

резкого увеличения скорости медленной волны. Представляет интерес проверить эти теоретические предсказания экспериментально.

Автор выражает искреннюю признательность В. В. Новиковой за оказанное содействие в выполнении данной работы.

Поступила в редакцию 22/VI 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. В. Бункин, В. И. Конов и др. Письма в ЖЭТФ, 1969, 9, 609.
2. И. А. Буфетов, А. М. Прохоров и др. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 281.
3. И. В. Немчинов. Канд. дис. ИХФ АН СССР. М., 1970.
4. В. П. Левентуев, И. В. Немчинов. ФГВ, 1975, 11, 5, 776.
5. И. П. Ковалева, И. В. Немчинов. ФГВ, 1976, 12, 1, 113.
6. J. P. Reilly, A. Ballantyne, J. A. Woodroffe. AIAA J., 1979, 17, 1098.
7. E. L. Klosterman, S. R. Byron. J. Appl. Phys., 1974, 45, 4751.
8. Ю. П. Райзер. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.
9. A. A. Boni, F. Y. Su. Phys. Fluids, 1974, 17, 340.
10. J. P. Jackson, P. E. Nilson. AIAA J., 12, 1498.
11. В. И. Бергельсон, Т. В. Лосева, И. В. Немчинов. ПМТФ, 1974, 4, 22.
12. Е. А. Козик, Т. В. Лосева и др. Квантовая электроника, 1978, 5, 2138.
13. A. N. Pirri, R. G. Root, P. K. S. Wu. AIAA J., 1978, 16, 1296.
14. И. В. Немчинов, А. И. Петрухин и др. Докл. АН СССР, 1979, 244, 877.
15. Л. П. Маркелова, И. В. Немчинов и др. ФГВ, 1979, 15, 4, 37.
16. Т. В. Лосева, И. В. Немчинов. ФГВ, 1981, 17, 1, 93.
17. Н. Н. Козлова, И. Э. Маркович и др. Квантовая электроника, 1975, 2, 1930.
18. И. Э. Маркович, А. И. Петрухин и др. ФГВ, 1979, 15, 4, 30.
19. Е. А. Берченко, А. П. Соболев, Б. Т. Федюшин. Квантовая электроника, 1979, 6, 1546.
20. А. В. Бессараб, Г. В. Долгалева и др. Физика плазмы, 1979, 5, 558.
21. А. А. Бакеев, Л. А. Васильев и др. Квантовая электроника, 1975, 2, 1278.
22. А. А. Бакеев, Л. И. Николашина, Н. В. Прокопенко. Квантовая электроника, 1980, 7, 1236.
23. Л. П. Маркелова, И. В. Немчинов, Л. П. Шубадеева. ПМТФ, 1973, 2, 54.
24. И. В. Немчинов, В. В. Светцов. ПМТФ, 1977, 4, 24.
25. И. В. Немчинов, И. А. Полозова и др. Квантовая электроника, 1979, 6, 1223.
26. Ю. П. Райзер. Усп. физ. наук, 1980, 132, 549.
27. И. В. Авилова, Л. М. Биберман и др. Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970.
28. Е. В. Ступоченко, Б. Б. Доценко и др.— В сб.: Физическая газовая динамика. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
29. Н. Н. Калиткин, Л. В. Кузьмина, В. С. Рогов. Таблицы термодинамических функций и транспортных коэффициентов плазмы. Препринт ИПМ АН СССР. М., 1972.

УДК 532.593

### СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ОТКОЛЬНОМУ РАЗРУШЕНИЮ

*Г. И. Канель*  
(Черноголовка)

Исследованиям откольной прочности посвящены десятки работ, но четкого представления о величинах растягивающих напряжений, приводящих к разрушению материалов в условиях откола, о соотношении между результатами динамических и квазистатических испытаний, а также между величинами откольной прочности различных материалов до сих пор нет. В значительной мере это объясняется тем, что все известные методы регистрации откола дают лишь косвенную информацию о процессе разрушения и действующих при этом напряжениях. Анализ возможных методов исследования показывает, что наиболее достоверными и информативными для определения разрушающих напряжений являются методы, основанные на непрерывной регистрации скорости свободной поверхности образца в одномерных условиях нагружения [1].

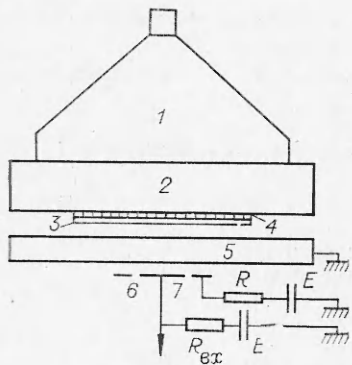


Рис. 1. Схема опытов.

1 — плосковолновой генератор (взрывная линза); 2 — ослабитель — медная пластина толщиной 20 мм; 3 — алюминиевый ударник; 4 — «амортизирующая» прокладка из полиэтилена толщиной 0,2 мм; 5 — образец; 6 — охранное кольцо; 7 — измерительный электрод емкостного датчика;  $E$  — источники ЭДС (ввиду различия динамических жесткостей ударник отделяется от ослабителя; начальное расстояние между ударником и образцом подбирается достаточным для обеспечения необходимого времени регистрации).

В данной работе с использованием емкостных датчиков [2] проведена регистрация профилей скорости свободной поверхности образцов  $w(t)$  и определены нормальные напряжения разрушения для алюминия АД1, дюралюминия Д16, меди М2, никеля НП2 и нержавеющей стали Х18Н10Т в близких условиях нагружения. Найденные величины откольной прочности сопоставляются с литературными данными о прочности металлов на разрыв в статических условиях и в условиях откола, обсуждаются возможные источники погрешности, характерные для различных методов определения откольной прочности.

Исследовавшиеся образцы с поперечными размерами 120 и толщиной 9—15 мм готовились из листа (никель) или прутка круглого сечения в состоянии поставки. Проведено две серии измерений. В первой (рис. 1) образцы всех материалов нагружались ударом алюминиевой пластины толщиной 2 мм, имеющей скорость  $455 \pm 15$  м/с и диаметр плоского участка в момент соударения  $\sim 60$  мм. Во второй серии опытов проведено более систематическое исследование откола в нержавеющей стали. При этом варьировались амплитуда и характерная длительность падающего импульса.

Емкостный датчик скорости поверхности — круглый плоский электрод диаметром 20 мм — расположен на расстоянии 4—6 мм от свободной поверхности и окружен для обеспечения однородности электрического поля охранным кольцом с наружным диаметром 40 мм. Напряжение, подаваемое на измерительный электрод и охранное кольцо, составляло 3 кВ относительно заземленного образца.

На рис. 2 приведены профили скорости свободной поверхности  $w(t)$ , полученные из обработки результатов первой серии опытов. Каждая из приведенных на рисунке кривых получена усреднением по крайней мере двух осциллограмм; разброс данных не превышал  $\pm 3\%$  относительно среднего по амплитуде.

Приведенные на рис. 2 профили  $w(t)$  для меди, никеля и алюминия имеют качественно подобный вид. Развитие разрушения и связанное с ним падение величины растягивающих напряжений в зоне разрушения приводят к появлению волны сжатия, фиксируемой на профиле скорости  $w(t)$  в виде «откольного импульса». В процессе реверберации откольного импульса между свободной поверхностью и зоной разрушения скорость поверхности претерпевает затухающие колебания, при этом средняя скорость откалываемой пластины алюминия, меди и никеля изменяется незначительно.

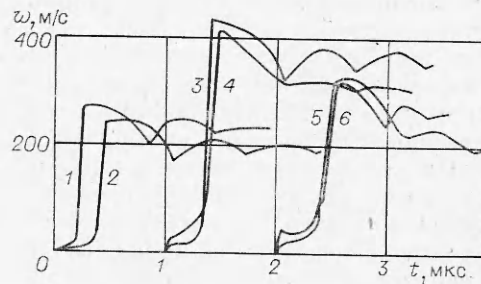


Рис. 2. Результаты первой серии опытов.

1 — медь; 2 — никель; 3 — алюминий; 4 — дюралюминий; 5 — нержавеющая сталь; 6 — железо «армко».

В случаях дюралюминия и нержавеющей стали откольный импульс выражен не столь явно, наблюдается также постепенное падение средней скорости поверхности в течение всего времени регистрации. Подобная аномалия наблюдалась ранее и для алюминия при исследовании откола в условиях нагружения образцов ударом фольги толщиной 0,26 мм [3]. Очевидно, что торможение откольной пластины, после того как начало разрушения четко зафиксировано, объясняется затянутостью процесса разрушения. По-видимому, возможность сохранения постоянной средней скорости откальзывающейся пластины в процессе реверберации откольного импульса определяется соотношением характерных длительностей заданного импульса нагрузки и процесса разрушения. В связи с этим нужно сказать, что в сохранившихся образцах полное отделение откольной пластины наблюдалось во всех случаях, кроме нержавеющей стали.

Величина растягивающих напряжений при отколе в первом приближении определялась по разнице  $\Delta w^*$  между величинами скорости на первом максимуме  $w(t)$  и первом минимуме [1]  $\sigma^* = 1/2 \cdot \rho_0 c_0 \Delta w^*$ , где  $\rho_0$  — плотность материала,  $c_0$  — объемная скорость звука. В случае материалов с явно выраженным пределом текучести при определении величины  $\Delta w$  вводилась поправка [4], учитывающая нагон лидирующей частью откольного импульса, распространяющейся со скоростью продольной упругой волны  $c_l$ , разгрузочной части падающего импульса сжатия, имеющей скорость  $\sim c_0$ :

$$\sigma^{**} = 0,5\rho_0 c_0 (\Delta w^* + \delta w),$$

$$\delta w = -\partial w / \partial t \cdot (\Delta h / c_0 - \Delta h / c_l),$$

где  $\Delta h$  — толщина откольной пластины, определяемая по периоду реверберации откольного импульса  $\Delta t$  ( $\Delta h = c_l \cdot \Delta t / 2$ );  $\partial w / \partial t$  — наклон графика  $w(t)$  перед моментом выхода на поверхность откольного импульса. Следует заметить, что, поскольку, с одной стороны, реальное искажение профиля  $w(t)$  упругим предвестником откольного импульса точно не известно, а, с другой стороны, при определении разрушающих напряжений не учитывалось затухание отраженной волны разрежения вследствие эффектов вязкоупругости и нелинейной сжимаемости, величина  $\sigma^{**}$  характеризует скорее верхний предел возможных значений разрушающего напряжения.

Полученные из обработки экспериментальных данных параметры профилей  $w(t)$ , необходимые для определения разрушающих напряжений, а также величины  $\sigma^*$ ,  $\sigma^{**}$ ,  $\Delta h$  приведены в табл. 1.

Аномально-затянутый характер откольного разрушения нержавеющей стали дает основание предполагать, что определяемая из профилей  $w(t)$  величина откольной прочности должна в значительной мере определяться условиями нагружения. Действительно, если процесс разрушения и сопровождающая его релаксация растягивающих напряжений происходят сравнительно медленно, то в коротком импульсе, где скорость приложения нагрузки велика, может реализоваться более высокий уровень растягивающих напряжений, чем при более длительном импульсе нагрузки. Для проверки этого предположения проведена серия экспериментов с нержавеющей сталью, в которых варьировались амплитуда и характерная длительность выходящего на поверхность импульса сжатия. Увеличение длительности первоначально прямоугольного импульса нагрузки достигалось изменением толщины алюминиевого ударника (5 мм при скорости  $590 \pm \pm 10$  м/с). Наибольшая длительность нагрузки реализована при подрыве на поверхности образца плосковолнового генератора (взрывной линзы) диаметром 100 мм. Результаты экспериментов представлены на рис. 3. Для сравнения на этом же рисунке приведены полученные в условиях нагружения 5-миллиметровым ударником профили  $w(t)$  для железа «армко» [5] и закаленной до твердости 60 HRC стали ХВГ. В табл. 1 приведены результаты обработки экспериментальных профилей  $w(t)$  для нержавеющей стали и взятые из [5] данные для железа «армко».

Таблица 1

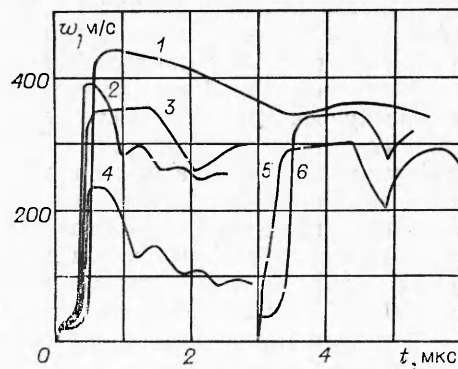
## Результаты измерения откольной прочности

Материал	Толщина образца, мм	Толщина ударника, мм	Скорость ударника, м/с	$w_{\max}$ , м/с	$\Delta w^*$ , м/с	$\partial w / \partial t$ , $10^6 \text{ м/с}^2$	$\sigma^*$ , ГПа	$\sigma^{**}$ , ГПа	$\Delta h$ , мм	$S_{K'}$ , ГПа
Дюралюминий Д16	15	2	$445 \pm 15$	$420 + 5$	$95 \pm 5$	$175 + 20$	0,70	0,77	1,8	0,4 [8]
Алюминий АД1	15	2	$445 \pm 15$	$430 + 10$	$103 + 6$	$440 + 40$	0,76	0,92	1,95	0,6 [9]
Медь М2	15	2	$445 + 15$	$265 + 5$	$67 + 4$	$275 + 25$	1,19	—	1,24	—
Никель НП2	9,5	2	$445 + 15$	$245 + 5$	$74 \pm 4$	$400 \pm 40$	1,49	—	1,46	—
Нержавеющая сталь Х18Н10Т	10	2	$445 + 15$	$235 + 5$	$106 + 7$	$350 + 35$	1,93	2,40	1,78	1,6 + 1,8 [9]
	10	2	$700 + 30$	$390 + 10$	$106 + 5$	$420 + 40$	1,93	2,44	1,61	
	10	5	$600 + 10$	$355 + 5$	$96 + 6$	$190 + 20$	1,75	—	—	
	10	—	Взрывная линза	$440 + 10$	$95 + 6$	$50 + 5$	1,73	2,0	6,9	
Железо «армко» [5]	10	2	$590 + 10$	$319 + 5$	$85 + 5$	$270 + 15$	1,54	1,83	1,1	1,2 [8]
	10	5	$590 + 10$	$347 + 5$	$72 + 4$	—	—	—	—	
	20	—	Взрывная линза	$476 + 10$	$72 + 5$	$56 + 3$	1,31	1,53	4,2	

Как видно из рис. 3 и табл. 1, увеличение амплитуды нагрузки не повлияло на реализуемую при отколе величину откольной прочности. Рост характерной длительности волны в 5—10 раз привел к небольшому, сравнимому с погрешностью эксперимента уменьшению величины  $\sigma^*$ . По-видимому, при затянутости конечной стадии разрушения нержавеющей стали начальная скорость процесса, определяющая появление откольного импульса [6], достаточно велика. Крутизна фронта откольного импульса и в случае длинной волны осталась меньшей, чем у других металлов.

Таким образом, даже при наиболее затянутом из наблюдавшихся процессе разрушения влияние фактора времени на реализуемую при отколе прочность невелико. Для оценки возможного вклада временного фактора желательно сопоставить полученные величины откольной прочности с прочностью материала, определяемой в квазистатических условиях.

Стандартные испытания на растяжение, проводимые в условиях одноосно напряженного состояния, дают две характеристики прочности — технический предел прочности  $\sigma_B$ , характеризующий максимальную нагрузку, выдерживаемую образцом, и истинное напряжение разрушения  $S_K$ , определяемое с учетом изменения поперечного сечения образца в «шейке».



В случае пластичных материалов превышение величины  $S_K$  над  $\sigma_B$  может быть большим. Очевидно, что величина  $\sigma_B$ , являясь характеристикой потери устойчивости образца (но не материала), не может служить основой для сопоставления прочност-

Рис. 3. Результаты опытов с нержавеющей сталью (1—4), железом «армко» (6) и закаленной сталью ХВГ (5). 1 — нагружение взрывной линзой; 2, 4 — нагружение ударником толщиной 2 мм; 3, 5, 6 — толщина ударника 5 мм.

ных свойств среды, определяемых в различных условиях нагружения — одномерной нагрузки при трехмерной деформации в стандартных испытаниях на растяжение и одномерной деформации (при этом все три главных нормальных напряжения не равны нулю) в случае откола. В соответствии с реологическими теориями прочности, определяющими критерий перехода от простых условий испытания к случаю сложного напряженного состояния, и результатами испытаний материалов при сложном напряженном состоянии [7], более объективной основой для сопоставления является величина максимального растягивающего напряжения, в данном случае —  $S_k$ . Найденные в литературе величины истинного напряжения разрушения  $S_k$  исследованных материалов при температуре испытаний  $20^\circ\text{C}$  — приведены в табл. 1.

Видно, что реализуемые при отколе максимальные величины растягивающих напряжений обычно лишь в 1,5—2 раза превышают  $S_k$ . При этом характерное время действия нагрузки в случае откола на 6—8 порядков меньше, чем при определении  $S_k$ . Вообще говоря, временные характеристики нагрузки должны оказывать влияние на реализуемое сопротивление разрушению, поскольку скорость разрушения, определяемая в грубом приближении произведением концентрации активированных очагов нагружения на скорость роста трещин или пор, не может быть сколь угодно большой. Однако полученные результаты позволяют утверждать, что при уменьшении характерных длительностей действия нагрузки до  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  с максимальное сопротивление разрушению есть слабая функция времени.

Результаты исследования откола путем анализа профилей скорости свободной поверхности и их сопоставление с данными квазистатических испытаний противоречат распространенному в литературе мнению о существенном влиянии длительности импульса нагрузки или толщины откалываемой пластины на реализуемую откольную прочность материала [10—13]. В связи с этим полезно более детально рассмотреть известные методы исследования откола. Для примера в табл. 2 суммированы литературные данные по отколу для меди и алюминия, полученные в экспериментах, достаточная степень одномерности нагрузки в которых не вызывает сомнения.

Наибольшие значения откольной прочности получены в работах со сравнительно сильными ударными волнами, где эта величина определялась путем измерения толщины откольной пластины и последующего газодинамического расчета максимального растягивающего напряжения в найденном сечении откола [12, 14, 16]. Можно отметить, что в подобных расчетах обычно не учитываются эффекты вязкости и сдвиговой прочности, но основная погрешность, по-видимому, связана с тем, что сам процесс разрушения ограничивает рост величины растягивающих напряжений по мере распространения отраженной волны разрежения в глубь образца [6]. Так как за сечение откола принимается некоторое усредненное по зоне разрушения сечение образца, так что по обе стороны от него материал в той или иной степени разрушен, то пренебрежение релаксацией растягивающих напряжений приводит к систематическому завышению рассчитываемых значений откольной прочности. Вводимая при этом погрешность, вообще говоря, зависит от условий нагружения.

Большой разброс результатов дает метод определения откольной прочности, основанный на нахождении критической скорости соударения пластин [15, 17]. При этом факт разрушения фиксируется анализом сохранных образцов и искомая величина критической скорости удара зависит от того, какова разрешающая способность используемой методики регистрации первых признаков разрушения. По-видимому, такие измерения наиболее информативны для исследования начального этапа разрушения. Однако, поскольку и в этом случае релаксация напряжений при разрушении не учитывается, расчет максимальных растягивающих напряжений при развитом разрушении сопряжен с систематическим завы-

## Литературные данные по откольной

Материал	Условия нагружения
Алюминий	Детонация накладного заряда высотой 6—100 мм, толщина образца 6—25 мм
Алюминий 6061-T6	Соударение пластин, толщина ударника 6 и 0,8 мм, толщина образца 25 и 3 мм
Дюралюминий Д-16	Детонация накладного заряда высотой 40 мм, толщина образца 10—40 мм
Алюминий P1C	Удар пластиной толщиной 0,26 мм, толщина образца 0,5—20 мм
Медь (монокристаллические и поликристаллические образцы)	Удар пластиной толщиной 5 мм со скоростью 2,4 км/с по образцу толщиной 24 мм
Медь	Детонация накладного заряда ВВ высотой 6—100 мм, толщина образца 6—25 мм
Медь электролитическая холоднокатаная	Соударение пластин, толщина ударника 1,2—3,2 мм, толщина образца 5—6,4 мм
Медь М1	Детонация накладного заряда высотой 40 мм при толщине образца 6—10 мм; удар медной пластиной толщиной 2 мм со скоростью 2,6 км/с по образцу толщиной 10 мм
Медь ОГНС	Соударение пластин, толщина ударника 0,75—3 мм, толщина образца 1,5—6 мм

пением результатов. В связи с этим едва ли имеет смысл и введение двух или трех порогов разрушения [17].

В работах [1, 10] для определения откольной прочности используются измерения начальной и средней скорости поверхности откалывающейся пластины. Такой подход оправдан, если разрушение имеет хрупкий характер, т. е. происходит практически мгновенно, а задаваемый в образце одномерный импульс сжатия имеет форму, близкую к треугольной. Непрерывная регистрация скорости поверхности показывает, что если процесс разрушения растянут во времени, то полное изменение скорости откольной пластины может быть значительно больше определяемого при той же величине максимального растягивающего напряжения в случае хрупкого откола.

Метод определения разрушающих напряжений из результатов непрерывной регистрации скорости свободной поверхности, будучи, как и другие методы исследования откола, косвенным, все же менее всех сопряжен с неучитываемыми источниками погрешности. Хорошим подтверждением достоверности получаемых этим способом данных о сопротивлении разрушению могут служить эксперименты по регистрации скорости поверхности в условиях выхода на нее импульсов сжатия различной амплитуды [3, 18]. В этих экспериментах показано, что «откольный импульс» на профилях  $w(t)$  появляется при достижении амплитуды нагрузки некоторой критической величины и при дальнейшем ее измерении величина перепада скорости  $\Delta w^*$  между первым максимумом и первым минимумом практически не изменяется.

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что утверждение о сильном влиянии фактора времени на реализуемые при отколе максимальные напряжения разрушения в значительной мере основано на недостаточно корректных измерениях откольной прочности.

Поскольку процесс разрушения требует довольно большого времени, сравнимого с длительностью ударно-волнового эксперимента, следует оп-

Таблица 2

## прочности алюминия и меди

Метод определения откольной прочности	Напряжение разрушения, ГПа	Литература
Измерение средней толщины откольной пластины, гидродинамический расчет максимальных растягивающих напряжений	1,7—5,0	[14]
Определение критической скорости соударения, при которой появляются признаки начала разрушения	0,9 2,1	[15]
Изменение начальной скорости свободной поверхности и средней скорости откольной пластины	1,1+0,3	[1]
Непрерывная регистрация скорости свободной поверхности	0,9—1,2 ( $\Delta w^* = 125 \pm 15$ м/с)	[3]
Измерение средней толщины откольной пластины, гидродинамический расчет максимальных растягивающих напряжений	10—15	[16]
То же	4—7	[14]
Определение критической скорости соударения, при которой появляются признаки разрушения	0,68—1,00	[17]
Измерение начальной скорости свободной поверхности и средней скорости откольной пластины	3,55—7,8	[1, 10]
Непрерывная регистрация скорости свободной поверхности образца	1,2	[18]

ределить, какую стадию разрушения характеризуют определяемые данным методом величины напряжений. Основываясь на результатах анализа в рамках континуальной модели разрушения [6], можно утверждать, что первый минимум на профиле  $w(t)$  соответствует достижению скорости роста удельного объема  $V_T$  образующихся при разрушении трещин, примерно равной скорости расширения вещества в разгрузочной части падающего импульса:  $\dot{V}_T \approx \rho_0^{-2} c_0^{-2} \dot{p} \approx \frac{\partial w}{\partial t} / 2\rho_0 c_0$ . Вопрос о достигнутой при этом глубине разрушения остается открытым, но, судя по виду профилей  $w(t)$ , отделение откольной пластины завершается существенно позже отмечаемого момента достижения максимальных растягивающих напряжений и происходит при пониженных напряжениях.

Таким образом, достаточно надежно определяется из эксперимента по отколу максимальное напряжение разрушения. Для решения вопроса о том, чем характеризовать возможность полного разделения образца при отколе (запасом полной или упругой энергии в образце или его части [13], величиной импульса давления нагрузки и т. д.), требуются дальнейшие исследования.

Автор благодарит Г. А. Савельеву за помощь в проведении измерений.

Поступила в редакцию 24/IX 1980

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. Физ. металлов и металлосведение, 1966, 21, 4, 608.
2. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ПТЭ, 1963, 7, 135.
3. C. S. Speight, P. F. Taylor, A. A. Wallace. Metallurgical effects at high strain rates. London, 1973.
4. Г. В. Степанов. Проблемы прочности, 1976, 8, 66.
5. Г. И. Канель, В. В. Щербаков. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.
6. Г. И. Канель, Л. Г. Черных. ПМТФ, 1980, 6.

7. Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976.
8. А. П. Ващенко. Проблемы прочности, 1978, 1, 87.
9. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1967.
10. В. М. Butcher, L. M. Barker et al. AIAA, J., 1964, 2, 6, 3.
11. Л. В. Альшuler, С. А. Новиков, И. И. Дивнов. Докл. АН СССР, 1966, 166, 1, 67.
12. L. J. Cohen, H. M. Berkowitz. Internat. J. Fract. Mech., 1971, 7, 2, 183.
13. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев. ФГВ, 1979, 15, 5, 70.
14. В. R. Breed, C. L. Mader, D. Venable. J. Appl. Phys., 1967, 38, 8, 3271.
15. D. W. Blinkov, D. W. Keller. ASTM Spec. Techn. Publ., 1962, 336, 252.
16. R. G. McQueen, S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1962, 33, 2, 654.
17. J. H. Smith. ASTM Spec. Techn. Publ., 1962, 336, 264.
18. S. Cochran, D. Banner. J. Appl. Phys., 1977, 48, 7, 2729.

УДК 533.6.071.8+533.9.03.15

## ИССЛЕДОВАНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ УДАРНЫХ ТРУБ

*И. А. Стадниченко, В. М. Титов, В. П. Чистяков,  
Г. А. Швецов  
(Новосибирск)*

Использование конденсированных взрывчатых веществ для генерации сильных ударных волн и высокоскоростных газовых потоков значительно расширило возможности ударных труб как аппаратуры для многочисленных задач высокоскоростной газодинамики и нестационарной магнитной гидродинамики. В настоящее время разработано несколько конструкций взрывных ударных труб, позволяющих получать в воздухе при нормальных условиях скорости ударных волн более 10 км/с при высокой плотности кинетической энергии в газовом потоке [1]. Несколько основных схем взрывных ударных труб, наиболее изученных в настоящее время, приведены на рис. 1.

В генераторе А. Е. Войтенко (рис. 1, а) [2] при взрыве заряда ВВ металлическая пластина ускоряется по направлению к вершине камеры сжатия. При движении пластины газ в камере сжимается несколькими сильными ударными волнами и выталкивается в канал ударной трубы. В воздухе при нормальных условиях скорость ударной волны достигает 40 км/с.

Во взрывной ударной трубе, разработанной Гиллом с сотрудниками (рис. 1, б) [3], при взрыве расположенной в геометрическом центре полусферы тонкой медной проволоки в стехиометрической кислородно-водородной смеси возбуждается детонация. Детонационная волна движется к периферии сферы и возбуждает детонацию в полусферической оболочке из тэна. Это порождает сходящийся к центру поток продуктов детонации, который сжимает газ в камере и выталкивает его в канал ударной трубы. Характерные скорости ударной волны в канале 10—20 км/с. В предложенной Гиллом и другими взрывной ударной тру-

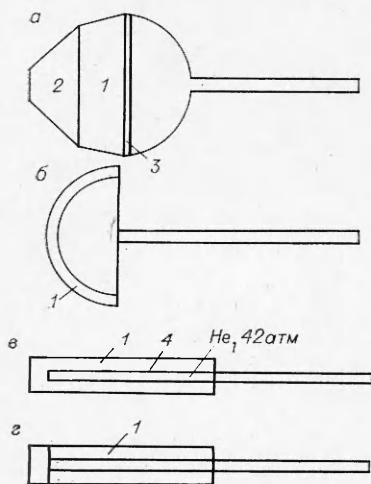


Рис. 1. Схема взрывных ударных труб.

а) труба Войтенко; б) труба УТИАС Гласса и др.; в) труба Гилла и др.; г) трубчатый газокумулятивный заряд ВВ. 1 — взрывчатое вещество; 2 — генератор плоской детонационной волны; 3 — металлическая пластина; 4 — тонкостенная трубка.