

Приведенные результаты достаточно хорошо иллюстрируют пути возникновения ошибок при интерпретации детонационных экспериментов с помощью приближенных моделей 1, 2. Утверждение об асимптотическом приближении общего решения к модели 1 независимо от кинетики реакций [4], хотя строго и не доказано, представляется наиболее вероятным. Это означает, что в точном смысле течение в плоской ДВ в зоне реакции и при последующем расширении нестационарно, за исключением специальных условий формирования ДВ.

Следовательно, и характеристики детонации, фигурирующие в моделях 1, 2, не могут быть определены с точностью выше некоторой, поскольку сами модели приближенные, как и характеристики, которые они включают ( $p$ ,  $a$  и т. д.). Конечно, для количественного согласования высказанных утверждений с конкретными экспериментальными данными требуется более детальное численное моделирование процесса, но качественные выводы представляются несомненными.

Поступила в редакцию 29/IV 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. C. Davis, J. B. Ramsay. The 7-th Symp. (Intern.) on Detonation. V. 2. Maryland, 1981.
2. М. В. Баталова, С. М. Бахрах, В. Л. Загрузкин и др. ПМТФ, 1974, 3, 79.
3. Т. Н. Фортова, К. Г. Шкадинский, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 69.
4. С. М. Бахрах, А. А. Евстигнеев, В. Н. Зубарев и др. ФГВ, 1981, 17, 6, 117.
5. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: ГИТТЛ, 1955.
6. R. E. Duff, E. J. Houston. J. Chem. Phys., 1955, 23, 8, 1268.
7. В. Н. Зубарев, Н. В. Панов, Г. С. Телегин. ФГВ, 1970, 6, 1, 107.

#### ЗАРОЖДАЮЩИЙСЯ ОТКОЛ В МЕДИ

*Е. А. Козлов, А. К. Музыря, Р. Х. Чинкова, Е. В. Шорохов*  
(Челябинск)

Отколом называют разрушение материала в волнах растяжения при взрывном или ударном нагружении. Это очень быстрый вид разрушения, и в упрощенной интерпретации он считается мгновенным. Предполагается, что при достижении растягивающим напряжением некоторой критической величины (откольной прочности) материал мгновенно теряет сплошность. В ряде исследований отмечался, однако, факт зависимости откольной прочности от длительности растягивающего напряжения. Указывается также на конечную протяженность во времени процесса зарождения и развития откола — от возникновения микропор и трещин до разделения материала [1—5]. Если нагрузка кратковременна, процесс может остановиться на какой-то стадии.

В данной работе путем варьирования длительности нагрузки реализована различная степень откольного повреждения меди. В количественном виде установлена связь между параметрами нагрузки и повреждениями.

Исследованы четыре образца из меди М1 в состоянии поставки. Средний размер зерна 30—40 мкм, плотность 8,90 г/см<sup>3</sup>. На поверхность образца наносили слой ВВ. При инициировании ВВ нагрузка распространяется вдоль поверхности контакта ВВ и образца со скоростью детонации  $D^*$ . Она формирует в материале наклоненную под углом  $\theta$  к этой поверхности ударную волну. Создается кратковременный импульс давления, способный вызвать откольное разрушение. Ударная волна затухает по мере ее распространения в материале. Чтобы в одном образце задать различные условия по растяжению и реализовать области с различной степенью откольного повреждения, образцы готовили переменной толщины. В клине растягивающие напряжения меняются непрерывно по амплитуде и длительности.

Предмет исследования — степень откольного повреждения как функция параметров нагрузки (ее длительности). Степень повреждения оценивали при непосредственном наблюдении произведенных разрушений. Прошедший нагрузке образец разрезали в продольном направлении. По шлифам из различных областей сечения определяли размеры пор и устанавливали их количество.

Прямого измерения времени действия растягивающих напряжений не проводили. Вместо него по [6] можно использовать эквивалентную характеристику — градиент давления за фронтом ударной волны. В нашем же случае использовано связанное с градиентом уменьшение давления во фронте волны по мере распространения ее в материале. С этой целью определено давление на разных толщинах образцов.

Для регистрации волновых процессов применен известный метод оптического рычага [7]. Суть его состоит в следующем. Ударная волна, выходящая на свободную поверхность под небольшим углом, вызывает поворот поверхности. По углу поворота  $\alpha$  определяется скорость поверхности  $w$ , а по времени скольжения волны вдоль нее судят о волновой скорости  $D$

$$w = D_c \alpha, \quad D = D^* \sin \theta(A, D_c),$$

где  $D_c$  — скорость скольжения волны;  $A$  — угол клинового образца.

Для регистрации угла поворота и скорости скольжения перед полированной поверхностью устанавливали щелевые источники света. Положение изображений этих источников в пространстве и времени фиксировали камерой фоторегистратора. Приход волны на участок, которым отражается соответствующий источник, сопровождался скачком его изображения (рис. 1). Величина скачка пропорциональна углу поворота. Процесс повторяли с каждым из источников. По времени их последовательного включения в работу можно определить скорость скольжения волны  $D_c$ . Давление во фронте ударной волны на различных толщинах образцов рассчитывается по соотношению  $p = \rho_0 D w / 2 \cos(\theta - A)$ . Пройденный волной путь  $r = x / \cos \theta$ , где  $x$  — переменная толщина образца.

В трех опытах из четырех откол полностью отделился от образца. Это произошло при нагрузке, создаваемой взрывом ВВ толщиной 2; 0,8 и 0,5 мм. Картина разрушения отличается лишь толщиной откола и шероховатостью поверхности. Они растут с увеличением толщины ВВ.

В опыте с ВВ толщиной 0,3 мм на образце обнаружены зоны с различной полнотой откольного разрушения. Так, на толщинах образца 9—16 мм нагрузка смогла вызвать только появление отдельных пор размером 0,02 мм, сосредоточенных на расстоянии  $\sim 1$  мм от свободной поверхности. Расстояние между порами 0,03—0,3 мм. Суммарная площадь пор в плоскости разреза составляет примерно десятую часть от площади неповрежденного материала. Некоторые поры успевают вырасти до 0,08 мм. Редкие отдельные трещины достигают длины 0,1—0,2 мм. На толщинах образца 6—9 мм процесс откольного разрушения развивается более значительно. За счет роста размеров пор, их слияния вдоль границ зерен образуются протяженные трещины длиной 0,3—0,8 и шириной до 0,05 мм. В тонкой части образца (менее 6 мм) произошло полное отделение откольного слоя толщиной 0,3—0,5 мм. Параметры нагрузки оказались достаточными для разрушения — от возникновения зародышей до полной потери сплошности.

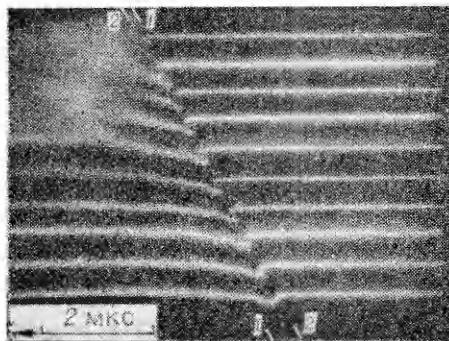


Рис. 1. Выход падающей ударной волны (1) и волны, возникшей при отколе (2).



Рис. 2. Состояние медного образца после нагружения ( $\times 100$ ).  
 а) полностью отделившийся откол; б) трещины; в) отдельные поры.

Характер повреждения материала в разных зонах иллюстрируется рис. 2. Существование зон обусловлено различием условий нагружения на участках образца. В частности, значительно изменяется выбранная характеристика  $\Delta p/\Delta r$ . Методом оптического рычага определено давление во фронте затухающей волны по мере ее распространения в материале.

Давление в зависимости от толщины образца  $x$  или пройденного пути  $r$  отражает затухание ударной волны и описывается сглаженной кривой. Отдельные точки этой кривой, соответствующие местам измерения, приведены в таблице. Они отличаются по давлению не более чем на 5% от экспериментальных значений, что находится в пределах погрешностей регистрации.

По давлениям  $p_i$  в отдельных точках  $r_i = x_i/\cos\theta$  вычисляются значения  $\Delta p/\Delta r$  для середины отрезков  $[x_i, x_{i+1}]$ . Кривые  $\Delta p/\Delta r = f(x)$  изображены на рис. 3. Для двух других опытов, в которых эта характеристика изменяется не так сильно, обозначены средние значения. Погрешность  $\Delta p/\Delta r$  оценивается в 10%.

Сравнение графика с картиной разрушения позволяет сделать следующий вывод. Ударная волна со слабым изменением параметров за фронтом (что отражается в слабом изменении амплитуды давления

Толщина ВВ, мм	$x$ , мм	$p$ , кбр	Толщина ВВ, мм	$x$ , мм	$p$ , кбр
0,3	2,4	47,0	0,5	1,5	77,0
	4,0	36,0		3,2	64,0
	5,6	32,0		4,9	56,0
	7,4	29,0		6,5	51,0
	9,1	26,5		8,0	47,0
	10,8	25,0		9,6	43,5
	12,4	24,5		11,1	40,5
	14,1	24,0		12,6	37,5
			14,1	34,5	

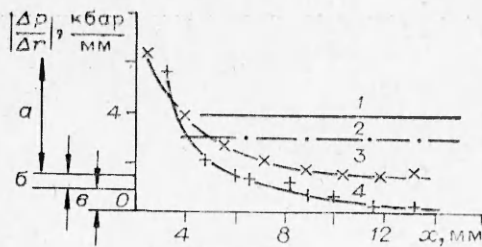


Рис. 3. Интенсивность затухания ударных волн.

Толщина ВВ, мм: 1—2, 2—0,8, 3—0,5, 4—0,3. а) полное отделение откола; б) трещины; в) поры.

по мере распространения волны,  $\Delta p/\Delta r < 1,0$  кбар/мм) вызывает в меди только появление пор. При  $\Delta p/\Delta r = 1,0 \div 1,5$  кбар/мм в материале возникают трещины, а при больших значениях процесс откольного разрушения завершается полной потерей сплошности и отделением откольного слоя. Из графика видно, что в остальных трех опытах  $\Delta p/\Delta r > 1,5$  кбар/мм. В этих образцах отделение откола произошло на всей поверхности.

Зоны разрушений охарактеризованы размерами пор и трещин. Интересно проследить за поведением еще одной косвенной характеристики полноты разрушения. Пик скорости свободной поверхности возникает в момент выхода на нее ударной волны (см. рис. 1), а далее движение происходит с замедлением. Следующий пик вызван волной, распространяющейся от места образования откола. В идеальном случае мгновенного откола пики одинаковы по величине. Но для реального, протяженного во времени откола второй пик меньше. Замечено [8], что его величина зависит от степени повреждения, и отношение значений второго и первого пика может характеризовать полноту откольного разрушения.

Запись волновых процессов позволяет провести подобную оценку. Среднее значение этого параметра в опытах с полным отделением откольного слоя равно 0,7—0,8. В опыте с ВВ толщиной 0,3 мм он составляет около 0,6 с тенденцией уменьшения по мере ослабления повреждений. При малых откольных повреждениях этот параметр близок к 0,5, что для меди в [8] определено как критическое условие зарождения повреждений при конкретных условиях испытания.

Поступила в редакцию 29/IV 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 4, 608.
2. Н. А. Златин, С. А. Мочалов, Г. С. Пугачев и др. ФТТ, 1974, 16, 6, 1752.
3. А. Н. Дремин, А. М. Молодец. ПМТФ, 1980, 6, 85.
4. L. Davison, A. L. Stevens. J. Appl. Phys., 1972, 43, 3, 988.
5. А. И. Глушко. Изв. АН СССР. МТТ, 1978, 5, 132.
6. J. C. Peck, H. M. Berkowitz, L. Cohen. Int. J. Fract. Mech., 1969, 5, 297.
7. G. R. Fowles. J. Appl. Phys., 1961, 32, 8, 1475.
8. S. Cochran, D. Banner. J. Appl. Phys., 1977, 48, 2729.