

хорошо совпадают с наблюдаемыми. Небольшие количественные расхождения, как правило, можно связать с индивидуальными особенностями неоднородного нагружения образца в каждом конкретном опыте, носящими случайный характер.

Поступила в редакцию  
21/VI 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Якушев, А. Н. Михайлов. В сб. «Второй всесоюзный симпозиум по горению и взрыву». Ереван, 1969.
2. В. В. Якушев, С. С. Набатов, А. Н. Дремин. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
3. F. E. Allison. J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.
4. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1967, 53, 1.
5. А. Г. Иванов, Ю. В. Лисицын, Е. З. Новицкий. ЖЭТФ, 1968, 54, 1.
6. D. V. Larson, C. J. Siseberg. J. Appl. Phys., 1968, 39, 12.
7. Р. М. Зайдель. ЖЭТФ, 1968, 54, 4.
8. В. В. Якушев. ПМТФ, 1972, 4.
9. G. E. Hauver. J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.
10. А. Г. Иванов, Е. З. Новицкий и др. ЖЭТФ, 1967, 53, 1.
11. D. L. Styris, G. E. Duvall. High Temperat.— High Press, 1970, 2, 5.
12. S. D. Hamann, M. Linton. Trans. Faraday Soc., 1966, 62, 8.
13. В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ЖФХ, 1971, 45, 1.
14. О. В. Yakusheva, V. V. Yakushev, A. N. Dremm. High Temperat.— High Press., 1971, 3, 3.
15. В. В. Якушев, С. С. Набатов, О. Б. Якушева. Докл. АН СССР, 1974, 214, 4.
16. О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин и др. ЖЭТФ, 1971, 61, 9.
17. R. J. Eichelberger, G. E. Hauver. Solid state transducers for recording of intense pressure pulses. Collog. Internat. Centre Nat. Rech. Sci, 1962, No 109.
18. В. Н. Минеев, Ю. Н. Тюняев и др. Изв. АН СССР, Сер. Физика земли, 1968, 4.
19. В. В. Якушев, С. С. Набатов, О. Б. Якушева. ФГВ, 1974, 10, 4.

УДК 662.215.4

#### РАЗРУШЕНИЕ И ИНИЦИИРОВАНИЕ ТОНКОГО СЛОЯ ВВ ПРИ УДАРЕ

Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, Ю. Ф. Карабанов,  
В. Г. Щетинин

(Москва)

В задачах чувствительности взрывчатых веществ к удару и трению особый интерес представляет изучение механизма деформации и разрушения тонкого слоя. Условия воздействия по тонкому слою являются наиболее распространенными для механического инициирования твердых ВВ [1]. Некоторая информация о характере разрушения тонких слоев при ударе, расположении поверхностей разрыва и выделении на них тепла была получена в работе [2] на примере инертных веществ. При этом использовались термоиндикаторы, главным образом кристаллогидрат лимоннокислого железа, наиболее ярко и контрастно изменяющий цвет при разогреве на поверхностях трения — скольжения. Нагружение тонкого диска производилось по схеме, изображенной на рис. 1, а. На рис. 2 схематично показано осевое сечение образца (пересечение поверхностей скольжения с плоскостью сечения выделено жирными линиями). Стрелками показано предполагаемое движение жест-

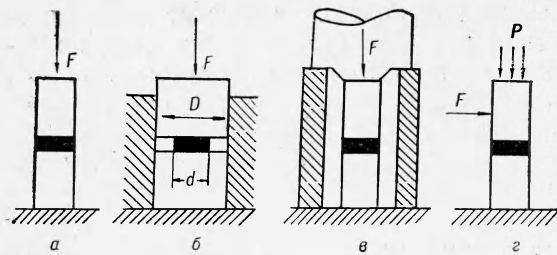


Рис. 1.

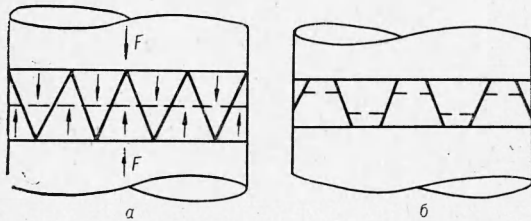


Рис. 2.

Измерения давления в процессе нагружения исследуется механика разрушения, а также измеряются критические параметры инициирования тэна при различной жесткости системы нагружения. Все приводимые результаты относятся к прессованным образцам.

Идея одного из методов визуализации заключается в наблюдении за искажением какой-либо плоскости, пересекающей образец. Пусть это будет плоскость, показанная на рис. 2, а штриховой линией. Если описанная выше картина разрушения верна, то выделенная плоскость в осевом сечении примет вид, показанный штриховыми линиями на рис. 2, б. Испытываемый образец прессовался последовательно из двух слоев вещества. Один из слоев подкрашивался небольшой добавкой или порошка красителя. Такой двуцветный образец подвергался удару. Разлом образца по диаметру после разрушения показан на рис. 3, а. Отчетливо видно взаимное проникновение темных и светлых частей образца, что подтверждает факт осевого движения элементов навстречу друг другу.

Ставились также опыты с подкраской вещества по средней плоскости образца. После удара и разрушения в остаточном образце наблюдалось распределение окрашенных частей, аналогичное распределению границы разных цветов на рис. 3, а. Кроме этого, проводились опыты с рядом инертных веществ и некоторых штатных ВВ с запрессовкой в образец по средней плоскости алюминиевой, свинцовой или медной фольги толщиной 0,05—0,1 мм. При больших деформациях образца фольга разрывается на полоски, а при малых имеет вид, показанный на рис. 3, б. Очевидно, что гофрировка фольги происходит в результате перемещения частей образца при разрушении.

Для поэтапного контроля за движением элементов разрушающегося образца применялся способ «дозированной» деформации, заключающийся в следующем. Образец диаметра  $d$  помещался между пуансонами большего диаметра  $D$  и нагружался ударом. Муфта, которая служит направляющей для пуансонов, ограничивает деформацию образца (см. рис. 1, б). Отношение начальной толщины к конечной задается при этом отношением  $\frac{D^2}{d^2}$ . Визуализация конечной картины разрушения осуществлялась либо с помощью фольги, либо тонкого слоя краски, нанесенного по какой-либо плоскости, перпендикулярной оси образца. Выход краски, нанесенной по средней плоскости образца, на обе тор-

ких недеформируемых элементов образца. Встречное движение этих элементов по вертикали должно происходить совместно с расширением слоя в радиальном направлении. При радиальном движении элементы, треугольные в сечении, стираются (или плавятся) на вершинах, упирающихся в контактную поверхность, и в сечении образуются трапеции.

В настоящей работе приводятся результаты разработки методов визуализации, пригодных для изучения деформации и разрушения не только инертных, но и взрывчатых веществ. С помощью

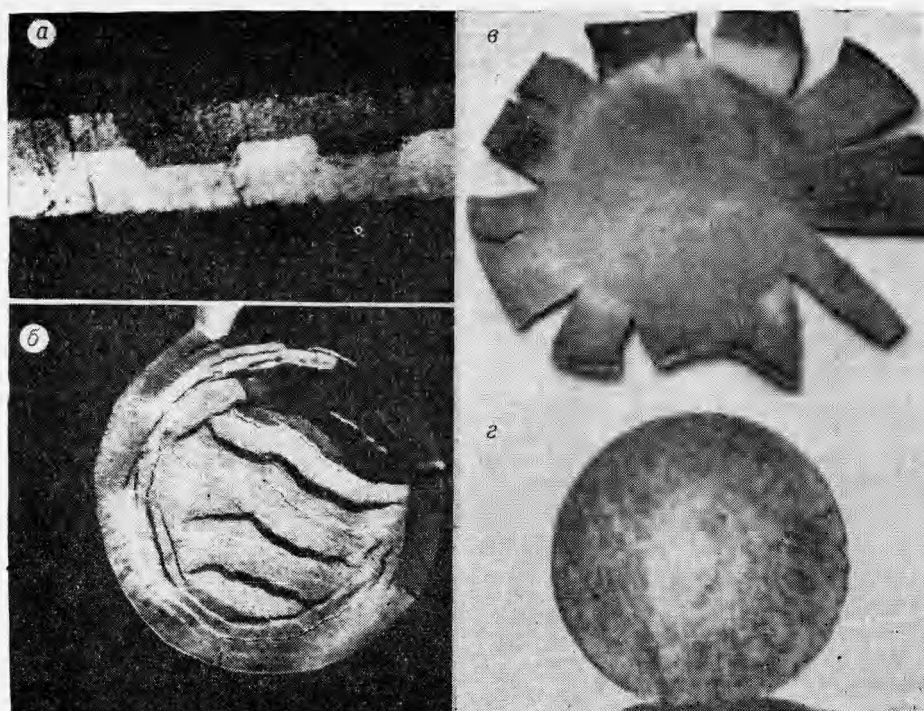


Рис. 3.

цевые поверхности имеет место при  $D \geq \sqrt{2d}$ . Выход внутренних слоев вещества на контактную поверхность, по которой происходит трение вещества с пуансоном, представляет интерес для объяснения сенсibiliзирующего действия тугоплавких частиц (даже при их малой концентрации) [3].

Другим способом, позволяющим задержать деформацию на определенном этапе, служила остановка груза в процессе разрушения образца. Остановка осуществлялась с помощью ограничителя, установленного на пути движения груза (рис. 1, в). Этот способ, как будет ясно из дальнейшего, пригоден для не слишком тонких образцов. Для большинства веществ снимались осциллограммы давления при ударе по методике, описанной в [1]. Осциллограмма удара по схеме а (см. рис. 1), соответствующая разрушению образца с появлением треугольных в сечении элементов, показана на рис. 4, а. Осциллограмма нагружения такого же образца с остановкой груза дана на рис. 4, б. Нижний луч служит масштабом времени (метки времени следуют через 100 мкс) и одновременно используются для фиксации момента взрыва по электрическому замыканию пуансонов ионизованными продуктами взрыва.

Большинство испытывавшихся инертных органических и неорганических веществ (гексахлорбензол, дифениламин, фенолфталеин, фенол, янтарная и щавелевая кислоты, полиметилметакрилат,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$  и др.) разрушались, как показано на рис. 2. Назовем такой механизм разрушения квазихрупким. Так же разрушались испытывавшиеся взрывчатые вещества: тэн, октоген, гексоген, тротил, тетрил и пироксилин.

Для некоторых веществ, однако, подобную картину разрушения получить не удалось. Наиболее ярким примером таких веществ может служить хлористое серебро. Это вещество ведет себя при ударе пластично. Остаточный образец  $\text{AgCl}$  после удара показан на рис. 3, в. Нагружение производилось по схеме рис. 1, а. Размер центральной об-

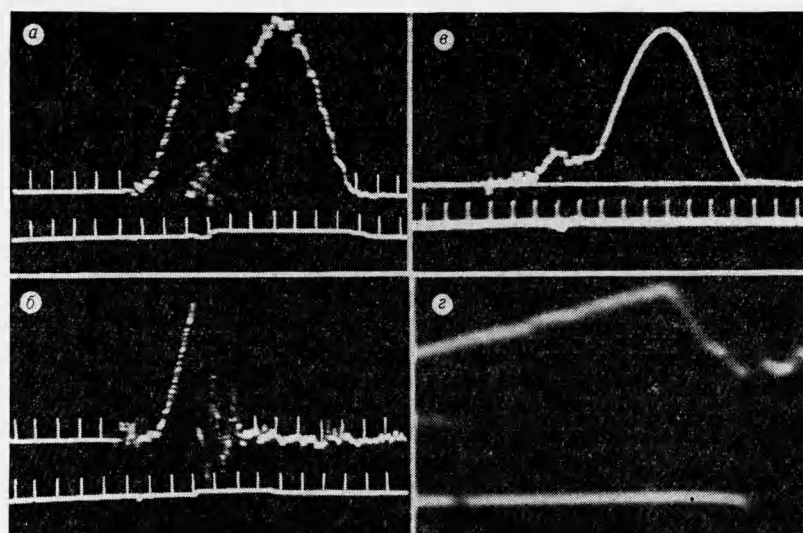


Рис. 4.

ласти без радиальных разрывов соответствует начальному диаметру образца. Типичная осциллограмма нагружения образца  $\text{AgCl}$  показана на рис. 4, в. Такие вещества, как парафин,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , тэн с добавкой 5% парафина и некоторые другие также не обнаружили появления при разрушении треугольников в сечении по диаметру образца. Опыты с подкраской этих веществ по средней плоскости образца показали, что после разрушения краска так и остается на средней плоскости даже при уменьшении толщины таблетки при ударе в несколько раз. На рис. 3, г представлена фотография деформированного по схеме рис. 1, б диска парафина, полученная в проходящем свете. Конечный диаметр образца после удара в два раза больше начального. Слой краски, нанесенный на среднюю плоскость образца, переместился при ударе в радиальном направлении без искажения плоскости. Светлое пятно на фотографии соответствует величине перемещения вещества от оси образца.

На образцах из нафталина и динитропиперазина удалось получить оба описанных варианта деформации. Образцы из этих веществ диаметром 10 мм и толщиной 1 мм при ударе текут подобно хлористому серебру до толщины  $\sim 0,5$  мм, после чего разрушаются хрупко с образованием треугольных элементов в сечении по диаметру. Эти варианты деформирования тонкого слоя с точки зрения рассматриваемых в теории вполне представимы: «треугольной» структурой задаются в инженерной теории при экстремальных оценках несущей способности слоя [4]. Получаемые углы наклона поверхностей скольжения, как указывалось ранее [2], соответствуют теоретическим для растяжения полосы [5], а пластическое растекание слоя может быть отождествлено с известным решением Прандтля [6]. Менее понятны причины, приводящие к той или другой картине деформации. В дальнейшем обсуждается только хрупкий механизм разрушения как наиболее распространенный для твердых ВВ.

Опыты с термоиндикаторами показали, что при хрупком разрушении тонких слоев могут достигаться достаточно высокие температуры. Согласно [3, 7], разогрев при разрушении ВВ лимитируется температурой плавления. В работе [8] показано, что при увеличении температуры плавления под давлением до уровня критической температуры создаются условия для инициирования ВВ. Сам факт плавления при разрушении наблюдается при испытаниях инертных веществ, таких как

фенолфталеин,  $\text{AgNO}_3$  и некоторых других. У образцов из этих веществ заметно отличается область плавившегося в процессе разрушения вещества от неплавившейся области из-за изменения оптических свойств плавившегося вещества. Отметим, что фенолфталеин благодаря этим свойствам используется в качестве стандартного термоиндикатора плавления [9]. Во всех опытах плавление наблюдалось на поверхностях скольжения.

Разогрев вещества на поверхностях скольжения в случае ВВ может привести к инициированию взрыва. В качестве энергетического источника локальных разогревов помимо упругой энергии, запасенной в образце, следует принять энергию, запасенную до разрушения в пуансонах, ударнике и других деталях, участвующих в ударе. Будем называть все эти детали системой нагружения. Отметим, что основной запас потенциальной энергии приходится на пуансоны. При достижении условия прочности образец начинает разрушаться, а затем разрушение происходит самопроизвольно. Модельное представление о таком процессе дано в работе [1] и подтверждено также расчетом на ЭВМ [10].

Трение на поверхностях скольжения можно рассматривать как «элементарный» процесс локального разогрева, возможность воспламенения при котором определяется режимом трения (скорость, давление) и временем. Поскольку разогрев при трении до критических температур занимает определенное время, то представляет интерес измерение времени от начала разрушения до взрыва.

Процесс разрушения изучался с помощью механической развертки сигнала с экрана осциллографа ждущим фоторегистратором ЖФР-1м со скоростью 200 м/с. Использование высокочувствительной фотопленки и повышение яркости луча осциллографа позволили получить удовлетворительную запись процесса разрушения. Участок развертки, соответствующий разрушению, дан на рис. 4, г. Приведен случай разрушения тэна со взрывом, нижний луч фиксирует момент замыкания пуансонов продуктами взрыва.

Таким способом при ударе по схеме а (см. рис. 1) были получены развернутые записи нагружения и разрушения образцов тэна диаметром 10 мм в диапазоне толщин от 0,1 до 5 мм. Обозначим характерные точки на осциллограмме следующим образом (рис. 5):  $\bar{p}_{\text{пр}}$  — давление, при котором начинается разрушение;  $\bar{p}_m$  — давление в конце разрушения;  $\Delta\bar{p} = (\bar{p}_{\text{пр}} - \bar{p}_m)$  — спад давления при разрушении;  $\tau_p$  — время разрушения;  $\tau_z$  — время от начала разрушения до возникновения электропроводимости. Процедура обсчета осциллограмм давления излагалась в работе [1].

В исследовавшемся диапазоне толщин с увеличением толщины  $\tau_p$  увеличивается от 10—15 до  $\sim 80$  мкс. В критических условиях ( $h \cong \cong 0,3$  мм) время разрушения составляет 15—20 мкс. Время задержки с увеличением давления разрушения уменьшается от  $\sim 20$  (что примерно равно времени разрушения) до  $\sim 5$  мкс.

Значения относительного спада давления  $\frac{\Delta\bar{p}}{\bar{p}_{\text{пр}}}$  в зависимости от начальной толщины образца показаны на рис. 6, а. При достаточно малой начальной толщине спад давления происходит не до нуля, т. е. система разгружается не полностью. На основании полученных данных механика разрушения образца представляется следующим образом. Для разрушения образца толщиной  $h$  и диаметром  $D$  необходимо дав-

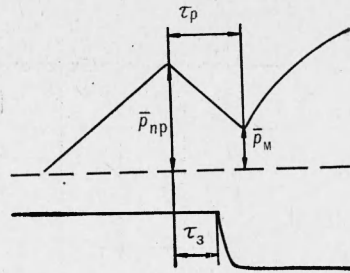


Рис. 5.

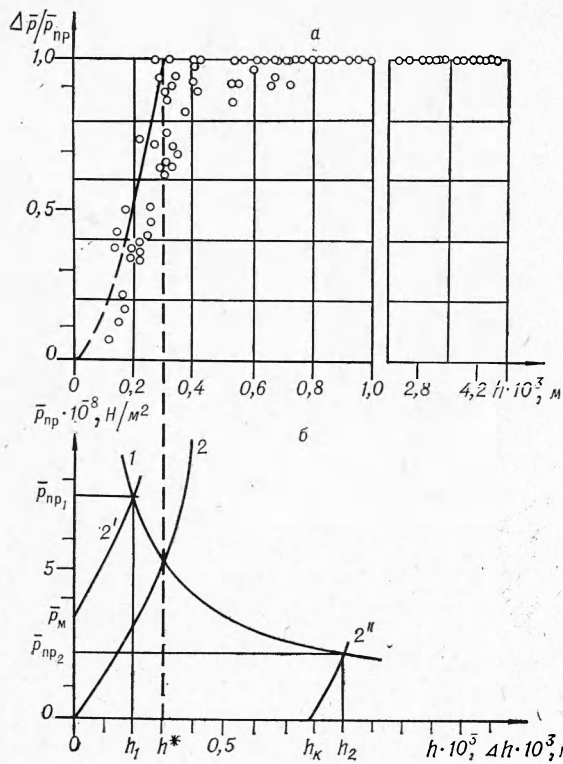


Рис. 6.

верхности пуансона. Зависимость  $\bar{p}(\Delta h)$  находится из обсчета осциллограмм удара по неснарженному приборчику (холостой удар) [1] (см. рис. 6, б, кривая 2). Как показывает обсчет осциллограмм, образец до разрушения деформируется незначительно, поэтому считаем, что разрушение начинается при начальной толщине. После достижения в образце давления  $\bar{p}_{пр}$  начинается разрушение, которое идет до максимально возможного выделения упругой энергии, запасенной в системе нагружения. Это приводит к двум различным случаям.

Если начальная толщина образца  $h_1 < h^*$  ( $h^*$  определяется пересечением кривых 1 и 2 на рис. 6, б), то после достижения давления  $\bar{p}_{пр}$  разрушение идет практически до полного выброса вещества образца, и система разгружается до давления  $\bar{p}_м$ , определяемого пересечением кривой разгрузки 2' с осью ординат. Кривая 2' есть кривая 2, сдвинутая влево до пересечения с кривой 1 в точке, соответствующей  $h_1$ . Действительно, как показывают опыты, если начальная толщина образца  $h < h^*$ , при отсутствии взрыва после разрушения остается только пленка вещества толщиной 0,02—0,05 мм.

Если же начальная толщина образца  $h_2 > h^*$ , то после достижения давления  $\bar{p}_{пр}$  разрушение идет до полной разгрузки системы. Конечное давление разрушения равно нулю, а конечная толщина образца  $h_k$  определяется пересечением кривой разгрузки 2'' с осью абсцисс. Кривая 2'' есть кривая 2, сдвинутая вправо до пересечения с кривой 1 в точке, соответствующей  $h_2$ . После этого начинается новое нагружение, и возможно повторное разрушение оставшегося слоя, если груз обладает еще достаточной кинетической энергией. Остановка груза в процессе удара (см. рис. 1, в), не влияя на прохождение разгрузки, позволяет «отключить» оставшуюся часть процесса на любом этапе нагружения. Осциллограмма на рис. 4, б иллюстрирует отключение процесса удара после первого разрушения. В этом случае структура хрупкого

ление  $\bar{p}_{пр}$ , определяемое [1] соотношением

$$\bar{p}_{пр} = \sigma_{пр} \left( 1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{пр}$  — предел прочности образцов данного вещества. Зависимость  $\bar{p}_{пр}(h)$  при постоянном  $D=10$  мм представлена на рис. 6, б кривой 1 для тэна. При нагружении образца до давления  $\bar{p}_{пр}$  в системе нагружения запасается упругая энергия  $E_{с.н}$ , которую можно найти из выражения:

$$E_{с.н} = S \int_0^{\Delta h_m} \bar{p}(\Delta h) dh.$$

Здесь  $\bar{p}(\Delta h)$  — зависимость давления от величины сжатия системы нагружения;  $\Delta h_m$  — максимальное сжатие системы нагружения, соответствующее давлению  $\bar{p}_{пр}$ ;  $S$  — площадь торцевой поверхности пуансона.

разрушения хорошо видна, последующее же нагружение делает образец снова оптически однородным. Для образцов малой толщины ( $h < h^*$ ) применение остановки груза неинтересно.

Баланс энергии для случая, когда процесс разрушения развивается за счет упругой энергии, запасенной в системе нагружения  $E_{с.н}$  и в заряде  $E_{вв}$ , записывается следующим образом:

$$\Delta E_{с.н} + \Delta E_{вв} + \Delta W_{с.н} + \Delta W_{вв} + \Delta Q_{вв} = 0, \quad (2)$$

где  $W_{вв}$  — кинетическая энергия движения ВВ;  $Q$  — работа неупругой деформации заряда (количество выделенного тепла);  $W_{с.н}$  — кинетическая энергия движения деталей, образующих систему нагружения. Интересно проследить за влиянием величины упругой энергии, аккумулированной перед разрушением, на критические условия инициирования взрыва, которые определяются режимом трения при разрушении.

Величину потенциальной энергии легче всего варьировать (изменяя жесткость системы нагружения) при испытаниях ВВ по схеме Боудена — Козлова (см. рис. 1, з), которая позволяет наиболее точно измерять критическое напряжение в тонком слое [11]. Схемы а и з (см. рис. 1), как было показано ранее [2], приводят к одинаковой картине разрушения, если условия нагружения (давление, размеры образца) отвечают соотношению (1). Критическое напряжение в этом случае соответствует верхнему пределу кривой частоты взрывов.

Измерения проводились на копре К-44-III. Из 25 параллельных испытаний находился верхний предел кривой частоты для навески тэ-на 45 мг ( $h = 0,32$  мм). Точность измерений, определяемая шагом изменения давления прижатия, составляла  $3 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>. Данные приведены в таблице в порядке уменьшения жесткости системы нагружения. Для всех случаев при помощи механического измерителя перемещений

$\bar{p}_{кр} \cdot 10^{-8}$ , Н/м <sup>2</sup>	$\bar{p}' \cdot 10^{-8}$ , Н/м <sup>2</sup>	$E_{с.н}^0$ , Дж	$E'_{с.н}$ , Дж	$\Delta E_{с.н}$ , Дж	$\Delta \bar{p} \cdot 10^{-8}$ , Н/м <sup>2</sup>	$\frac{\Delta E}{\Delta \bar{p}} \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup>
6,3	4,9	9,2	5,8	3,4	1,4	2,4
5,3	4,4	14,7	10,2	4,5	0,9	5,0
5,1	4,3	24,4	18,4	6,0	0,8	7,5

Примечание. Первая строка соответствует обычной конструкции прибора К-44-III, во второй и третьей строке приведены данные при введении в конструкцию дополнительного столба роликов длиной 120 мм и диаметром 10 и 7 мм соответственно.

были сняты зависимости смещения плунжера от давления, и их интегрированием найдены зависимости энергии  $E_{с.н}$  от давления. Начальные значения давления и энергии обозначены в таблице через  $\bar{p}_{кр}$  и  $E_{с.н}^0$ , конечные через  $\bar{p}'$  и  $E'_{с.н}$ . Величинами  $\Delta \bar{p}$  и  $\Delta E$  представлены спад давления ( $\bar{p}_{кр} - \bar{p}'$ ) и изменение энергии в системе нагружения  $E_{с.н}^0 - E'_{с.н}$  при испытании. При давлениях ниже критического спад давления в случаях взрыва и отказа практически одинаков, поэтому будем считать, что в критических условиях изменение упругой энергии равно работе процесса. Поскольку конечное состояние системы нагружения является состоянием покоя, считаем, что  $\Delta W_{с.н} = 0$ . Кроме того, согласно простым оценкам, величина  $\Delta E_{вв}$  значительно меньше  $\Delta E_{с.н}$  и тем более меньше величины  $E_{с.н}$ . Таким образом, из (2) следует, что изменение потенциальной энергии в системе нагружения приблизительно равно работе, затраченной на неупругую деформацию и выброс заряда

$$\Delta Q_{вв} + \Delta W_{вв} \cong -\Delta E_{с.н}$$

В таблице приведена также величина  $\frac{\Delta E_{с.н}}{\Delta p}$ , пропорциональная выделению энергии на единицу перемещения  $\frac{dE}{dh}$ . Представленные данные свидетельствуют о закономерном снижении критического напряжения с увеличением работы процесса, приблизительно равной  $\Delta E_{с.н}$ , и величины  $\frac{dE}{dh}$ . При наименьшей жесткости системы нагружения процессы разрушения, разогрева и инициирования протекают примерно при постоянном среднем давлении. Это указывает на определенные перспективы экспериментального изучения инициирования взрыва при простейшем режиме трения в условиях постоянного давления, который рассматривался в работе [12].

В заключение остановимся кратко на недавно опубликованных результатах Хивенса и Филда [13]. Они наблюдали поведение тонкого слоя между стеклянными пуансонами при нагружении ударом с помощью высокоскоростной покадровой фотосъемки в проходящем свете. Испытывались различные вещества (наиболее подробно тэн) в сыпном состоянии. Навеска 13—20 мг располагалась в круге диаметром  $\sim 7$  мм в центре пуансонов большего диаметра. Дадим объяснение приведенным в работе [13] кадрам в сопоставлении с авторской интерпретацией.

В начальной стадии удара наблюдается радиальное струйное движение вещества на расстояние, примерно равное начальному радиусу навески. По нашему мнению, эти «струи» есть потоки наиболее легких частиц вещества, которые увлекаются воздухом, вытекающим из начального слоя при сжатии. Оценка скорости вытесняемого воздуха ( $\sim 100$  м/с) совпадает со скоростью разлета. Разброс вещества в начальной стадии при испытании сыпных образцов делает неопределенной толщину слоя, подвергающегося основному нагружению, что препятствует, как отмечалось в работе [1], точным измерениям.

В последующих стадиях нагружения на контактной поверхности вещества наблюдается образование полос. Затем навеска становится прозрачной и быстро увеличивается в диаметре. Авторы [13] говорят о возможности объяснения возникновения полос образованием некоей волновой структуры в веществе, возникающей при движении струй. Прозрачность и быстрое увеличение диаметра навески Хивенс и Филд связывают с полным плавлением навески. По нашему мнению, в этих опытах наблюдался выход поверхностей скольжения, описанных в настоящей работе, на контактную поверхность спрессованной и начинающей разрушаться части навески. Расстояние между полосами примерно равно толщине слоя, что соответствует рассматривавшейся выше картине хрупкого разрушения. Что касается прозрачности навески, то известно, что многие сильно спрессованные вещества, включая тэн и гексоген, хорошо пропускают свет, что, однако, не означает их плавления. Кроме того, прозрачность можно объяснить разогревом и плавлением вещества при трении на поверхностях скольжения. С этим процессом, по-видимому, связано исчезновение полос на стадии быстрого радиального расширения образца. Это быстрое расширение также можно объяснить описанной выше картиной разрушения (см. рис. 2). Ввиду неоднородности образца и искажения идеального распределения давления [1] просветление и образование полос происходит одновременно по всему образцу, а разрушение и быстрое расширение его несимметрично. На той стороне, где впервые появляется просветление, сосредоточена наибольшая удельная нагрузка, и разрушение образца (расширение слоя) начинается именно в этом месте. В процессе расширения имеет место перестройка распределения давления, влияющая на режим трения и определяющая в конечном итоге место образования «горячих то-



чек» и очагов инициирования. Месторождение их, однако, может не совпадать из-за наличия периода индукции воспламенения.

Таким образом, работа [13], ограниченная, к сожалению, исследованием слоев узкого диапазона толщин, может рассматриваться как подтверждение излагавшейся выше картины хрупкого разрушения и инициирования тонких слоев твердых вторичных ВВ.

Поступила в редакцию  
31/VIII 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Г. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., «Наука», 1968.
2. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. ФГВ, 1972, 8, 2.
3. Ф. Ф. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких взрывчатых веществах. М., ИЛ, 1955.
4. S. Kobayashi and E. G. Thomsen. Int. J. Mech. Sci. 1965, 7, 2.
5. Т. Томас. Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М., «Мир», 1964.
6. Л. М. Качанов. Основы теории пластичности. М., «Наука», 1969.
7. В. А. Сухих, Ю. Б. Харитон. В сб. «Вопросы теории взрывчатых веществ». Вып. I. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
8. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 125, 570.
9. Б. Г. Абрамович. Термоиндикаторы и их применение. М., «Энергия», 1972.
10. А. П. Амосов, Ж. А. Зиненко. Докл. АН СССР, 1973, 209, 6.
11. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, В. И. Долгов. В сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972.
12. А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, В. С. Козлов. ФГВ, 1972, 8, 3.
13. S. N. Heavens and G. E. Field. Proc. Roy. Soc., 1974, A338, 77—93.

УДК 620.178.7

#### ОТКОЛ В КВАЗИАКУСТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

А. Г. Иванов

(Москва)

Экспериментально установлено, что прочность материала на динамический отрыв — откол есть функция временных характеристик нагружения: времени растяжения образца, скоростей нагружения или деформации.

Рядом авторов независимо были предприняты поиски эмпирических зависимостей, описывающих это явление. Но такое направление работы представляется малоперспективным. В работе [1] из рассмотрения уравнения движения трещин при нагружении материала импульсным давлением в форме полочки получен критерий откола, близкий к некоторым эмпирическим критериям и существенно отличный от кинетического уравнения С. Н. Журкова. Попытка описать явление откола уравнением С. Н. Журкова [2], предпринятая в работах [3, 4], не увенчалась успехом.

Почему же кинетическая теория временной прочности, столь блестяще подтвержденная экспериментом в интервале воздействия нагрузок от  $10^{-3}$  до  $10^7$  с, оказывается непригодной для интервалов времени  $10^{-7}$ — $10^{-6}$  с? Ответ следует искать в изменении режима нагружения. Так, при  $t=10^{-3}$  с длина нагружающего импульса  $l_0=ct \sim 5 \cdot 10^2$  см,