

единицу длины заряда. Объединяя несколько постоянных в одну, перепишем (18):

$$\bar{h} = K \frac{E\varepsilon_*^2}{\sigma_*} \left(\frac{V}{Q} \right)^\alpha. \quad (19)$$

Для абсолютно хрупких тел $\sigma_* = E\varepsilon_*$ и это выражение еще более упрощается

$$\bar{h} = K \frac{\sigma_*}{E} \left(\frac{V}{Q} \right)^\alpha. \quad (20)$$

По своей структуре формулы (19) и (20) совпадают с точностью до масштабного множителя с аналогичными выражениями, полученными и проанализированными в работах [4, 5], если принять $\alpha = 0,8$.

*Поступила в редакцию
27/VIII 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Друкованный, В. М. Комир, В. М. Кузнецов. Действие взрыва в горных породах. Киев, «Наукова думка», 1973.
2. Прикладные вопросы вязкого разрушения. М., «Мир», 1968.
3. В. М. Кузнецов. ФГВ, 1973, 9, 3.
4. Э. А. Кошелев, В. М. Кузнецов и др. ПМТФ, 1971, 2.
5. В. М. Кузнецов. ФТПРПИ, 1973, 2.

УДК 539.375.5

ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТРУБ

А. Г. Иванов, Л. И. Кочкин, Л. В. Васильев, В. С. Кустов

(Москва)

Исследование процесса деформации и разрушения труб при взрыве внутри них аксиально расположенных цилиндрических зарядов ВВ проведено в ряде работ. Не меньший интерес представляет исследование локализованного взрыва в трубе, когда продукты взрыва (ПВ) имеют возможность свободно разлетаться вдоль оси.

Ниже излагаются результаты исследований разрушения труб, изготовленных из стали различных марок, сплавов алюминия, органического стекла, полистирола, бутилметакрилата и пенополистирола при взрыве внутри них зарядов взрывчатого вещества (ВВ). В качестве ВВ использовался сплав тротила с гексогеном 50/50 при плотности 1,67 г/см³.

В экспериментах использовались трубы длиной 200 мм, внутренним диаметром 63 мм при различных толщинах стенок (δ). Масса труб изменялась в 60 раз. Заряд имел форму сплошного шара диаметром 62 мм и инициировался в центре.

В опытах регистрировался процесс разрушения труб: начало деформации t_1 , скорость установившегося расширения труб v_1 , интервалы времени t_2 и величины деформации $\varepsilon \left(\varepsilon = \frac{R - R_0}{R_0} \right)$, где R_0 и R — начальное и текущее значение наружного радиуса трубы в центральном сечении) до потери сплошности труб и прорыва ПВ, скорость разлета про-

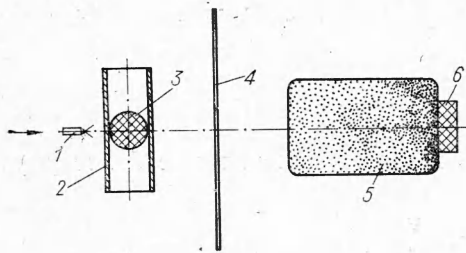


Рис. 1. Схема постановки опытов:

1 — капсюль-детонатор; 2 — исследуемая труба; 3 — основной заряд; 4 — рассеивающий экран из кальки, на поверхности которого нанесена масштабная сетка; 5 — источник света (прозрачный сосуд с аргоном); 6 — заряд ВВ, создающий ударную волну в аргоне.

равшихся продуктов взрыва v_2 . Интервалы времени отсчитывались от момента инициирования ВВ.

Схема постановки опытов приведена на рис. 1. Регистрация процесса велась двумя синхронными приборами СФР, один из которых работал в режиме фоторегистратора со скоростью развертки изображения по пленке от 0,75 до 3 км/с. В щель фоторегистратора попадало изображение проекции узкого центрального участка трубы, перпендикулярно его оси. Прибор позволял получать $r-t$ -диаграмму процесса разлета трубы в области максимального воздействия ПВ.

Второй прибор работал в режиме лупы времени с частотой съемки от 250 до 625 тыс. кадров в секунду и позволял регистрировать различные фазы процесса деформации и разрушения трубы в целом. Для исключения возможности повторного экспонирования пленки при последующих оборотах зеркала развертывающего механизма в приборах СФР устанавливались электродинамические затворы, которые перекрывали световой поток в конце рабочего оборота зеркала.

Для регистрации процесса разрушения труб малой массы, в экспериментах использовалась также лупа времени ЛВ-1 с частотой съемки 3,6 млн. кадров в секунду. Регистрация проводилась на черно-белой пленке типа КН-3, а в некоторых опытах на цветной негативной пленке типа ЦН-3.

Точность определения v_1 и v_2 оценивается в 5—10%, а временных интервалов — ± 2 мкс. Типичные фотоотпечатки, полученные в опытах, приведены на рис. 2. Результаты экспериментов сведены в таблицу. Там же приведены результаты опыта № 29 со взрывом заряда в атмосфере воздуха. Измеренная скорость разлета ПВ вплоть до 2 радиусов заряда оказалась постоянной и равной 5,73 км/с.

Обработка результатов опытов позволяет сделать следующие выводы.

1. Отбор энергии стенкой трубы от ВВ заканчивается очень быстро, когда деформация наиболее напряженного среднего сечения трубы достигает всего 10%. После этого труба разлетается примерно с постоянной скоростью. Подобный эффект у труб, полностью заполненных ВВ, проявляется при деформации 20—40% [1, 2].

Это различие в величинах деформации при достижении постоянной скорости разлета стенки трубы, по-видимому, вызвано большей свободой для расширения ПВ в осевом направлении трубы.

2. Независимо от плотности, толщины стенки и прочностных характеристик материала труб зависимость установившейся скорости разлета в наиболее напряженном (центральном) сечении трубы от массы удовлетворительно описывается в логарифмическом масштабе одной линией (рис. 3). Уравнение этой прямой, найденное методом наименьших квадратов,

$$n \lg v + \lg m = 2 \lg c.$$

Здесь m — масса сферического слоя материала трубы с радиусами, равными начальным радиусам испытываемой трубы, отнесенная к массе ВВ, v — установившаяся скорость разлета трубы, отнесенная к массовой скорости ($u = 2$ км/с) ПВ в точке Жуге, $\lg 2c$ — константа, равная — 0,2.

Поскольку $n \approx 2$, то это свидетельствует о том, что кинетическая энергия трубы (в среднем сечении) для исследованных интервалов из-

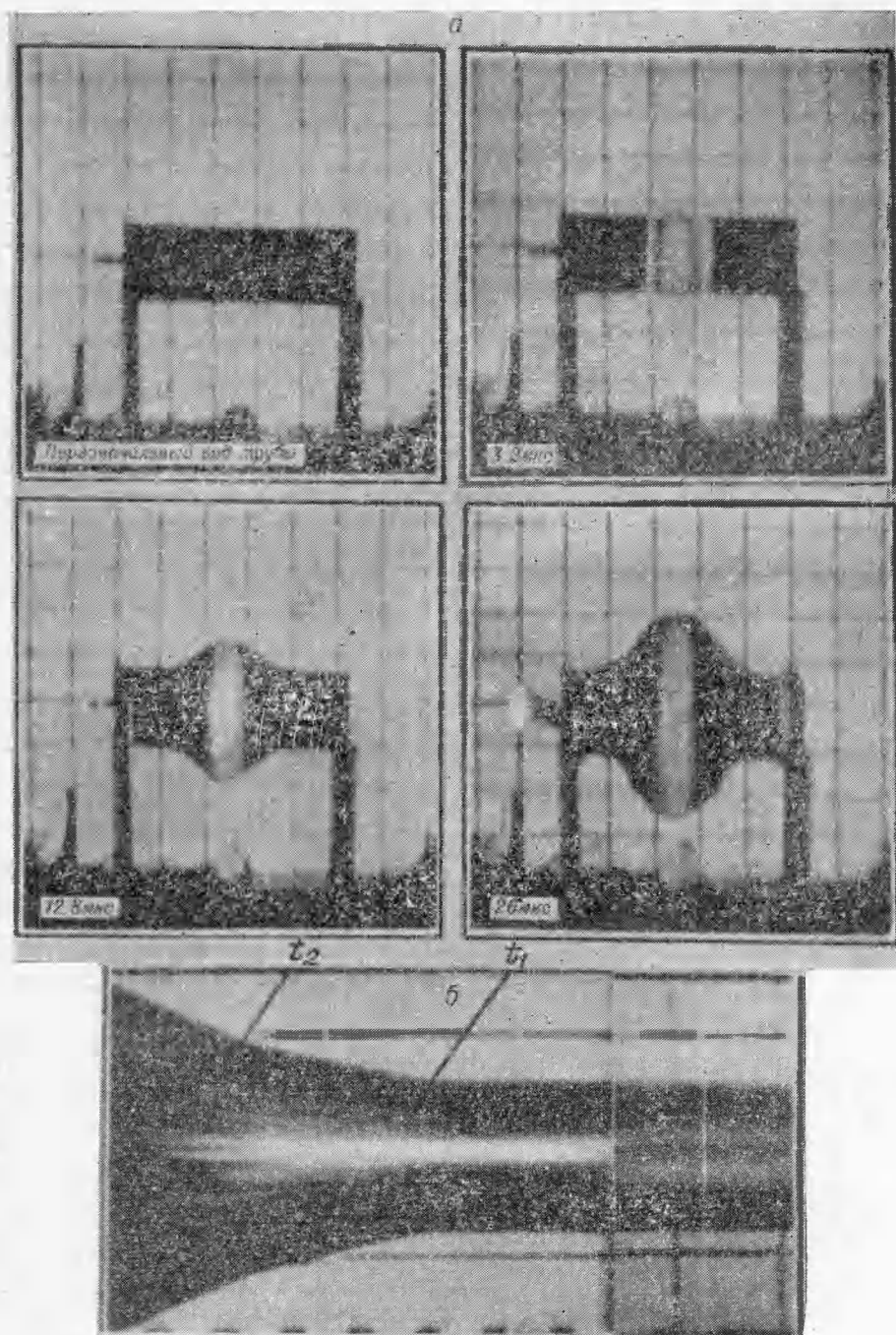


Рис. 2. Фотографии, полученные на СФР в режиме лупы времени в опыте с трубой из бутилметакрилата $\delta=5$ мм (а) и фоторазвертка процесса разрушения стальной трубы, полученная на фоторегистраторе (б).

t_1 — начало смещения трубы; t_2 — прорыв продуктов взрыва.

№ опыта	Материал трубы	δ, мм	v ₁ , км/с	ε, %	v ₂ , МК/с	t ₁ , МКс	t ₂ , МКс
1	Ст. 3	0,5	3,4	13,0	5,2	4	5
2	Ст. 3	0,93	2,3	21	5,0	4	8
3	ЗОХГСА (отжиг)	1,8	1,46	43	2,7	4	15
4	Ст. 3	1,83	1,32	33	2,4	4	13
5	ЗОХГСА (закалка)	1,89	1,28	35	3,0	4	15
6	Ст. 3	1,9	1,3	36	2,6	6	14
7	Ст. 3	2,0	1,4	36	3,0	4	14
8	Ст. 3	2,0	1,34	30	2,64	4	13
9	Ст. 3	4,0	0,96	53	1,9	5	26
10	Ст. 3	8,0	0,70	40	1,3	5	25
11	Ст. 3	8,0	0,80	40	1,4	5	25
12	Ст. 3	12,0	0,52	35	1,0	6	43
13	Д-16 (отжиг)	0,9	4,5	69	5,2	4	10
14	Д-16 (закалка)	1,1	3,6	55	5,2	6	10
15	АМЦМ	3,0	2,3	70	3,24	4	18
16	АМЦМ	6,0	1,5	116	2,0	5	37
17	АМЦМ	12,1	1,16	160	1,8	6	64
18	Д-16 (закалка)	6,0	1,5	60	2,2	5	19
19	Д-16 (закалка)	12,1	1,06	76	1,6	6	38
20	Оргстекло	2,5	3,4	—	—	5	—
21	Полиэтилен	1,7	4,5	—	—	4	—
22	»	31,3	1,06	—	—	10	—
23	Полибутил	2,5	3,34	—	—	4	—
24	»	5,0	2,8	—	—	4	—
25	»	10,0	2,0	—	—	6	—
26	Пенополистирол	2,5	4,4	—	—	5	—
27	»	5,0	4,0	—	—	5	—
28	»	10,0	2,76	—	—	6	—
29	—	0	5,73	—	—	—	—
30	Ст. 3	3,86	0,96	50	2,0	5	25

менения параметров труб, примерно постоянна. Среднее значение коэффициента отбора энергии (φ), определенное как отношение кинетической энергии массы m , движущейся со скоростью v_1 к энергии заряда ВВ, легко может быть найдено.

Примем показатель изэнтропии ПВ ТГ 50/50 равным 3. Такое приближение вполне разумно. В этом случае удельная энергия ВВ равна u^2 [1]. Поэтому

$$\varphi = \frac{mv^2}{2} \approx c \approx 0,32.$$

Опыты с трубами из разных материалов, отличающихся прочностными характеристиками, удовлетворительно описываются единой зависимостью, поэтому доля энергии, идущей на вязко-пластическое течение и ударный разогрев материала, мала в сравнении с кинетической энергией трубы.

3. На ранней стадии ($\epsilon \sim 5-10\%$) взрывной деформации труб из стали или сплавов алюминия (при $\delta > 3$ мм) на наружной поверхности труб появляются трещины, направленные вдоль образующей трубы и растущие по длине по мере роста деформации. Область трещин охватывает центральную кольцевую зону шириной порядка диаметра заряда $d_{ВВ}$. Факелы ПВ из трещины появляются по времени позднее зарождения трещин. Это дает основание считать, что трещины распространяются со свободной поверхности внутрь трубы [3]. Скорость распространения трещин, полученная из опытов со стальными трубами, составила 0,25—0,5 км/с.

При взрывной деформации труб из АМЦМ ($\delta \leq 3$ мм) трещины либо не образуются, либо размеры их таковы, что они лежат за преде-

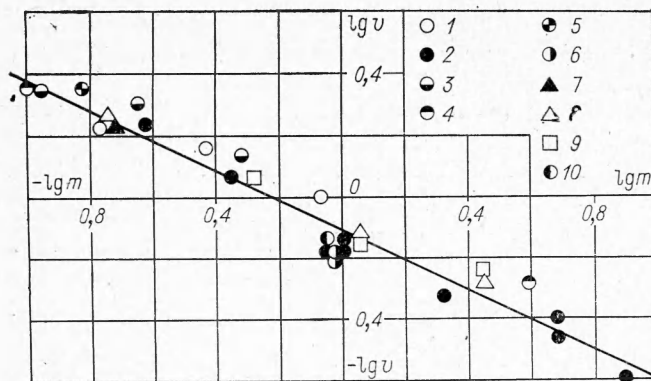


Рис. 3. Зависимость установившейся скорости разлета труб от массы:

1 — бутилметакрилат; 2 — Ст.; 3 — пенополистирол; 4 — полиэтилен; 5 — Д16Т (отжиг); 6 — Ст. ЗОХГСА (закаленная); 7 — оргстекло; 8 — Д16АТ (закаленный); 9 — АМЦМ; 10 — Ст. ЗОХГСА (отжиг).

лом оптического разрешения СФР. Разрушение труб происходит вдоль линии максимальной деформации и по двум симметричным кольцевым линиям, расположенным на расстоянии $1,5 d_{\text{ВВ}}$ друг от друга. Вдоль этих линий прорывы ПВ наиболее интенсивны.

Процесс взрывной деформации труб из пластиков (опыты № 20—25) сопровождается ярким свечением центральной части трубы в виде поперечной полосы шириной $\sim d_{\text{ВВ}}$, которая остается примерно постоянной. При деформации труб из бутилметакрилата — свечение ярко голубое, окантованное красной полосой.

Свечение в трубе, по-видимому, вызвано неравновесным излучением при быстрой деформации материала [4], так как равновесная температура за фронтом ударной волны, при которой зарегистрировано свечение оргстекла, соответствует давлению ~ 2 млн. атм [5], что на 1—2 порядка больше давления, существующего в стенке трубы.

Прорыв ПВ происходит по отдельным очагам. Темные пятна прорвавшихся ПВ сравнительно медленно растут в размере и увеличиваются в числе. Профиль трубы постепенно приобретает рваный характер. Однако превышение v_2 над v_1 оказывается несущественным и лежит в пределах точности регистрации. Величины деформаций труб перед прорывом достигают $\sim 200\%$ и более. При разрушении труб из пористого пластика — пенополистирола — определить момент прорыва трубы по характеру развития процесса или скачку скоростей разлета не удастся.

Первоначальное яркое однородное свечение трубы, возникающее при выходе ударной волны на ее поверхность, есть следствие свечения воздуха в порах материала. По мере увеличения деформации яркость свечения постепенно падает, возникают области неравномерного свечения, которые при $\epsilon > 200\%$ качественно можно принять за ПВ. Результаты опытов № 29 с пенополистиролом удовлетворительно ложатся на общую зависимость рис. 3, скорость разлета границы трубы заметно меньше скорости свободного разлета ПВ ($v = 5,73$ км/с), поэтому, если разрушение трубы носит пороговый характер (а не постепенное перемешивание мелкодробленого материала трубы с ПВ), то оно происходит при $\epsilon > 100—200\%$.

4. В опытах № 1—12 и 30 со стальными трубами при увеличении δ с 0,5 до 4 мм значение ϵ возрастало с 13 до 53% и при $\delta = 8$ и 12 мм составляло 35—40%.

Серия опытов с теми же трубами, как и в опытах № 7, 8, но при диаметре зарядов ВВ 54, 44 и 31 мм, показала, что величина деформации таких труб, как и при заряде диаметром 62 мм, лежит в интервале

27—42%, хотя значения v_1 резко падают, и при $d_{\text{ВВ}}=31$ мм составляет всего 0,3 км/с. Это указывает на независимость ϵ от v_1 по крайней мере в интервале $v_1=0,3\div 1,4$ км/с.

Заметного различия в величинах ϵ Ст. 3 и ЗОХГСА различной термообработки не обнаружено, хотя при испытании в статических условиях величины относительных удлинений Ст. 3 составляют 21—27% и ЗОХГСА — 10%.

Величина ϵ сплава АМЦМ по мере увеличения толщины стенки труб с 1 до 12 мм возрастает с 55—70 до 160%, а для сплава Д16АТ, подвергнутого закалке, составляет 60 и 76% (при δ соответственно 6 и 12 мм). Видно, что для алюминиевых сплавов ϵ существенно зависит от исходных характеристик материала. Значения относительных удлинений при статических испытаниях для АМЦМ составляют 20% и для Д16АТ — 8—12%.

5. Как следует из таблицы, скорость v_2 факелов ПВ в опытах со стальными трубами примерно в 2 раза превышала v_1 , а в опытах с трубами из сплавов алюминия $v_2=1,4 v_1$. При использовании труб из пластиков v_2 , с точностью до ошибки регистрации, совпала с v_1 . Такая закономерность объясняется уменьшением давления в ПВ к моменту времени t_2 и падением v_2 , а также одновременным ростом v_1 (при тех же δ). Меньшие давления в ПВ у более легких труб есть следствие существенного увеличения объема трубы из-за деформаций к моменту t_2 .

Поступила в редакцию
25/VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
2. А. Целминьш. Прикладная механика, 1969, 36, сер. Е, 2.
3. H o g g a t t R e c h t. J. Appl. Phys., 1968, 39, 3.
4. К. Б. Абрамова, Н. А. Златин. Докл. АН СССР, 1971, 201, 6.
5. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1958, 122, 1.

УДК 621.787.044

ВЗРЫВНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ

А. Г. Тесленко, Р. П. Дидык, Л. В. Грязнова, В. Н. Легеза

(Днепропетровск)

В настоящее время метод упрочнения металлов взрывом находит все большее применение. Различие в эффекте упрочнения металлов при контактном взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) связано с начальными параметрами на границе раздела ВВ — металл, которые определяются прежде всего типом ВВ и углом встречи детонационной волны с преградой.

Сравнение результатов упрочнения косыми и плоскими ударными волнами [1] показало, что при одном и том же давлении на фронте волны глубина упрочненной зоны при косых волнах существенно больше, чем при плоских. Изучение упрочнения в этих волнах представляет теоретический и практический интерес.