

ПЛАСТИЧНОСТЬ, РАЗРУШЕНИЕ И МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

А. Г. Иванов, В. Н. Минаев, В. И. Цыпкин,
Л. И. Кочкин, Л. В. Васильев, О. А. Клещевников
(Москва)

Разрушение тонких металлических труб при взрывном нагружении исследовалось в [1—5]. В опытах, описанных в [1—4], взрывчатое вещество заполняло весь внутренний объем трубы, детонация осуществлялась с торца заряда. В работе [5] изучалось разрушение труб из сталей, алюминиевых сплавов и различных органических материалов при взрыве внутри них сферически-симметричного заряда ВВ, инициируемого в центре. Основным результатом цитируемых работ является обнаружение высокой динамической пластичности исследуемых материалов, которая заключается в том, что к моменту разрушения труб их радиус увеличивается в 1,5—2 раза по сравнению с начальным. В работах [1—5] скорость расширения стенок труб составляла $\omega \geq 1$ км/с.

Целью настоящей работы являлось исследование динамической пластичности, разрушения и масштабного эффекта при деформации тонких стальных труб под действием взрыва в центре трубы сферического заряда ВВ. Заряд ВВ был таким, что энергия, отбираемая стенкой трубы от ВВ, в ряде опытов была соизмерима с энергией диссипации в процессе деформации трубки ($\omega < 1$ км/с).

Эксперимент

Схема постановки опытов и описание регистрирующей аппаратуры изложены в [5]. Использовались цельнотянутые геометрически подобные трубы из Ст. 20 и Ст. 35 с наружными радиусами $R_0 = 35,4; 52$ и 213 мм при относительной толщине стенок $\delta_0/R_0 \sim 4,6\%$. Длина труб была равной двум ее диаметрам. Заряды ВВ из сплава тротил — гексен ТГ 50/50 имели размеры $r = 15,5; 22; 57,5; 65; 90$ и 130 мм.

Процесс взрывного разрушения труб исследовался фоторегистрацией и покадровой съемкой. Общий характер такого разрушения заключается в следующем [5]. После подрыва заряда ВВ труба в центральном сечении всего за 5—20 мкс достигает максимальной скорости (ω_0) при незначительном смещении относительно начального положения. Величину ω_0 в дальнейшем будем называть начальной скоростью. Получив импульс, труба пластически растягивается от радиуса R_0 до R_{\max} , когда происходит ее разрыв трещинами по образующей.

Момент разрушения (T) определялся по прорыву продуктов взрыва через трещины. Обработка $R-t$ -диаграмм экспериментов позволяет определять ω_0 , R_{\max} , T и вычислять максимальные истинные деформации $\epsilon_{\max} = \ln \frac{R_{\max}}{R_0}$ и скорости деформации $\dot{\epsilon} = \frac{\omega}{R}$, а также $\dot{\epsilon}_{\max} = \frac{\omega_0}{R_0}$.

Результаты нескольких серий опытов с геометрически подобными сборками труба — заряд ВВ сведены в таблицу.

Проведенные оценки показывают, что возможные отклонения ω_0 в каждой группе идентичных опытов при имеющемся небольшом разбросе значений r/R_0 и δ_0/R_0 не превышают 2%. (Предполагается, что отбор энергии стенками труб от зарядов ВВ слабо меняется при небольшом изменении r_0/R_0 и δ_0/R_0 [5].) Поскольку ошибки в определе-

№ серии	Материал	r/R_0	R_0 , мм	δ_0/R_0 , %	ω_0 , м/с	R_{\max}/R_0	e_{\max}	T , мкс	Примечания
I	Ст. 20	0,27	213	4,60	100	1,10*	0,105	—	Не разрушилась
II	Ст. 20	0,298	51,97	4,70	130	1,19*	0,174	—	»
		0,298	51,97	4,66	110	1,18*	0,165	—	»
		0,298	51,99	4,70	100	1,16*	0,149	—	»
		0,303	214,50	4,63	120	1,29	0,254	540	Разрушилась
		0,305	213,30	4,63	160	1,27	0,293	480	»
		0,305	213,30	4,64	110	1,28	0,262	560	»
		0,305	213,00	4,18	140	1,29	0,254	415	»
III	Ст. 20	0,421	52,25	4,30	250	1,43	0,357	98	»
		0,421	52,25	4,30	270	1,39	0,329	98	»
		0,421	52,25	4,30	260	1,41	0,243	98	»
		0,422	213,00	4,20	300	1,19	0,174	130	»
		0,422	213,00	4,20	330	1,18	0,165	100	»
		0,422	213,00	4,20	270	1,14	0,131	115	»
		0,422	213,00	4,20	290	1,20	0,183	130	»
IV	Ст. 35	0,621	35,42	4,63	730	1,56	0,445	24	»
		0,621	35,43	4,60	760	1,50	0,406	16	»
		0,621	35,44	4,66	700	1,49	0,399	22	»
		0,621	35,41	4,63	720	1,47	0,385	22	»
	Ст. 20	0,607	214,20	4,62	715	1,30	0,262	100	»
		0,609	213,40	4,68	720	1,29	0,254	90	»

* Деформация на момент прекращения движения стенок труб.

нии \bar{w}_0 составляют 10—20%, то поправки, учитывающие отклонение величин r/R_0 и δ_0/R_0 от средних значений, не вводились.

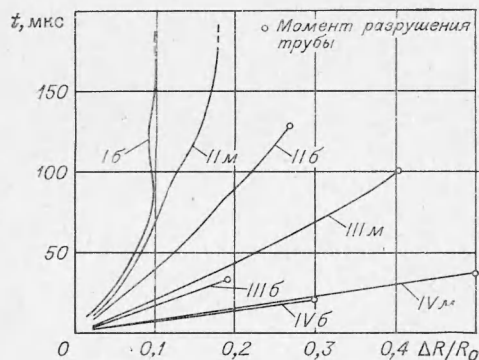
Для иллюстрации процесса взрывной деформации труб на рисунке приведены экспериментальные кривые, полученные усреднением идентичных опытов каждой серии. Для удобства сравнения, интервалы времени на $\frac{\Delta R}{R_0}$ — t -диаграммах рисунка уменьшены в 4,1 раза для труб с $R_0 \approx 213$ мм и увеличены в 1,5 раза для труб с $R_0 = 35,4$ мм. Серии II—IV содержат опыты с большими (б) и малыми (м) сборками.

Анализ результатов опытов показал:

1) начальная скорость разлета труб в каждой серии опытов с точностью до ошибки эксперимента не зависит от характерного размера сборки;

2) в опытах серии II при одинаковых относительных весах зарядов трубы большого диаметра разрушаются, в то время как малые трубы не теряют сплошности;

3) при увеличении относительного радиуса заряда ВВ от 0,31 до 0,61 динамическая пластичность труб с $R_0 \approx 213$ мм меняется слабо и составляет $e_{\max} = 0,16$ — $0,26$. В опытах с геометрически подобными сборками трубы меньшего диаметра перед разрушением характеризуются большей пластичностью в сравнении с большими трубами (серии опытов III, IV);



4) с уменьшением размеров и начальных скоростей труб все большую роль играют процессы торможения. Так, в опытах серии IV скорость разлета труб практически постоянна вплоть до их разрушения, а в опытах серии I и IIм скорость разлета падает до 0. На кривых Iб, IIм, IIб помимо основного процесса разлета наблюдается составляющая колебательного движения, по-видимому, связанная с собственной частотой колебания труб.

Таким образом, результаты опытов свидетельствуют о влиянии масштабного фактора на разрушение, динамическую пластичность и характер разлета труб при взрывном нагружении.

В одном из опытов при фоторегистрации деформации трубы в отраженном свете удалось наблюдать процесс развития трещины на наружной поверхности трубы. Анализ кинограммы показал, что скорость развития трещины в Ст. 20 при $r/R_0=0,42$ и $R_0=52$ мм составляет ~ 300 м/с. Трещина возникла в центральном сечении и росла вдоль образующей трубы.

Обсуждение результатов

Известно, что профиль давления в системе воздушная ударная волна — ПВ ТГ 50/50 на расстояниях $R/r=2\div 4$ представляет скачок с последующим спадом с характерным временем $\theta\sim 5-20$ мкс для использованных в опытах зарядов [6]. Поэтому можно считать, что в нашем случае стенки труб испытывают кратковременный удар ($\theta\ll T$) и последующее их движение происходит по инерции. Об этом свидетельствуют также результаты работы [5].

Оценим роль диссипации энергии за счет сил прочности и вязкости в процессе взрывной деформации труб. Рассмотрим одномерное расширение по инерции в вакуум тонкого кольца, материал которого примем несжимаемым. Упругими силами будем пренебрегать.

Для этой цели воспользуемся дифференциальным уравнением [7], связывающим R , w и окружное напряжение σ

$$-\rho R \frac{dw}{dt} = \sigma, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала кольца.

Если материал кольца — вязкопластическое тело с линейным упрочнением, то

$$\sigma = \sigma_0 + ke + \eta \dot{e}, \quad (2)$$

где σ_0 — статический предел текучести; k — коэффициент упрочнения; η — коэффициент динамической вязкости. Уравнение (1) аналитического решения не имеет.

Пусть $\sigma = \eta \dot{e}$. В этом случае решение уравнения (1) имеет вид:

$$1 - \frac{w}{w_0} = \frac{1 - \frac{R_0}{R}}{\text{Re}}, \quad (3)$$

где $\text{Re} = \frac{\rho w_0 R_0}{\eta}$ — число Рейнольдса. Уравнение (3) можно записать

$$1 - \frac{\sqrt{E}}{\sqrt{E_0}} = \frac{1 - \frac{R_0}{R}}{\text{Re}}, \quad (4)$$

где E — текущее значение кинетической энергии единицы объема мате-

риала кольца, E_0 — начальное значение. Если $\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon$, то решение уравнения (1) имеет вид:

$$1 - \frac{E}{E_0} = \frac{1}{n_1} \ln \frac{R}{R_0} + \frac{1}{n_2} \left(\ln \frac{R}{R_0} \right)^2 = \frac{\varepsilon}{n_1} + \frac{\varepsilon^2}{n_2}, \quad (5)$$

где $n_1 = \frac{\rho \omega_0^2}{2\sigma_0}$, $n_2 = \frac{\rho \omega_0^2}{k}$ — безразмерные параметры. Согласно (5), диссипация энергии вследствие прочности материала не приводит к различию в скорости торможения колец разного масштаба, что согласуется с уравнением (2) при $\eta = 0$. Экспериментально обнаруженное различие в характере разлета труб разного размера в подобных сборках следует отнести за счет вязких сил.

Анализ уравнения (4) показывает, что при полном геометрическом подобии кольцо меньшего размера за счет вязких сил тормозится быстрее. Это позволяет по результатам опытов, используя формулы (4) и (5), оценить коэффициент динамической вязкости стали. По результатам опытов серии II $\eta = 9 \cdot 10^5$ пз, серии III $\eta = 6 \cdot 10^5$ пз, при этом скорость деформирования $\dot{\varepsilon}_{\max} \sim 10^3$ с⁻¹. Предполагалось, что начальная скорость кольца меньшего размера совпадает с начальной скоростью кольца большего размера. Это предположение оправдано следующими соображениями. В работе [6] экспериментально показано, что ударная волна в воздухе полностью определяется безразмерными параметрами. Это означает, что при геометрическом моделировании труб и зарядов ВВ амплитуды падающих и отраженных волн в воздухе совпадают, а изменение временного масштаба определяется геометрическим коэффициентом моделирования. Принимая во внимание кратковременность нагружения, заключаем, что сразу после нагружения напряженные состояния в подобных элементах в соответственные моменты времени одинаковы. Следовательно, одинаковы и их начальные скорости. Это не противоречит эксперименту.

Отметим, что коэффициент динамической вязкости Ст. 45, согласно результатам работы [4], составляет величину $\eta = 3 \cdot 10^5$ пз.

Рассмотрим влияние масштабного фактора на динамическую пластичность. Для этого воспользуемся подходом, развитым в работе [8] для описания масштабного эффекта при динамическом разрушении конструкций. Пусть ε_1 будет означать запас упругой энергии в единице объема материала конструкции. Тогда труба длиной L , радиусом R_0 и толщиной δ_0 будет иметь запас упругой энергии $E_1 \sim \varepsilon_1 R_0 \delta_0 L$. Энергия, необходимая для разрушения материала трубы, определяется выражением $E_2 \sim \varepsilon_2 \delta L$, где δ — текущая толщина трубы, ε_2 — энергия разрушения на единицу поверхности материала. При оценке E_2 воспользовались экспериментальным фактом развития трещины вдоль образующей трубы. Приравняв $E_1 = E_2$ и принимая во внимание, что $R_0 \delta_0 = R\delta$, получим:

$$\frac{R}{R_0} \sim \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{1}{R_0}, \quad (6)$$

где R — радиус разрушения трубы.

Выражение (6) справедливо и для сферически-симметричных оболочек, оно может быть использовано при анализе результатов опытов, приведенных в настоящей работе. Таким образом, параметр динамической пластичности R/R_0 обратно пропорционален начальному радиусу трубы R_0 . Эта зависимость качественно подтверждается результатами, приведенными в таблице.

Ранее масштабный эффект при разрушении был обнаружен при взрывном нагружении сферических стальных колб [8, 9]. Результаты этих исследований были объяснены с точки зрения запаса упругой энергии при хрупком разрушении конструкций [10]. При этом для

радиуса заряда ВВ, приводящего к разрушению колбы, было получено соотношение

$$(r/R_0)^3 \sim R_0^{-0,5}, \quad (7)$$

где R_0 — характерный размер конструкции (в данном случае радиус колбы).

Зависимость (7) не противоречит результатам настоящей работы.

Заметим, что изучение масштабного эффекта при взрывном нагружении технически легче осуществимо, чем при изучении этого эффекта на испытательных машинах. Это связано с тем, что при взрывном нагружении удается моделировать всю систему образец — машина.

*Поступила в редакцию
12/II 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. F. E. Allison, R. W. Watson. J. Appl. Phys., 1960, 31, 5.
2. F. E. Allison, J. T. Schriempf. J. Appl. Phys., 1960, 31, 5.
3. G. R. Hoggatt, R. E. Recht. J. Appl. Phys., 1968, 39, 3.
4. Н. С. Санасарян. ФГВ, 1971, 7, 4.
5. А. Г. Иванов, Л. И. Кочкини др. ФГВ, 1974, 10, 1.
6. В. В. Адушкин. ПМТФ, 1963, 5.
7. G. R. Hoggatt, R. E. Recht. Exp. Mech., 1969, 9, 10.
8. А. Г. Иванов, В. А. Сеницын, С. А. Новиков. Докл. АН СССР, 1970, 194, 2.
9. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Сеницын. ФГВ, 1972, 8, 1.
10. Б. А. Дроздовский, Я. Б. Фридман. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сплавов. М., Металлургиздат, 1960.