

l_2-l_1 , мм	t_n , мкс	Эффект
60	-2,0	Отказ
80	1,0	»
100	3,5	»
100	3,5	Неполный взрыв
100	3,5	Детонация
120	8,0	Неполный взрыв
130	9,0	»
140	10,5	Детонация

ки ТНТ имел вид прессованного заряда, то он детонировал, что сопровождалось дроблением сборки и характерным отпечатком на свинцовом свидетеле. Время пребывания ТНТ от момента прихода фронта ударной волны до прихода импульса инициирующей таблетки t_n изменялось разностью хода детонационных волн (l_2-l_1) по ленте ВВ ($\delta=0,3$ мм)

$$t_n = \frac{2(l_2-l_1)}{D} - t\Delta. \quad (4)$$

В таблице приведена нижняя оценка t_n , для чего время пробега ударной волны в ТНТ принимается равным $t_3 = \Delta/c$, где c скорость звука. Видно, что перестройка структуры литого ТНТ в условиях опыта имеет порядок 10 мкс. Очевидно, это объясняется перестройкой структуры под действием волны разгрузки.

Во взрывчатых веществах со значительными неоднородностями (пористость) отдельные зерна в ходе ударного сжатия всего образца испытывают сжатие и разгрузку, которая, по всей вероятности, приводит к растрескиванию зерен. В этом случае степень и в особенности время дробления зерна (а следовательно, и изменения структуры образца в целом) определяются размером зерен в исходной структуре.

Таким образом, при ступенчатом сжатии гетерогенного ВВ чувствительность последнего может в определенных случаях превышать чувствительность к однократному сжатию.

Поступила в редакцию
8/XII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Летягин, В. С. Соловьев и др. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
3. М. И. Бражник, Л. В. Альтшулер, А. А. Тарасов. ФГВ, 1969, 5, 4.
4. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов. — В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., «Недра», 1967.
5. И. М. Воскобойников и др. ФГВ, 1972, 8, 4.
6. А. В. Дубовик, И. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 2, 4.
7. С. Г. Андреев, В. С. Соловьев. ФГВ, 1972, 8, 1.
8. H. Eyring., D. E. Powell a. o. Chem. Rev; 1949, 45, 69.
9. M. C. Chick. 4-th Symposium (International) on Detonation, Maryland, 1965.

УДК 539.375.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО РАСШИРЕНИЯ ТОНКИХ КОЛЕЦ ИЗ ОТОЖЖЕННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

*В. А. Рыжанский, В. Н. Минеев, В. И. Цыпкин,
А. Г. Иванов, О. А. Клещевников*

(Москва)

В последние годы проводятся многочисленные исследования поведения металлических труб при их взрывном нагружении изнутри. В [1—5] описаны эксперименты, в которых стенки труб расширились

со скоростью $\omega \geq 1$ км/с. В [6] скорость расширения стенок труб составляла менее 1 км/с. В этих работах отмечается высокая пластичность материала труб, деформация которых к моменту разрушения составляла 20—100%, а иногда и более [5]. Кроме этого, в [6] приводятся данные о наличии масштабного эффекта при деформации труб различных размеров. В [7—9] методом взрывного расширения колец исследовалось образование трещин и разрушение различных металлов. В работах [10, 11] этим методом были получены динамические зависимости $\sigma - \epsilon$ для ряда конструкционных сплавов. Метод позволяет получать зависимости $\sigma - \epsilon$ при постоянной скорости деформации без каких-либо допущений о напряженно-деформированном состоянии материала.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования взрывного расширения колец из отожженного алюминия Д16. Обработка эксперимента позволила получить зависимость $\sigma - \epsilon$ при скоростях деформации 100—2000 с⁻¹.

Экспериментальное устройство состояло из тонкого кольца из отожженного дюралюминия Д16, плотно насаженного на массивный полый стальной шар. В полости шара помещался без зазора заряд взрывчатого вещества ТГ 50/50, инициируемый в центре. При детонации ВВ сферическая ударная волна сжатия подходит к кольцу и отражается от его наружной поверхности в виде волны разряжения. При прохождении ее через поверхность контакта кольца с шаром, кольцо отделяется от шара и продолжает радиально расширяться по инерции.

Для регистрации процесса радиального перемещения кольца во времени использовался СФР, работавший в режиме щелевого регистратора. В каждом опыте время регистрации ограничено появлением в поле зрения СФР продуктов взрыва при разрушении шара.

В процессе экспериментального исследования было проведено 9 опытов, в которых менялись начальные величины среднего радиуса кольца и радиуса ВВ ($R_0, R_{ВВ}$), при неизменных толщине (δ) и высоте (h) колец. Исходные размеры колец и зарядов ВВ приведены в таблице. Варьирование размеров позволяло расширять кольца с различными начальными скоростями. На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость $\ln \epsilon_0' - \ln(R_0/R_{ВВ})$, где $\epsilon_0' = \omega_0/R_0$ — начальная скорость деформации кольца, ω_0 — начальная скорость радиального перемещения кольца.

О деформации колец в опытах можно судить по рис. 2, на котором приведены экспериментальные зависимости $\epsilon - t$, где $\epsilon = \ln(R/R_0)$ — истинная (логарифмическая) деформация кольца, R — текущее значение среднего радиуса кольца, t — время, отсчитываемое от момента начала движения кольца. Номера кривых на рисунке соответствуют номерам опытов в таблице.

Для определения механических свойств исследуемого материала при статическом деформировании были проведены испытания на растяжение образцов, изготовленных из тех же заготовок, что и кольца, и прошедших термообработку (отжиг) вместе с кольцами. Полученные при этом диаграммы растяжения были обработаны по методике, указанной в [12], с целью

Параметры экспериментального устройства и результаты опытов

Номер опыта*	R_0 , мм	$R_{ВВ}$, мм	$A_1 \cdot 10^3$, 1/с	$A_2 \cdot 10^6$, 2/с	S , %	ϵ_0' , 1/с
1	54,5	22	3,40	14,0	0,25	3400
2	81,5	27	2,03	6,7	0,20	2030
3	54,5	17	1,68	12,8	0,12	1680
4	81,5	22	1,08	6,0	0,03	1080
5	81,5	22	1,04	6,0	0,04	1040
6	108,0	27	0,88	3,4	0,06	880
7	54,5	13	0,73	7,0	0,04	730
8	108,0	27	0,70	2,6	0,04	700
9	108,0	22	0,31	2,33	0,01	310

* Во всех опытах $\delta=2$ мм, $h=5$ мм.

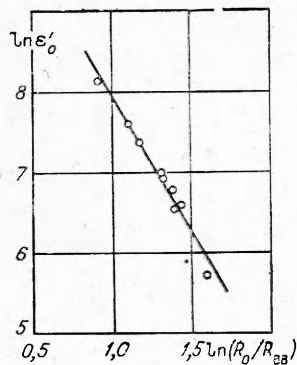


Рис. 1. Зависимость $\ln \varepsilon'_0 - \ln(R_0/R_{\text{ВВ}})$ для колец с сечением 2×5 мм.

определения статической зависимости истинных напряжений от истинных деформаций (см. рис. 4).

Анализ кинограмм показал, что кольца расширялись симметрично. В большинстве случаев после максимальной деформации колец имело место их некоторое возвращение как результат упругого поведения материала (см. рис. 2, 3—9). В одном из опытов был зарегистрирован переход процесса расширения кольца в затухающие упругие колебания (см. рис. 2, 6).

Симметричное расширение по инерции тонкого кольца описывается дифференциальным уравнением [9, 10]

$$\rho R (d^2R/dt^2) = -\sigma, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала кольца; σ — истинное напряжение в окружном направлении. Используя понятие истинной (логарифмической) деформации, имеем

$$R(t) = R_0 e^{\varepsilon(t)}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$\sigma = -\rho R_0^2 e^{2\varepsilon} (\varepsilon'' + \varepsilon'^2), \quad (3)$$

где $\varepsilon'' = d(\varepsilon')/dt$; $\varepsilon' = d\varepsilon/dt$ — скорость деформации.

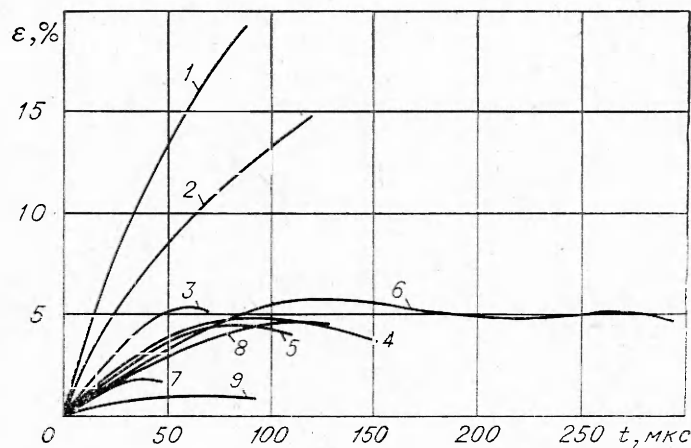


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\varepsilon - t$.

Формула (3) позволяет определить истинное напряжение с помощью экспериментальной зависимости $\varepsilon - t$, для чего ее необходимо дважды продифференцировать. Поскольку графическое дифференцирование приводит к большим погрешностям, целесообразно заменить экспериментальную зависимость $\varepsilon - t$ близкой к ней аналитической зависимостью, дифференцирование которой обеспечивало бы получение значений ε' и ε'' с требуемой точностью.

Для определения вида аналитической зависимости $\varepsilon - t$ рассмотрим исходное дифференциальное уравнение (1). В случае идеального жесткопластического тела

$$\sigma = \sigma_0 = \text{const}. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (1) с учетом (4), получим первый интеграл

$$dR/dt = w = w_0(1 - a^{-2} \cdot \epsilon)^{1/2},$$

где $a = w_0(\rho/2\sigma)^{1/2}$.

Второй интеграл имеет вид

$$t = \frac{2R_0 a^2 \cdot e^{a^2}}{w_0} \left\{ 1 - (1 - a^{-2} \cdot \epsilon)^{1/2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n a^{2n}}{n!(2n+1)} [1 - (1 - a^{-2} \cdot \epsilon)^{1/2(2n+1)}] \right\}.$$

Полученное выражение представляет собой степенную зависимость $\epsilon - t$. Можно показать также, что степенная зависимость $\epsilon - t$ получается и в случае модели жесткопластического тела с линейным упрочнением.

Итак, при анализе исходного дифференциального уравнения (1) естественным образом вытекает возможность использования степенной функции для аппроксимации экспериментальной зависимости $\epsilon - t$. Наибольший интерес представляет участок этой зависимости в интервале $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\max}$ (ϵ_{\max} — максимальная деформация кольца в опыте). Участок может быть аппроксимирован квадратичной параболой, имеющей вертикальную ось симметрии. Поэтому в качестве аппроксимирующего полинома была использована параболическая зависимость

$$\epsilon = A_1 t - A_2 t^2, \quad (5)$$

где A_1, A_2 определялись по результатам каждого опыта методом наименьших квадратов. Численные значения этих коэффициентов, а также среднее квадратическое отклонение (s) параболы (5) от экспериментальной зависимости $\epsilon - t$ приведены в таблице.

Для определения необходимых в дальнейшем зависимостей $\epsilon' - \epsilon$ и $\sigma - \epsilon$, продифференцируем (5)

$$\epsilon'(t) = A_1 - 2A_2 t, \quad (6)$$

$$\epsilon'' = -2A_2. \quad (7)$$

Используя формулы (3), (5) — (7), получим

$$\epsilon' = (A_1 - 4A_2 \cdot \epsilon)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\sigma = -\rho R_0^2 \cdot e^{2\epsilon} [A_1^2 - 2A_2(1 + 2\epsilon)]. \quad (9)$$

На рис. 3 приведены зависимости (8), (9) по результатам одного из опытов. Построив серию аналогичных кривых по данным других опытов, можно определить зависимость $\sigma - \epsilon$ при $\epsilon' = \text{const}$ [10].

Зависимость $\sigma - \epsilon$ для отожженного сплава Д16 при скоростях деформации 100, 500, 1000 и 2000 1/с приведена на рис. 4. Предел текучести Гюгонио для этого материала составляет 0,2—0,3 ГПа [13]. Сле-

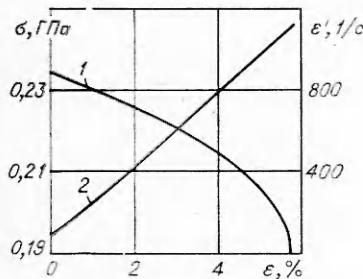


Рис. 3. Зависимости $\epsilon' - \epsilon$ (1) и $\sigma - \epsilon$ (2) по результатам опыта № 5.

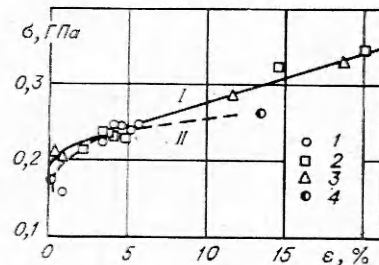


Рис. 4. Зависимости $\sigma - \epsilon$ отожженного алюминиевого сплава Д16. I — динамическая ($\epsilon' = 100-2000$ 1/с); II — статическая. 1 — $\epsilon' = 100$; 2 — $\epsilon' = 500$; 3 — $\epsilon' = 1000$; 4 — $\epsilon' = 2000$ 1/с.

довательно, в случае одноосного напряженного состояния предел текучести равен 0,11—0,17 ГПа, что согласуется с полученной зависимостью $\sigma - \epsilon$.

Подведем итоги проведенного исследования.

1. В эксперименте было получено симметричное радиальное расширение тонких колец из отожженного сплава Д16 с начальной скоростью до 180 м/с, что соответствует скорости деформации ~ 3400 1/с.

2. Значения $\ln \epsilon_0$ находятся в линейной зависимости от $\ln(R_0/R_{ВВ})$, которая может быть выражена аналитически формулой, полученной методом наименьших квадратов

$$\ln \epsilon_0 = 11,34 - 3,39 \ln(R_0/R_{ВВ}).$$

Эта формула получена только для колец с сечением 2×5 мм.

3. При расширении колец с начальной скоростью 30÷90 м/с наблюдалось их торможение до полной остановки с последующим упругим сжатием, переходящим в упругие колебания.

Наибольшая деформация кольца, наблюдавшаяся в опытах ($\sim 19\%$), значительно превышает предельную статическую деформацию данного материала ($\sim 12\%$) и не является, по-видимому, пределом. Это свидетельствует о существенном улучшении пластических свойств материала при динамическом деформировании [6].

4. Замена квадратичной параболой участка экспериментальной зависимости $\epsilon - t$ в интервале $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\max}$ приводит к погрешности при определении напряжений не более 10%.

5. Динамическая зависимость $\sigma - \epsilon$ слабо зависит от скорости деформации в пределах изменения последней до 2000 1/с.

Поступила в редакцию
20/XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. F. E. Allison, R. F. Watson. J. Appl. Phys., 1960, 31, 5, 842.
2. F. E. Allison, I. T. Schriempf. J. Appl. Phys., 1960, 31, 5, 846.
3. C. R. Hoggat, R. F. Recht. J. Appl. Phys., 1968, 39, 3, 1856.
4. Н. С. Санасарян. ФГВ, 1971, 7, 4, 600.
5. А. Г. Иванов, Л. И. Кочкин и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 127.
6. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
7. В. М. Кузнецов. ПМТФ, 1968, 2.
8. Э. А. Кошелев и др. ПМТФ, 1971, 2.
9. В. М. Кузнецов. ФГВ, 1973, 9, 4.
10. C. R. Hoggat, R. F. Recht. Exp. Mech., 1969, 9, 10, 441.
11. P. C. Johnson, B. A. Stein, R. S. Davis. Symposium on Dynamic Behavior of Materials. ASTM Spec. Tech. Pub., 1962, 336.
12. Дж. К. Егер. Упругость, прочность и текучесть. М., Машгиз, 1961.
13. С. А. Новиков, В. А. Синицын и др. ФММ, 1966, 21, 3, 542.

УДК 532.593

ИЗМЕНЕНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛИ ПОСЛЕ НАГРУЖЕНИЯ ПЛОСКИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Т. С. Тесленко

(Новосибирск)

Расчеты затухания плоских ударных волн в металле, приведенные в [1], показывают, что давление на начальном участке убывает довольно быстро. Если учесть, что эти расчеты проведены по газодинамической