УДК 539.375.5

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ МЯГКОЙ СТАЛИ

А. Г. Иванов, Л. И. Кочкин, В. Ф. Новиков, Т. М. Фоломеева

(*Москва*)

Изучение деформации и разрушения тонкостенных труб под действием взрыва позволяет получать информацию о пластичности материала при скоростях нагружения $10^4 - 10^5$ с$^{-1}$, трудно доступных другим методам. Так, оказалось, что на момент разрушения величина относительной деформации $\varepsilon = (R - R_0)/R$ (где R и R_0 — текущее и начальное значения наружного радиуса трубы) для мягкой стали имеет максимум при величине истинной скорости деформации $\dot{e} \sim 10^4$ с$^{-1}$ ($e = \ln(R/R_0)$) [1]. Максимум в зависимости $\varepsilon = f[\lg(\dot{e})]$ имеет определенный физический смысл и может быть объяснен с позиций энергетического подхода к явлению разрушения [2]. Необычность полученных в [1] результатов для стали, широко используемой в технике, потребовала проведения дополнительных исследований. В данной работе приняты меры для получения взрывного воздействия, более близкого к одномерному, чем в [1], и применены дополнительные методы исследований. Одновременно в опытах получена новая информация об особенностях взрывного разрушения труб и о характерном числе фрагментов (n), на которые разрушается радиально расширяющаяся труба (или кольцо) из мягкой стали, и сделана попытка математического описания явления.

Схема постановки опытов аналогична описанной в [3]. В трубе из исследуемого материала подрывался заряд взрывчатого вещества (ВВ). В данной работе использовались заряды цилиндрической формы, соосно расположенные с трубой. Заряды ВВ изготавливались литьем из сплава 50% (весовых) тротила и 50% гексогена (ТГ 50/50). Заряды диаметром ($\phi_{\text{ВВ}}$) 11 мм и менее изготавливались из пластического ВВ на основе тэна, энергетически эквивалентного ТГ 50/50, но имеющего существенно меньший критический диаметр, чем ТГ 50/50. Инициирование соосно установленного в трубе заряда осуществлялось с одного конца синхронно с зарядами подсветки. При установке зарядов в трубах принимались меры к уменьшению влияния крепежных деталей, при этом имелось в виду, что любая инертная деталь вблизи ВВ может существенно усилить и исказить разрушение трубы.

В опытах использовались трубы из стали 20 длиной 5 диаметров. В большинстве опытов диаметр труб (ϕ) равнялся 42 мм, а в части опытов $\phi = 105$ и 426 мм. Относительная толщина стенки труб $\delta = 4{,}2$—$4{,}6\%$. Поверхность труб перед опытом очищалась от окислов, чтобы избежать опережающего облака пыли при их взрывном расширении.

Регистрация процесса расширения и разрушения труб проводилась несколькими методами. Опыты 1—15 проведены фотографическим методом — двумя синхронно работающими приборами (СФР в режимах фоторегистрации (теневой метод) и лупы времени). Точность определения скорости смещения стенки трубы оценивается в 5—10%. Опыты 16—24 проведены методом импульсной рентгенографии, которая позволила получить прямую информацию о числе (или характерном размере) образующихся в сечении трубы фрагментов, а также наблюдать общую картину разрушения труб. В опытах 25—32 улавливались осколки труб при их торможении в древесных опилках. Точность определения числа фрагментов оценивается в $\pm$ 10%. Результаты опытов и некоторые исходные данные экспериментальных сборок приведены в таблице и графиках. На фиг. 1 по опытам 1—15 построены зависимости радиальной скорости разлета труб v_1 перед разрушением (кривая *1*) и скорости вырывающихся ПВ v_2 после разрушения (кривая *2*) в зависимости от отношения погонных масс ВВ и трубы m. Значения v_1 относятся к моментам разрыва трубы и движения осколков по инерции. Сравнение зависимости $v_1(m)$ с подобной зависимостью, полученной в [4] с учетом различий в ВВ, указывает на их хорошее согласие ($\pm 5\%$). Аналогичное сравнение с данными [5] обнаруживает расхождение результатов, вызванное, по-видимому, отсутствием зазоров

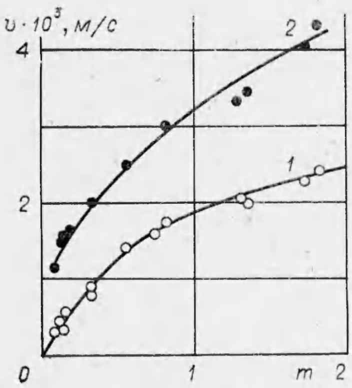
Номер опыта	m	$\varnothing_{ВВ}$, мм	ε_p, %	n, шт.	Номер опыта	m	$\varnothing_{ВВ}$, мм	ε_p, %	n, шт.
1	0,09	8	47		17	0,13	10	44	30
2	0,13	10	62		18	0,30	15	66	50
3	0,13	10	53		19	0,82	24,5	84	
4	0,16	11	59		20	0,83	24,5	77	70
5	0,34	16	68		21	1,32	30	71	80
6	0,34	16	73		22	1,31	30	67	80
7	0,56	20	70		23	2,04	37,5	60 (15)	
8	0,82	24,5	78		24	1,37	30,5	62 (28)	
9	1,30	30,5	65		25	0,05	6		10
10	1,36	30,5	48		26	0,087	8		21
11	1,81	35	35		27	0,13	10		22
12	1,74	35	50		28	0,34	16		33
13	0,76	24,5	88		29	0,56	20		60
14 *	0,33	160	36		30	0,82	24,5		63
15 **	0,13	24,5	42		31	1,32	30		67
16	0,13	10	50		32	2,04	37,5		69

* — ⌀ = 426 мм, ** — ⌀ = 105 мм.

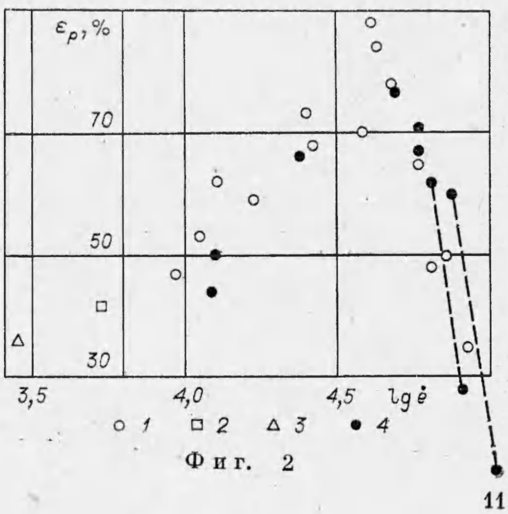
между ВВ и трубой в [5]. При малых зазорах в наших опытах ($m \sim 1$) значения v_1 близки.

На фиг. 2 по данным опытов 1—24 построена зависимость $\varepsilon_p(\lg \dot{e})$ (*1—3* — фотохронографические опыты с трубами ⌀ 42; 105 и 426 мм соответственно, *4* — рентгенографические опыты с трубами ⌀ 42 мм).

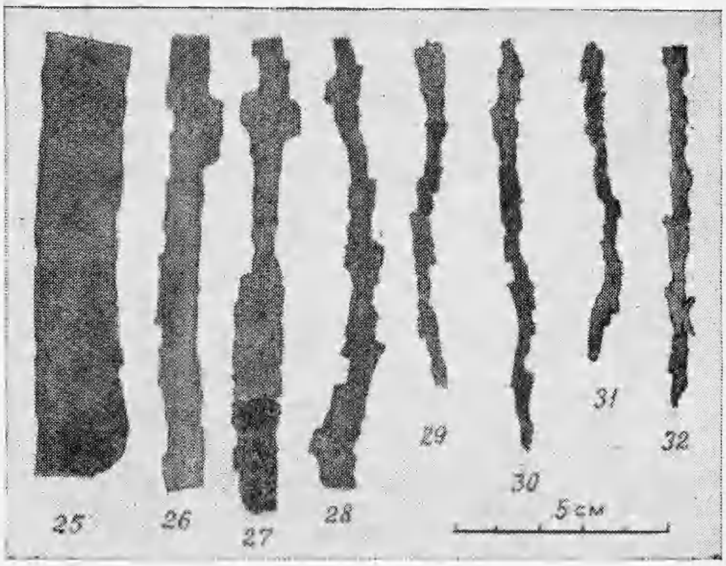
Значения $\dot{e}$ вычислялись на моменты разрушения труб согласно формуле $\dot{e} = v_1/R = v_1/[(1 + \varepsilon_p)R_0]$, где величины v_1 находились по совокупности опытов с графика фиг. 1. Экспериментальные данные $\varepsilon_p(\lg \dot{e})$, полученные разными методами, не противоречивы. Как и в [6], при $\dot{e} < 10^4$ с$^{-1}$ с ростом $\dot{e}$ растет величина ε_p. При $\dot{e} > 10^4$ с$^{-1}$, как и в [1], данные эксперимента указывают на существование максимума, хотя месторасположение последнего несколько смещено в сторону более высоких значений $\dot{e}$



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

($\lg \dot{e}_{max} \sim 4{,}6$) и увеличена амплитуда ($\varepsilon_{max} \sim 0{,}8$), а сама зависимость $\varepsilon_p (\lg \dot{e})$ имеет асимметричный вид.

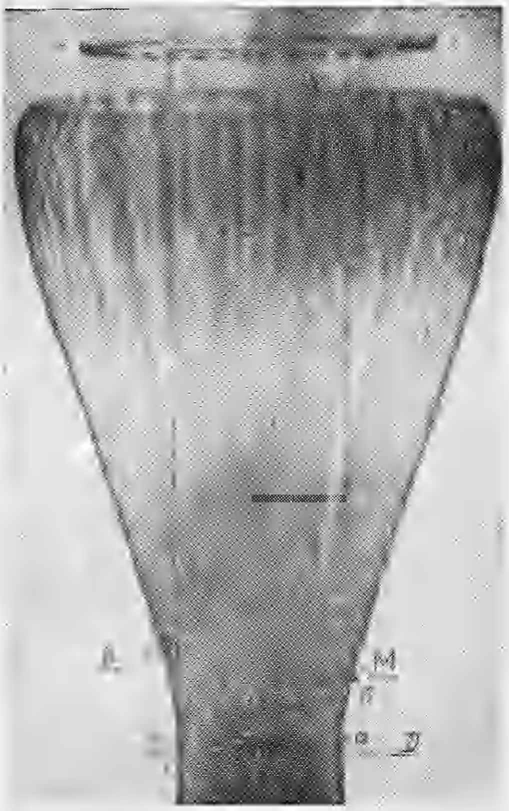
Отличие $\varepsilon_p (\lg \dot{e})$ от аналогичной зависимости, полученной в [1], не является неожиданным. Изменение формы заряда сделало процесс разлета ПВ более близким к одномерному и удлинило эффективное время разгона трубы [7]. Поэтому допущение о мгновенном ускорении трубы, принятое в [1] при выводе формулы $\varepsilon_p (\lg \dot{e})$, слишком грубо для данной работы. Развитая там теория требует уточнения применительно к данным экспериментам. Это уточнение должно учитывать не только действие ПВ, ускоряющих стенки трубы, но и конкурирующий процесс диссипации энергии из-за пластического течения материала.

Использование цилиндрических зарядов ВВ привело к заметному изменению коэффициента отбора энергии, определенному как отношение максимальной кинетической энергии разлетающейся трубы к энергии ВВ. Если для зарядов сферической формы этот коэффициент составлял 0,32 [3], то для зарядов цилиндрической формы ($m > 0{,}5$) он возрос до 0,42.

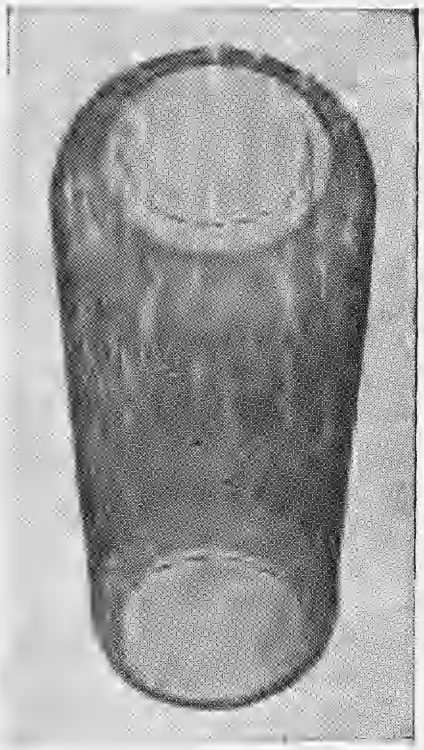
Некоторые из типичных осколков, полученных в опытах 25—32, показаны на фиг. 3. Число фрагментов (n) определялось как отношение удельной (на единицу длины) массы трубы к аналогичной средней величине массы осколка *. Удельная величина массы осколка находилась делением массы его на длину.

Импульсная рентгенография позволила выявить некоторые детали разрушения труб. Характерные рентгенограммы двух опытов при существенно разных значениях v_1 приведены на фиг. 4 (опыт 23) и фиг. 5 (опыт 17). Начальные положения труб нанесены штриховыми линиями. Оказалось, что при использовании больших зарядов ВВ ($m > 0{,}2$) разрушение трубы сопровождается отделением от торца трубы узкой кольцевой области материала, движущейся с меньшей радиальной скоростью, чем остальная часть трубы. Отделение кольца, по-видимому, вызвано выходом косой ударной волны (вследствие разгрузки оболочки с торца) на наружную кромку трубы и, как следствие этого, столкновением волн разреже-

* Понятие о характерном размере фрагмента или числе их n использовалось в [8—10]. В [11] экспериментально и расчетно (на основе феноменологии разрушения Мотта [12]) показано, что распределение фрагментов труб по размерам имеет резко выраженный максимум.



Фиг. 4



Фиг. 5

ния, распространяющихся с торца и наружной боковой поверхности трубы. Кольцо, разделившееся на 35—40 фрагментов, отчетливо видно на фиг. 4 (область *в—г*). В отличие от основной массы трубы фрагменты кольца не имеют тангенциальной составляющей, а разлетаются радиально со скоростью $\sim$1,5 км/с. Фрагменты основной массы трубы ориентированы вдоль образующей трубы (фиг. 4, 5).

При $v_1 < 2{,}2$ км/с фронт распространяющихся трещин локализован в достаточно узкой области значений $\Delta\varepsilon \sim 5\%$. С увеличением v_1, помимо обычного фронта многочисленных трещин (опыты 23 и 24, $v_1 = 2{,}52$ и $2{,}18$, $\varepsilon_p = 60$ и 62%), регистрируются 2—3 лидирующие трещины (K и M на фиг. 4). Трещины-лидеры наблюдались при $\varepsilon_p = 15\%$ (опыт 23) и 28% (опыт 24). В таблице значения ε_p для трещин лидеров приведены в скобках. На фиг. 2 точки, отвечающие основным и лидирующим трещинам опытов 23 и 24, соединены штриховыми линиями.

Таким образом, с некоторых значений v_1 механизм разрушения оказывается двухстадийным. Каковы причины возникновения трещин-лидеров? Те же, что предсказывались при хрупком разрушении [13], или для их объяснения необходимы другие идеи? Не ясно. Так как процессы распространения детонации по столбику ВВ, деформации трубы и распространение фронта трещин являются установившимися процессами (по меньшей мере, на расстояниях свыше 1,5—2 диаметров трубы), распространяющимися со скоростью $D = 7{,}65$ км/с, то очевидно, что продвижение трещин является принудительным сверхзвуковым процессом (на фиг. 4 CD — фронт ДВ, *а—б* — область ускорения трубы).

Для понимания существа явления образования фрагментов при разрушении труб и получения полуколичественных зависимостей полезно, хотя бы в первом приближении, описать явление математически. Рассмотрим расширяющееся с постоянной радиальной скоростью v_1 кольцо (трубу). Как и в [1], примем, что работа по разделению материала на части (прохождение трещины) совершается за счет упругой энергии, снимаемой с окрестности материала, где развивается разрушение. Будем считать также, что разрушение происходит при $\varepsilon_p \ll 1$ (фактически $\varepsilon_p \sim 1$), материал кольца вязкопластичный $\sigma = \sigma_0 + \dot{e}\eta$ (σ и σ_0 — динамический и статический пределы текучести, η — вязкость материала) и значение v_1 достигается мгновенно и не уменьшается вследствие пластического растяжения трубы. Согласно [1], деформация при разрушении

$$\varepsilon_p = \dot{e}\alpha/(1 + \mu\dot{e})^2 \tag{1}$$

(α и μ — константы материала).

Как и в [1], будем считать, что развитие трещин по толщине стенки трубы заканчивается на пути от R_0 до $R = (1 + \varepsilon_p)R_0$ или

$$\varepsilon_p = (R - R_0)/R_0 = vt/R_0. \tag{2}$$

Считая, что дробление кольца на равные фрагменты завершится к моменту времени t, когда вся упругая энергия со скоростью звука разгрузится на развивающиеся трещины, ширина фрагмента определится как $2\pi R/n = 2ct$ или

$$n = \pi R_0(1 + \varepsilon_p)/ct. \tag{3}$$

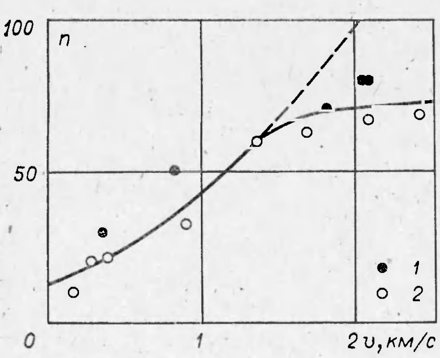
Решая совместно уравнения (1) — (3) с учетом, что $\dot{e} = v/R = v/[(1 + \varepsilon_p)R_0]$, получим $n = (\pi/c\alpha R_0)(R_0 + \mu v)^2$.
Согласно [1], $\mu = \eta/\sigma_0$, $\alpha = 4\mathrm{E}\lambda/(3c\sigma_0^2)$,

$$n = \frac{3}{4}\pi\frac{(R_0\sigma_0 + v_1\eta)^2}{R_0\mathrm{E}\lambda} \tag{4}$$

(Е, λ и c — соответственно модуль Юнга, удельная на единицу поверхности работа разрыва материала, скорость звука). Согласно уравнению (4), n — функция двух параметров R_0 и v_1.

В рамках сделанных допущений при выводе формулы (4) зависимость $n(R_0) \neq \mathrm{const}$ при $v_1 = \mathrm{const}$ указывает на отсутствие подобия при разрушении геометрически подобных труб разной величины. Экспериментальные данные [9] подтверждают этот вывод. Зависимость $n(R_0)$ имеет вид кривой с минимумом при $R = (\eta v_1)/\sigma_0$. Количественная экспериментальная проверка (4) требует постановки специальных исследований. При $R_0 = \mathrm{const}$ зависимость $n(v_1)$ имеет вид квадратичной параболы. По мере увеличения v_1, как отмечалось в [8], число фрагментов n растет.

Этот факт иллюстрируется также данными настоящей работы, приведенными на фиг. 6 (*1* — рентгенографические опыты, *2* — опыты по торможению осколков в опилках). При $v_1 < 1{,}4\cdot10^3$ м/с эксперименты удовлетворительно описываются зависимостью $n = A(B + v_1)^2$, где $A = 10{,}6$; $B = 1{,}02$; v_1, км/с (штриховая кривая на фиг. 6). Начиная с $v_1 \sim 1{,}4$ км/с, рост числа фрагментов прекращается и значение n остается постоянным на уровне 60—70. При таком n характерная ширина фрагментов оказывается всего лишь в 2—4 раза больше их толщины, что, по-видимому, и является ограничением для дальнейшего дробления материала по образующим цилиндра.



Фиг. 6

Проведенное исследование подтвердило существование максимума пластичности мягких сталей при скоростях деформации $\sim 4\cdot10^4$ с$^{-1}$; позволило в рамках энергетического подхода объяснить причину отклонения от подобия разрушения труб на фрагменты и ориентировочно отыскать вид зависимости $n\,(v, R_0)$; выявило возможность возникновения трещин-лидеров при скоростях деформации около 10^5 с$^{-1}$. Такие трещины не укладываются в существующие представления о разрушении труб в области глубокой пластичности.

Поступила 23 VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А. Г.** Особенности взрывной деформации и разрушения труб.— Проблемы прочности, 1976, № 11.
2. **Иванов А. Г., Минеев В. Н.** О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций.— ДАН СССР, 1975, т. 220, № 3 (см. также ФГВ, 1979, № 5).
3. **Иванов А. Г., Кочкин Л. И. и др.** Взрывное разрушение труб.— ФГВ, 1974, № 1.
4. **Воробьев А. И., Гайнуллин М. С. и др.** Экспериментальное исследование движения цилиндрических оболочек под действием продуктов взрыва в полости.— ПМТФ, 1974, № 6.
5. **Тарасенко Н. Н.** Исследование движения стенки трубы под действием продуктов детонации внутреннего заряда ВВ.— ФГВ, 1974, № 5.
6. **Banks E. E.** The ductility of metals under explosive loading conditions.— J. Inst. of Metals., 1968, vol. 96, p. 375.
7. **Allison F. E., Watson R. W.** Explosively loaded metallic cylinders.— J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, N 5.
8. **Banks E. E.** The fragmentation behavior of thin-walled metal cylinders.— J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, N 1.
9. **Одинцов В. А., Чудов Л. А.** Расширение и разрушение оболочек под действием продуктов детонации.— Сб. пер. Механика, 1975, № 5.
10. **Кузнецов В. М.** О разрушении металлических колец в пластическом состоянии.— ФГВ, 1973, № 4.
11. **Wesenberg D. L., Sagartz M. J.** Dynamic fracture of 6061-T6 aluminum cylinders.— Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech., 1977, vol. 44, N 4.
12. **Mott N. F.** Fragmentation of shell cases.— Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1947, vol. 189, p. 300.
13. **Кузнецов В. М.** О нестационарном распространении системы трещин в хрупком материале.— ПМТФ, 1968, № 2.

УДК 539.3

ОПИСАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В УПРУГО ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Ю. З. Повстенко

(*Львов*)

При образовании поверхности в твердом теле может возникнуть пространственная ориентация точечных дефектов. Усредненный тензор упругих диполей [1], ориентация которых лежит в основе диа- и параупругости [1, 2], с точки зрения механики сплошной среды можно рассматривать как тензорный параметр состояния — аналог обычной скалярной концентрации растворенного вещества. Идея о том, что для описания диффузионной теории деформации твердых тел недостаточно скалярных величин (концентрации и химического потенциала), а нужно вводить соответствующие тензоры, высказана в работах [3, 4] (см. также [5, 6]). В качестве параметров состояния неидеального твердого раствора выбираются температура T, энтропия s, тензоры напряжений $\boldsymbol{\sigma}$, деформации $\mathbf{e}$, химического потенциала $\boldsymbol{\varphi}$ и концентрации $\mathbf{c}$, для которых в [3, 4] получена взаимосвязанная система уравнений.

Цель данной работы — построить двумерный аналог указанной системы уравнений с учетом специфики поверхностных явлений, моделируя тонкий приповерхностный слой поверхностью, обладающей собственными параметрами состояния.

1. Балансовые уравнения. Для материального объема, изображенного на фигуре, справедливы уравнения баланса массы

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\int\limits_{V_1}\rho_1 dV_1+\int\limits_{V_2}\rho_2 dV_2+\int\limits_{\Sigma}\rho d\Sigma\right)=0; \qquad (1.1)$$