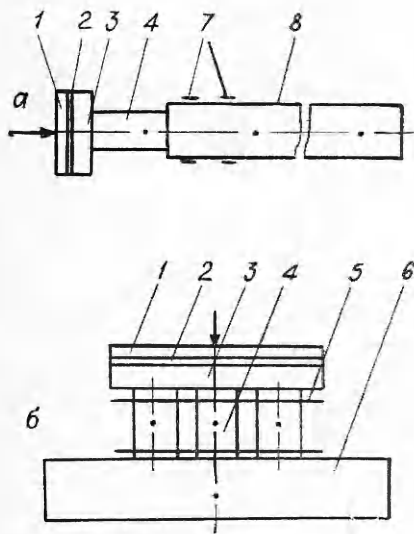
Длина крешеров  $l$  выбиралась из условия сохранения ими устойчивости в большом \* в закритической области деформирования. Для исследованных крешеров экспериментально было найдено, что устойчивость в большом они не теряют при  $l/R \leq 8-10$ .

Деформационные характеристики крешеров определялись как по результатам экспериментов с непрерывной записью сжимающего усилия по методике мерного стержня [7] (фиг. 1, а), так и по результатам опытов, в которых измерялась остаточная деформация крешеров после снятия нагрузки, а усилие сжатия определялось расчетным путем (фиг. 1, б).

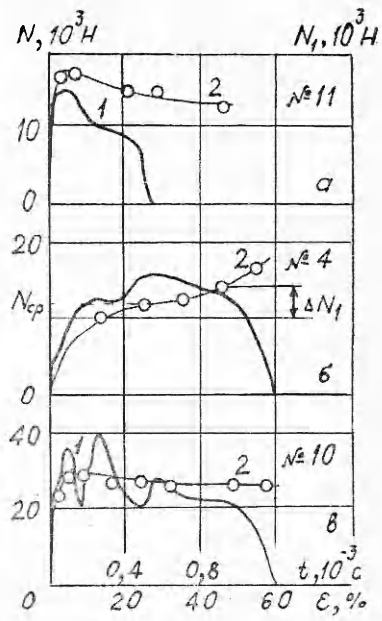
В экспериментах деформирование крешера 4 осуществлялось при ударе по его торцу металлической пластины 3, разгоняемой взрывом помещенного на ней заряда взрывчатого вещества (ВВ) 1. Для предотвращения откола в ударнике 3 между ним и зарядом ВВ помещалась топкая демпфирующая прокладка 2. Другим торцом крешер опирался либо на

Номер крешера	$\varnothing d \times h \times l$ , 10 <sup>-3</sup> м	$h/R$	Материал	$\sigma_{0,2}$ , 10 <sup>7</sup> Н/м <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , 10 <sup>7</sup> Н/м <sup>2</sup>	$N_{ср}$ , 10 <sup>3</sup> Н	$\varepsilon_m$ , %	$\frac{\Delta N_1}{2N_{ср}}$	$\frac{A_m}{2N_{ср}}$
1	$\varnothing 6 \times 1 \times 20$	0,40	АД1М	—	$\leq 12$	3,0	70	0,22	—
2	$\varnothing 8 \times 1 \times 30$	0,29				3,3	70	0,08	—
3	$\varnothing 14 \times 1 \times 50$	0,15				5,0	—	—	0,28
4	$\varnothing 16 \times 2 \times 65$	0,29				12,5	55	0,20	0,08
5	$\varnothing 8 \times 1 \times 30$	0,29	АМцМ	—	$\leq 13$	4,4	70	0,07	—
6	$\varnothing 10 \times 1 \times 40$	0,22				6,2	70	0,04	—
7	$\varnothing 10 \times 2 \times 40$	0,50				Упрочнение			
8	$\varnothing 13,5 \times 1,75 \times 50$	0,30	АМг6М	$\geq 15$	$\geq 32$	26,0	—	—	0,15
9	$\varnothing 14 \times 1 \times 50$	0,15				11,0	—	—	0,40
						27,5	60	0	0,40
10	$\varnothing 20 \times 1,5 \times 80$	0,16	Д16Т	$\geq 26$	$\geq 42$	Разрушение			
11	$\varnothing 10 \times 1 \times 40$	0,22							

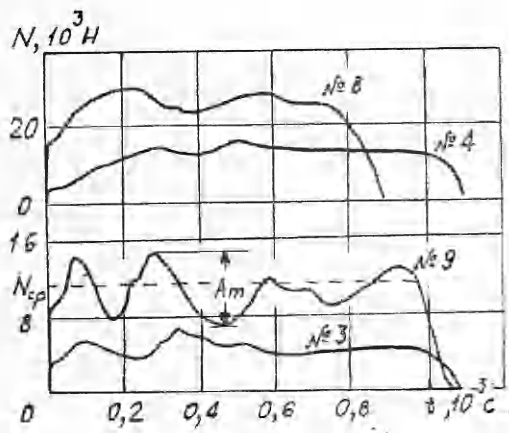
\* Эйлерова форма потери устойчивости.



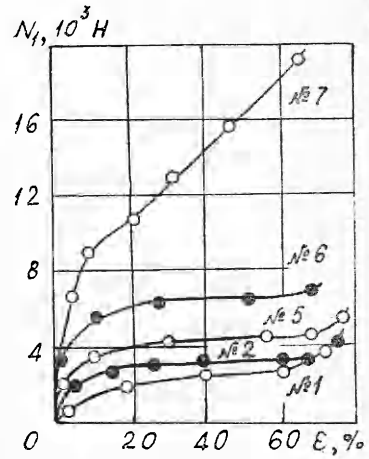
Фиг. 1.



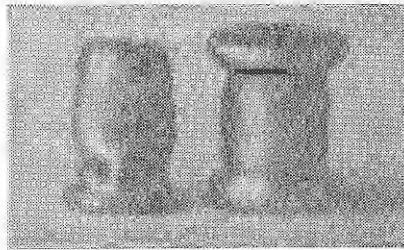
Фиг. 2.



Фиг. 3.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

неподвижное основание 6, либо на мерный стержень 8. При нагружении в одном эксперименте нескольких крешеров для фиксирования их взаимного расположения применялись тонкие картонные прокладки 5. Деформация мерного стержня в экспериментах измерялась с помощью тензорезисторов 7.

Полученные по методике мерного стержня зависимости усилия сжатия  $N$  от времени  $t$  для различных трубчатых крешеров представлены на фиг. 2 (кривые 1) и 3.

В другом использованном в данной работе способе определения деформационных свойств трубчатых крешеров усилие сжатия находилось расчетным путем по известной кинетической энергии ударника  $E$  (в опытах измерялась скорость ударника) и измеренной после опыта деформации крешеров  $\Delta l = \epsilon l$  по формуле [3]  $N_1 = E/\epsilon l$ . При этом делалось два допущения: вся кинетическая энергия ударника идет на сжатие крешеров; на исследованном в каждом опыте участке диаграммы сжатия крешеры сжимаются при действии постоянного усилия.

Последовательно изменяя в экспериментах величину деформации крешеров, можно достаточно точно построить усредненную (интегральную) диаграмму сжатия трубчатых крешеров  $\bar{N}_1 = f(\epsilon)$  (фиг. 2, кривые 2, фиг. 4). Точки на кривых  $N_1 = f(\epsilon)$  соответствуют максимальной деформации крешеров в последовательно проводившихся экспериментах. Вид деформированных крешеров показан на фиг. 5.

Различные трубчатые крешеры как материал для ударного демпфера удобно сравнивать по следующим их характеристикам, приведенным в таблице и на фиг. 2—4 (на фигурах указаны номера крешеров из таблицы):  $\epsilon_m$ ,  $N_{ср}$ ,  $\Delta N_1/2N_{ср}$ ,  $A_m/2N_{ср}$ .

На практике величина максимальной деформации крешера на рабочем участке диаграммы сжатия  $\epsilon_m$  лимитируется заданием допустимой величины изменения усилия сжатия.

Все указанные характеристики трубчатых крешеров зависят от механических свойств материала крешера и от относительной толщины его стенки. Результаты испытаний трубчатых крешеров из алюминиевых сплавов на осевое динамическое сжатие позволяют сделать несколько полезных для практики выводов.

1. Относительная амплитуда колебаний усилия осевого сжатия меньше у крешеров, изготовленных из более мягких сплавов. У этих же крешеров наблюдается хорошее совпадение диаграмм сжатия, полученных с помощью мерного стержня и расчетно по максимальному сжатию (см. фиг. 2, б).

2. Относительная амплитуда колебаний усилия осевого сжатия трубчатых крешеров уменьшается с ростом относительной толщины стенки (см. фиг. 3).

3. У крешеров с толщиной стенки  $h/R > 0,4$  наблюдается заметное увеличение сжимающего усилия (упрочнение) с ростом деформации (фиг. 4, крешер 7).

4. У крешеров с толщиной стенки  $h/R < 0,3$  наблюдается две формы потери устойчивости в малом: сначала у торца, противоположного нагружаемому, образуется осесимметричная кольцевая складка, затем — ромбовидные складки (фиг. 5, а). У крешеров с  $h/R > 0,3$  образуются только кольцевые складки (фиг. 5, б). У крешеров из закаленного сплава Д16Т в процессе деформирования ( $\epsilon > 20\%$ ) стенка трескается по образующей и усилие сжатия уменьшается (фиг. 2, а).

Поступила 11 XI 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Батьков Ю. В., Бодренко С. И. и др. Взрывной метод калибровки пьезоэлектрических акселерометров с использованием пористых демпферов.— В кн.: Доклады I Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. Т. 1. М.: ВНИИФТРИ, 1974.
2. Абашкин Б. И., Забиров И. Х., Русин В. Г. Динамическая сжимаемость пенополистирола.— Механика полимеров, 1977, № 1.

3. Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Исследование динамического сжатия пенополистирола.— ПМТФ, 1977, № 8.
4. Pugsley A. and Macaulay M. The large-scale crumpling of thin cylindrical columns.— Quart. Journ. Mech. and Applied Math., 1960, vol. 13, pt 1.
5. Soden P. D., Al-Hassani S. T. S. and Johnson W. The crumpling of polyvinylchloride tubes under static and dynamic axial loads.— Institute of Physics Conf. Ser. 1974, N 21.
6. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. М.: Физматгиз, 1963.
7. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения.— Механика, 1950, вып. 4.

УДК 539. 4.; 539.379

## МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ С НЕМОНОТОННОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

А. М. Локощенко, С. А. Шестериков

(Москва)

Развитие экспериментальных и теоретических аспектов исследования ползучести и длительной прочности металлов идет все ускоряющимися темпами. Однако к настоящему времени накоплено относительно небольшое количество надежных экспериментальных данных, характеризующих ползучесть металлов вплоть до разрушения в широком диапазоне напряжений. Это объясняется серьезными трудностями, с которыми сталкиваются исследователи при измерении деформаций ползучести образцов, находящихся при постоянных напряжениях (или нагрузках) в условиях высоких температур в течение длительного времени (иногда многих тысяч часов). Поэтому часто такие испытания либо не доводятся до разрушения (т. е. длительная прочность не рассматривается), либо они проводятся до разрушения без замера деформаций в процессе ползучести. Ограниченность и разрозненность фактического материала приводят к тому, что вопрос о формулировке уравнений, описывающих ползучесть материала вплоть до разрушения, даже в случае одноосного напряженного состояния остается открытым.

Наиболее полной при описании процесса ползучести конструкционных металлов является концепция механического уравнения состояния Ю. Н. Работнова [1] с системой кинетических уравнений для определения параметров, характеризующих рассматриваемое состояние. Согласно этой концепции, скорость ползучести  $\dot{p}$  определяется напряжением  $\sigma$ , температурой и некоторым количеством структурных параметров, которые в процессе ползучести изменяются в соответствии с кинетическими уравнениями. При описании длительной прочности чаще всего используется структурный параметр  $\omega(t)$ , который является некоторой мерой «растресканности» материала. Каждому состоянию «растресканности» приписывается значение  $\omega$  из диапазона  $0 \leq \omega \leq 1$ , при этом значение  $\omega = 0$  условно соответствует неповрежденному материалу, значение  $\omega = 1$  — наличию макроскопических трещин.

В случае, когда  $\omega(t)$  — единственный структурный параметр, ползучесть материала вплоть до разрушения можно описать следующей системой уравнений:

$$(1) \quad \dot{p} = f(\sigma, \omega), \quad \dot{\omega} = \varphi(\sigma, \omega).$$

При описании ползучести, характеризуемой установившейся и ускоряющейся стадиями, чаще всего пользуются уравнениями (1) в виде простых зависимостей степенного типа:

$$(2) \quad \dot{p} = a\sigma^n(1 - \omega)^{-s};$$

$$(3) \quad \dot{\omega} = b\sigma^k(1 - \omega)^{-r}.$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  при неизменной температуре можно считать постоянными. Рассмотрим случай хрупкого разрушения, когда вследствие относительной малости деформаций можно пренебречь изменением площади