УДК 531.663

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ И ИНИЦИИРОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ УДАРОМ

А. В. Дубовик

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва

На основе общих представлений о механической деформации и разрушении тонкого слоя вязкопластического взрывчатого материала при ударе и возникающего в результате этого диссипативного и химического тепловыделения качественно рассмотрен вопрос о наличии двух критических состояний взрывчатого материала, связанных с разупрочнением слоя и возбуждением взрыва. Выполнены оценки критических условий разрушения и параметров инициирования взрывчатого материала — энергии удара и создаваемого им давления в веществе. Полученные результаты использованы для объяснения экспериментальных данных о зависимости параметров инициирования от толщины слоя взрывчатого материала, которые представляют практический интерес для анализа результатов испытаний взрывчатых систем на чувствительность к механическим воздействиям.

КРИТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТОГО МАТЕРИАЛА

Напомним, что в наиболее простой постановке лабораторный эксперимент по определению чувствительности взрывчатого материала (ВМ) к удару проводится так. Слой вещества с начальной толщиной $h_0 \ll D$ (D — диаметр ударника) помещается между плоскопараллельными торцами ударника и наковальни, которые вместе с падающим грузом и основанием копра образуют систему нагружения (СН), характеризуемую механической жесткостью k. Скорость удара $v = \sqrt{2gH}$, где g — ускорение силы тяжести, H — высота сбрасывания груза массой M. Среднее по площади ударника давление «холостого» опыта (слой ВМ отсутствует) изменяется по квазистатическому закону

$$p(t) = p_\text{x} \sin(\pi t/t_\text{x}), \tag{1}$$

где $p_\text{x} = (v/S)\sqrt{Mk}$ — максимальное давление, $t_\text{x} = \pi\sqrt{M/k}$ — время удара, $S = \pi D^2/4$ — площадь ударника. До момента $t_\text{x}/2$ энергия удара запасается в СН (давление возрастает), а затем она почти полностью расходуется на отскок груза от наковальни (давление падает до нуля).

Наличие между соударяющимися поверхностями тонкого слоя вязкого или пластичного материала нарушает закон (1):

1) время удара увеличивается, а максимальное давление уменьшается ($p_\text{max} < p_\text{x}$); при этом время снижения давления, связанное с полной разгрузкой СН, остается прежним — $t_\text{x}/2$;

2) на стадии роста давления монотонная зависимость $p(t)$ с уменьшением значения h_0 постепенно уступает место немонотонной: давление, достигнув предельного для данной толщины слоя значения p_0, быстро падает, свидетельствуя о разрушении слоя ВМ и разгрузке СН. Разгрузка протекает при сравнительно большой энергии груза, продолжающего оказывать сжимающее воздействие на слой ВМ. При достаточно малом значении h_0 давление разрушения p_0 превышает p_max. В пределе (при $h_0 \to 0$) $p_0 \to p_\text{x}$, максимум давления p_max исчезает, однако при этом слой ВМ перестает разрушаться и закон изменения $p(t)$ вновь подчиняется (1).

В [1] установлено, что время разрушения слоя (динамической разгрузки СН) t_p уменьшается с ростом энергии (скорости) удара и значений реологических характеристик ВМ. В типичных условиях лабораторных экспериментов на копре значение t_p вязкопластичных материалов непрерывно растет от 10 до 100 мкс при увеличении толщины слоя. Твердые кристаллические взрывчатые вещества (ВВ) разрушаются за время ≈ 10 мкс. Причем сравнительно толстые образцы ВВ могут претерпевать более одного акта разрушения, так что на осциллограммах записи давления удара образуется несколько возрастающих по величине пиков p_0.

Естественно связать динамический спад

давления нагрузки с потерей несущей способности слоя вследствие его скоростного деформирования и (или) диссипативного разогрева ВМ. Роль этих механизмов в разупрочнении материалов с разной реологией представляется неодинаковой. Действительно, пусть механическое поведение ВМ при ударе описывается моделью жесткопластического тела. Запишем связь между средним давлением $\Pi = p/\tau_0$ и деформацией слоя $x = h_0/h$ [2]:

$$\Pi(x) = \Gamma s x, \qquad \Pi(1) = \Gamma. \tag{2}$$

Здесь $\Gamma = D/3h_0$ — параметр, характеризующий геометрию слоя, $s = \tau/\tau_0$ — безразмерная прочность ВМ на сдвиг, τ — текущее значение сдвигового напряжения в слое ВМ, τ_0 — начальная прочность слоя ВМ. При $s = 1$ давление линейно зависит от x и деформация слоя протекает устойчиво.

Вследствие механического разогрева или скоростного деформирования материала значение s уменьшается и несмотря на возрастание x скорость роста $\Pi(x)$ может снизиться до нуля, а на зависимости $\Pi(x)$ образуется максимум Π_0 при $x = x_{cr}$. Запишем условие потери устойчивости деформации слоя ВМ

$$\frac{d\Pi}{dx} = \Gamma\Big(x\frac{ds}{dx} + s\Big) = \Pi\Big(\frac{d\ln s}{dx} + \frac{1}{x}\Big) \leqslant 0 \tag{3}$$

и найдем критические условия для указанных режимов разупрочнения.

1. Скорость-деформационное разупрочнение. Пусть зависимость прочности от скорости деформации материала имеет вид $s = Ay^j$, где $y = dx/dt > 0$; A, j — константы. Подстановка s в (3) дает

$$j\,\frac{d\ln y}{dx} + \frac{1}{x} \leqslant 0. \tag{4}$$

Интегрируя (4) при условии $y(1) = 1$, получим

$$y \leqslant 1/x^{1/j}. \tag{5}$$

Полагая $x\big|_{t=0} = 1$, из (5) находим, что скоростное разупрочнение наступает для всех

$$t \geqslant t_{cr} = j(x_{cr}^{(j+1)/j} - 1)/(j+1). \tag{6}$$

При малой деформации $x_{cr} = 1 + \varepsilon$ ($\varepsilon \ll 1$) получаем критическое время удара $t_{cr} \approx \varepsilon$, и если $\varepsilon = 0{,}1$, то $t_{cr} = 0{,}1$. Принимая характерное время нагружения слоя равным $t_{н} = h/v = 10^2$ мкс, находим, что размерное время $t_{cr} = 0{,}1 t_{н} = 10$ мкс. Отсюда следует, что скоростное разупрочнение в пределе по времени может иметь место при разрушении твердых ВМ ударом.

2. Тепловое разупрочнение. Пусть зависимость прочности материала от температуры имеет вид $s = (1 - U/U_m)^r$, где $U = \rho c_p(T - T_0)/\tau_0$, $U_m = U$ при $T = T_m$; r — константа; T_m — температура плавления ВМ, ρ — плотность, c_p — удельная теплоемкость. Условие разупрочнения (3) записывается так:

$$r\,\frac{d\ln(1 - U/U_m)}{dx} + \frac{1}{x} \leqslant 0$$

или

$$U \geqslant U_{cr} = U_m(1 - (r\Gamma x_{cr}/U_m)^{1/(1-r)}). \tag{7}$$

Для $r = 0{,}3$, $\Gamma = 10$, $x_{cr} = 1$, $U_m = 10$ находим $U_{cr} = 0{,}8U_m$. При $x_{cr} > 1$ слой разупрочняется при температуре, меньшей $0{,}8U_m$. Таким образом, любая малая деформация слоя в адиабатических условиях нагружения протекает неустойчиво и заканчивается его разрушением.

Итак, оба рассмотренных механизма разупрочнения равносильно объясняют происхождение спадов давления при нагружении слоя ВМ ударом. Эффективность каждого из них определяется конкретными условиями эксперимента. В рассматриваемой задаче, однако, важно то обстоятельство, что энергия удара, освобождающаяся при разгрузке СН, расходуется не только на разбрасывание части слоя за пределы ударника, но и на диссипативный нагрев оставшегося ВМ. Если результирующее повышение температуры оказывается достаточно большим, то под ударником начинается химическая реакция терморaспада ВМ, которая может закончиться воспламенением и взрывом. Причем для твердых ВВ время взрыва $t_{в}$ обычно совпадает с временем разрушения слоя $t_{р}$, тогда как взрывы вязкотекучих ВМ могут происходить и в период последующего роста давления (или даже его завершающего спада в течение $t_{х}/2$, если энергия груза невелика).

Для последующего анализа механизма возбуждения взрыва отметим два результата.

1. До спада давления и сразу после его завершения закон роста давления $p(t)$ близок к (1). Это означает, что в эти периоды времени удара энергия груза запасается в СН и практически не расходуется на движение и разогрев ВМ. Поэтому до спада давления толщина слоя $h \approx h_0$. Она заметно уменьшается (до величины h_1) только во время спада давления. Последующий рост давления протекает при почти постоянной толщине h_1 (завершение спада давления фактически определяется возрастанием механической жесткости слоя

до величины $K = E_{\text{в}}S/h_1$, где $E_{\text{в}}$ — эффективный модуль упругости ВМ, которая становится соизмеримой с величиной k). Заметим, что во время разрушения слоя скорость центра масс СН изменяется незначительно.

2. Из-за быстрого уменьшения толщины слоя скорость диссипативного тепловыделения $dq/dt = pS|dh/dt|$ максимальна в период спада давления, который в этой связи наиболее благоприятен для инициирования ВМ. Именно поэтому взрывы происходят только во время спада давления или сразу после его завершения. Причем и в последнем случае решающее значение для инициирования ВМ имеет тепловыделение на стадии разрушения слоя. Естественно, сюда не включается инициирование вязкотекучих ВМ во время монотонного роста давления до величины p_m, которое имеет место при ударе по толстослойным зарядам и не связано с динамической разгрузкой СН. Заметим также, что взрывы твердых ВВ при повторном спаде давления следует рассматривать, как происходящие при новой начальной толщине h_1.

Поскольку запас энергии в СН перед разрушением слоя является основным источником инициирования ВМ, значение p_0 в начале спада давления, определяющее плотность запасенной энергии, можно рассматривать в качестве удобной количественной характеристики следующего за разрушением процесса возбуждения взрыва. Наибольший интерес представляет значение p_0, полученное в предельных условиях инициирования, т. е. при минимальной энергии падающего груза, так как именно в этом случае ее можно считать критическим параметром процесса или показателем чувствительности ВМ к удару.

Расчет критических параметров инициирования ВМ начнем с записи соотношения между средним давлением p и толщиной слоя h, приняв для общности неньютоновскую модель механического поведения ВМ при ударе [3]:

$$p = \tau a^{-(2n+1)}, \quad a = h/D, \quad a \ll 1, \tag{8}$$

где $\tau = (1 + 1/2n)^n m\gamma^n/(n+3)$ — напряжение сдвига в среде с консистенцией (вязкостью) m и индексом течения n, $\gamma = w/D$ — скорость сдвига, w — скорость перемещения контактной поверхности ударника. При $n = 1$ величина $\tau = 3\mu w/8D$ равна сопротивлению сдвига в слое нормально-вязкой жидкости (μ — вязкость); при $n = 0$ $\tau = \tau_0/3$ и формула (8) переходит в (2). Зависимость $p(a)$ называется «кривой прочности» слоя ВМ. Для жесткопластической среды величина τ_0 связана с прочностью на сжатие σ_0 соотношением Мизеса: $\tau_0 = \sigma_0/\sqrt{3}$ [2].

При известном давлении запас энергии в СН составляет

$$W = p^2S^2/2k. \tag{9}$$

Считая, что при разрушении слоя доля bW ($0 < b \leqslant 1$) энергии СН затрачивается на нагревание ВМ, получим его температуру:

$$T = T_0 + bW/\rho c_p Sh. \tag{10}$$

Период индукции теплового взрыва при температуре T записывается так:

$$t_r = (c_p RT^2/QZE)\exp(E/RT). \tag{11}$$

Время разрушения слоя $t_{\text{р}}$ определяется отношением

$$t_{\text{р}} = h/w. \tag{12}$$

Здесь $w = p/\rho c_0$, $c_0 = (kL/\rho_0 S)^{1/2}$ — скорость распространения упругих волн в СН; L, ρ_0 — характерные длина СН и плотность материала ее конструкции.

Введем показатель (критерий) инициирования взрыва

$$F = t_{\text{р}}/t_r. \tag{13}$$

Если $F \geqslant 1$ (время реакции меньше времени разрушения слоя), то условия инициирования благоприятны для протекания теплового взрыва. При $F < 1$ взрывная реакция отсутствует. Подставляя (8)–(12) в (13), после несложных преобразований аррениусовской экспоненты вблизи температуры T_0 и с учетом малого влияния температуры в предэкспоненте (11) на величину t_r получим «вероятностную» кривую инициирования:

$$F(a) = Aa^{2(n+1)}\exp(Ba^{-(4n+3)}), \tag{14}$$

$$A = (D\rho c_0 QZE/c_p RT_0^2\tau)\exp(-E/RT_0),$$

$$B = \pi bE\tau^2 D/8\rho c_p RT_0^2 k.$$

Для типичных условий испытаний ВМ на чувствительность к удару ($k = 0{,}3$ ГН/м, $c_0 = 3$ км/с, $D = 1$ см) и следующих характеристик ВМ: для тэна $\rho c_p = 2$ МДж/(м$^3\cdot$К), $Q = 5{,}7$ МДж/кг, $E = 0{,}16$ МДж/моль, $Z = 10^{15{,}6}$ с$^{-1}$, $\sigma = 60$ МПа, $n = 0$ — получаем $A = 8{,}0\cdot 10^{-13}$ и $B = 5{,}5\cdot 10^{-4}$, так что $A \ll B$ (принято $b = 1/3$).

График функции $F(a)$ имеет вертикальную асимптоту $a = 0$, глубокий минимум $F_{\min} \approx AB^{2(n+1)/(4n+3)}$ в точке $a_{\min} \approx$

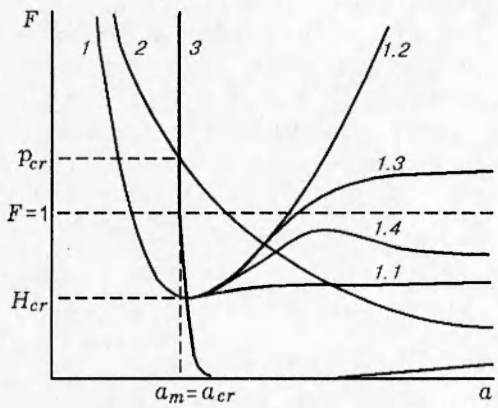

Рис. 1. Схематический вид зависимостей $H_{\rm mm}$ (*1, 1.1–1.4*), p (*2*), F (*3*) как функций параметра a: *1.1* — кривая $H_{\min}(a)$ при $z \to 0$, *1.2* — при $z \to 1$, *1.3, 1.4* — при $0{,}1 < z < 0{,}9$

$B^{1/(4n+3)}$ и пересекает ординату $F = 1$ в точках $a_m \approx (B/\ln A^{-1})^{1/(4n+3)}$ и $a_M \approx A^{-1/2(n+1)} \gg 1$. Точка a_M нас не интересует. Вблизи точки a_m значения F резко (как $a^{-2/(n+1)}\exp(Ba^{-(4n+3)})$) увеличиваются от $F_{\min} \approx 0$ до 1 и более, четко разделяя область определения F на области взрывов при $a < a_m$ и отказов при $a > a_m$.

На рис. 1 зависимость $F(a)$ представлена кривой *3*. Там же приведена прочностная кривая *2*, построенная в соответствии с (8): $p/\tau = a^{-(2n+1)}$. Из-за быстрого («аррениусовского») изменения величины F вблизи a_m абсцисса пересечения кривых *2* и *3* практически совпадает с a_m. Поэтому на кривой $p(a)$ при $a < a_m$ все разрушения должны заканчиваться взрывами, при $a > a_m$ — отказами (взрывы не исключены при повторных разрушениях слоя). Толщина слоя $a = a_m$ принимается равной критической a_{cr}. Соответствующее давление на прочностной кривой $p(a)$ называется критическим давлением инициирования взрыва ударом (p_{cr}). Этот параметр широко используется в качестве критерия чувствительности твердых ВВ к удару и определяется экспериментально (на копре) по методу критических напряжений [4].

Численное решение трансцендентного уравнения

$$F(a_{cr}) = 1 \tag{15}$$

дает для тэна значение $a_{cr} = 0{,}025$, по которому определяем критические параметры инициирования: $h_{cr} = Da_{cr} = 0{,}25$ мм и $p_{cr} = \tau/3a_{cr} = 0{,}46$ ГПа. Расчет по приближенной формуле $a_{cr} = (B/\ln A^{-1})^{1/3}$ дал значение 0,027, близкое к полученному по уравнению (15).

Отметим хорошее совпадение расчета критических параметров инициирования тэна с экспериментом [4]: $h_{cr} = 0{,}27$ мм, $p_{cr} = 0{,}48$ ГПа. Это позволяет рассматривать вышеприведенный анализ как теоретическое обоснование экспериментального метода критических напряжений и предложить простую формулу для оценки значений p_{cr} твердых ВВ:

$$p_{cr} = (\tau/3)(B^{-1}\ln A^{-1})^{1/3} = (\tau/3)(\Phi(1-X))^{1/3}, \tag{16}$$

$$\Phi = 8\rho c_p T_0 k/\pi b D\tau^2,$$

$$X = (RT_0/E)\ln(D\rho c_0 QZE/c_p RT_0^2\tau).$$

Из структуры (16) видно, что под радикалом она содержит два множителя, отражающих влияние соответственно физико-механических характеристик ВМ и СН (множитель Φ) и физико-химических свойств ВМ (множитель $1 - X$) на критическое давление инициирования взрыва. Для рассмотренного выше расчета $\Phi = 3{,}9 \cdot 10^4$ $X = 0{,}57$. Влияние указанных параметров на инициирование тэна приблизительно одинаковое. Однако при $X \to 1$ влияние физико-химических свойств ВВ становится определяющим, значение p_{cr} стремится к нулю и ВВ характеризуется исключительно высокой опасностью в обращении. Если $X \to 0$, то чувствительность ВМ определяется главным образом его физико-механическими свойствами и характеристиками СН, величина p_{cr} стремится к максимальному значению $\tau\Phi^{1/3}/3$. В этом случае уровень чувствительности в общем невелик и существенно зависит от условий удара.

Принятое в расчетах значение $b = 1/3$, при котором наблюдается наилучшее совпадение теоретических и экспериментальных данных по чувствительности ВВ, позволяет предположить, что на инициирование взрыва расходуется не более половины энергии, запасенной в СН при ударе. В целом следует отметить сравнительно слабую (как степень 1/3) зависимость p_{cr} от свойств ВВ и СН. Этим обстоятельством, по-видимому, можно объяснить тот известный факт, что для большинства твердых ВВ, от высокочувствительных инициирующих до малочувствительных бризантных составов, значения p_{cr} заключены в сравнительно узком интервале — $0{,}2 \div 1{,}2$ ГПа.

КРИТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ УДАРА

Рассмотрим закономерности возбуждения взрыва вне критической толщины слоя, т. е. при $a > a_{cr}$ и $a < a_{cr}$. Прежде всего, отметим, что давление вдоль прочностной кривой (8) должно быть меньше давления холостого удара, и поэтому $p_{cr} \leqslant p_x = (2gHMk)^{1/2}/S$. Отсюда следует, что минимальная высота сбрасывания груза, при которой могут возникать взрывы, составляет

$$H_{\min} \geqslant H_{cr} = \pi^2 p_{cr}^2 D^4/32Mgk. \quad (17)$$

Критическая высота H_{cr} — наименьшая из всех высот сбрасывания груза, при которой имеет место инициирование слоя любой толщины [1]. Для тэна с $p_{cr} = 0{,}46$ ГПа в соответствии с (17) $H_{cr} = 2{,}2$ см при $M = 10$ кг. В случае $a < a_{cr}$ условие взрыва $F > 1$ выполняется тем лучше, чем меньше a, но так как согласно (8) при этом увеличивается давление разрушения слоя, то с уменьшением значения a минимальная высота возрастает по закону

$$H_{\min} = \pi^2 \tau^2 D^4/32Mgka^{2(2n+1)}. \quad (18)$$

Отметим сильный ход зависимости $H_{\min}(a)$ при $a < a_{cr}$. Для твердых ВВ с $n = 0$ $H_{\min} \sim a^{-2}$, для нормально-вязких жидких ВМ с $n = 1$ $H_{\min} \sim a^{-5}$. Гипербола $H_{\min}(a)$, проходящая через точку (a_{cr}, H_{cr}), представлена кривой *1* на рис. 1.

При $a > a_{cr}$ затраты энергии на разрушение слоя уменьшаются, но здесь $F < 1$ и взрывы должны отсутствовать. Однако, как сказано выше, они имеют место, но их происхождение для ВМ с различной реологией и чувствительностью к удару различное. В случае твердых ВВ взрывы возможны при повторном разрушении слоя. Для анализа этой возможности предположим, что первое разрушение и уменьшение толщины слоя от h_0 до h_1 происходит мгновенно в момент времени t_0. До начала этого разрушения $p_0 = p_x \sin(\pi t_0/t_x)$, скорость центра масс СН — $v_1 = v_0 \cos(\pi t_0/t_x) = v_0(1 - (p_0/p_x)^2)^{1/2}$.

После отказа взрыва и выброса части вещества за пределы ударника остаточный слой толщиной h_1 вновь подвергается сжатию со скоростью v_1, которой соответствует давление холостого удара $p_{x,1} = (v_1/S)(Mk)^{1/2}$. Повторное разрушение слоя происходит в момент времени t_1 при

$$p_1 = \tau/a_1 \leqslant p_{x,1} = p_x(1 - (p_0/p_x)^2)^{1/2}. \quad (19)$$

Преобразуем (19), введя следующие обозначения: $a_x = \tau/p_x$ — наибольшая толщина слоя, не разрушающегося при ударе с заданной силой, $a_{x,1} = \tau/p_{x,1} = \gamma a_1$ $(\gamma \approx 1)$, $z = a_x/a_{cr} < 1$. Предположив, что при $a_0 = a_{cr}$ толщина остаточного слоя $a_1 = a_x$, определим неизвестный параметр γ. В результате получим оценку

$$a_1 = a_0((1 - z^2)/((a_0/a_x)^2 - 1))^{1/2}. \quad (20)$$

Исследуем зависимость $a_1(a_0)$ вблизи a_{cr}. Полагая $a_0/a_{cr} = 1 + \varepsilon$ $(\varepsilon \ll 1)$, найдем

$$a_1 \approx a_x(1 - \varepsilon z^2/(1 - z^2)). \quad (21)$$

Из (21) следует, что значение a_1 уменьшается с увеличением ε. Следовательно, при $a > a_{cr}$ возрастает давление повторного разрушения слоя p_1 минимальная высота сбрасывания груза $H_{\min}$ также возрастает согласно (17). Однако коэффициент пропорциональности в этой зависимости, определяющий темп роста $H_{\min}$, для ВВ с различной чувствительностью к удару неодинаков.

Для чувствительных ВВ, характеризуемых высокими значениями $a_{cr} \gg a_x$, $z \to 0$ и $a_1 = a_x(1 - \varepsilon z^2) \approx a_x$. Этот результат означает, что повторное разрушение слоя толщиной $a > a_{cr}$ при высоте сбрасывания груза H_{cr} невозможно, и для возобновления взрывов необходимо хотя бы незначительно увеличить высоту $H_{\min}$. Причем новая высота $H_{\min}$ будет практически постоянной для всех $a > a_{cr}$. Малочувствительные ВВ характеризуются малыми значениями $a_{cr} \to a_x$, параметр z стремится к единице и величина a_1 быстро уменьшается до нуля. Поэтому для получения взрывов при $a > a_{cr}$ необходимо последовательно и значительно увеличивать высоту сбрасывания груза, так что $H_{\min}$ будет быстро возрастающей функцией a.

Рассмотренные случаи зависимостей $H_{\min}(a)$ приведены на рис. 1 в виде кривых *1.1* $(z \to 0)$ и *1.2* $(z \to 1)$. На практике, однако, предельные случаи встречаются редко и кривые $H_{\min}(a)$ занимают промежуточные положения, в том числе и те, которые показаны на рис. 1 в виде кривых *1.3* и *1.4* (см. экспериментальные данные [5]).

Как отмечалось ранее, взрывы вязкотекучих ВМ при $a > a_{cr}$ возникают из-за продолжительного диссипативного разогрева в течение всего времени деформации слоя. При этом слой перестает сжиматься, когда его жесткость $(S/D)|dp/da|_{a=a_*}$ становится равной жесткости СН. Используя (8), найдем предельную толщину сжатого слоя $a_* = ((2n+1)\pi D\tau/4k)^{1/2(n+1)}$.

Номер п/п	ВМ	Состав	p_{cr}, ГПа	h_{cr}, мм	E_{cr}, Дж/см^2
1	Октоген/вода	80/20	(1,2)	0,09	55
2	ТНТ	—	1,1	0,08	—
3	Аммиачная селитра/ТНТ	80/20	0,9	0,20	30
4	ПХА	—	0,85	0,53	—
5	Тетрил	—	0,84	0,12	—
6	Октоген/алюминий/ каучук	50/30/20	(0,73)	0,27	20
7	Гексоген	—	0,70	0,25	18
8	Октоген	—	0,64	0,45	15
9	Октоген/каучук	80/20	(0,57)	0,35	13
10	ПХА/ТНТ	80/20	0,52	0,20	—
11	ПХА/каучук	80/20	0,52	0,15	10
12	Тэн	—	0,49	0,27	—
13	Октоген/нитрат гидразина	70/30	0,47	0,30	9,4
14	ПХА/нитроглицерин	95/5	0,40	0,40	7,5
15	Перхлорат метиламина	—	0,35	0,56	—
16	Азид свинца	—	0,26	(2,8)	—
17	Полиглицидилнитрат	—	(0,25)	0,30	3,5
18	Жидкий порох	—	(0,14)	0,20	1,7

Примечание. В скобках приведены экспериментальные оценки параметров инициирования ВМ (см. работы [4, 5, 7]).

Как и следовало ожидать, значение a_* не зависит от a_0 и весьма близко к a_x. Диссипативные потери при сжатии слоя до $a_* \ll a_0$ составляют $\sim p_* S h_*$. Приравнивая $p_* S h_*$ энергии груза MgH_*, найдем высоту сбрасывания груза, при которой энергия удара полностью расходуется на диссипативную работу:

$$H_* = \left[\frac{(\pi/4)^{n+1}(2\sqrt{2}/\pi n)^n m k^n D^{3+n}}{M^{n+1}(n+3)}\right]^{2/(n+1)} \Big/ g. \quad (22)$$

Если энергия груза MgH_* достаточна для инициирования ВМ, то при всех $a_0 \gg a_{cr}$ минимальная высота будет приблизительно постоянной и равной $H_* \geqslant H_{cr}$. Например, при $n = 1$, $\mu = 1$ Па · с, $D = 2$ см и $M = 5$ кг имеем $H_* = 19$ см. Получающиеся при этом зависимости $H_{\min}(a)$ схематически показаны на рис. 1 в виде кривых *1.1*, *1.3* и *1.4*, которые мы использовали ранее для анализа чувствительности твердых ВВ. Это представляется закономерным, так как формула (22) справедлива и для описания разрушения толстослойных образцов при $n = 0$. Так, для ВВ типа тэна с $\sigma = 60$ МПа при $D = 1$ см и $M = 10$ кг по формуле (22) находим $H_* = 9{,}2$ см, что больше полученного ранее значения $H_{cr} = 2{,}2$ см, и, следовательно, его кривая чувствительности будет вида *1.3*. Заметим, что кривая *1.2* также должна иметь горизонтальную асимптоту, расположенную вне рисунка.

В исследованиях на чувствительность ВМ к удару вместо минимальных высот сбрасывания груза $H_{\min}(a)$ удобнее определять высоты $H_{50}(a)$, при которых взрывы возникают с частостью* 50 % (а не 100 %, как при $H_{\min}$). На зависимости $H_{50}(a)$ минимум находится в точке a_{cr}. По нему расчитывают критическую энергию удара $A_{cr} = MgH_{50}(a_{cr})$, удельную энергию инициирования $E_{cr} = A_{cr}/S$ и критическое давление инициирования $p_{cr} = æ(2E_{cr}k/S)^{1/2}$. Здесь $æ < 1$ — коэффициент трансформации энергии груза в энергию СН

*Частость взрывов — отношение числа взрывов к общему числу ударов (умноженное на 100 %) в данной серии опытов.

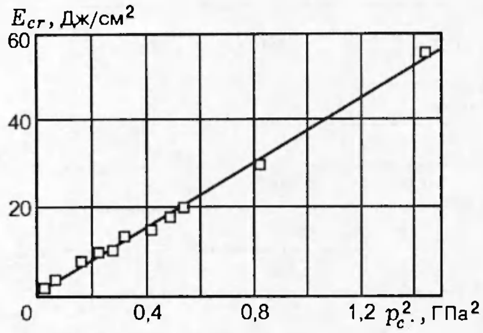

Рис. 2. Регрессионный анализ зависимости $E_{cr}(p_{cr}^2)$ по данным таблицы

при критических условиях инициирования ВМ, его можно определить так: из неравенства (19) при $a_0 = a_{cr}$ следует

$$\frac{\tau}{p_x}\left(1 - \left(\frac{p_{cr}}{p_x}\right)^2\right)^{-1/2} \leqslant a_1 < a_{cr} = \frac{\tau}{p_{cr}}, \qquad (23)$$

откуда $æ = p_{cr}/p_x \leqslant 1/\sqrt{2} = 0{,}707$. В экспериментах с ВМ установлено, что $æ = 0{,}7 \div 0{,}8$ [1, 5]. С учетом коэффициента $æ$ уточним формулу (17) для H_{cr}, введя в нее множитель 2, вследствие чего расчетное значение критической высоты инициирования для тэна составит 4,5 см, что близко к экспериментальному $H_{cr} = 5$ см [6]. В таблице приведены критические параметры инициирования ряда ВМ по данным работ [4, 5, 7], а на рис. 2 — зависимость между E_{cr} и p_{cr}. В соответствии с (17) имеет место линейная связь $E_{cr}(p_{cr}^2)$ с высоким коэффициентом корреляции 0,99. Из таблицы видно, что E_{cr} имеет характер универсального показателя чувствительности, одинаково пригодного для характеристики ВМ с различной реологией — твердых, пластичных, пасто- и гелеобразных и прочих взрывчатых систем, за исключением маловязких жидких ВВ. Для определения значений E_{cr} не требуется сложной электронной аппаратуры и чувствительных датчиков давления.

Кратко проанализируем возможность связи между критическим давлением инициирования взрыва ударом и показателями чувствительности ВМ по стандартным методам испытаний. Последними согласно ГОСТ 4545-85 являются максимальная высота сбрасывания груза H_0, при которой имеет место не более одного взрыва 25 образцов массой $m_0 = 100$ мг в приборе со свободным истечением вещества (№ 2 по Н. А. Холево), и частость взрывов при $H = 25$ см и $m_0 = 50$ мг в приборе с затрудненным истечением вещества (№ 1). Согласно (17) должна существовать хорошая корреляция между величинами p_{cr} и H_0, если бы последняя определялась при $m_0 = m_{cr}$. Однако для всех ВМ $m_0 = (1 \div 5)m_{cr}$, поэтому взрывы в основном возникают при повторных разрушениях образцов. Для ВМ, взрывающихся при высотах, близких к H_{cr} в широком диапазоне толщин $a > a_{cr}$ (см. кривую *1.1* на рис. 1 для высокочувствительных ВМ), значение H_0 фиксируется достаточно уверенно. В противном случае разброс значений H_0 получается весьма значительным. В результате линейная связь $H_0(p_{cr}^2)$, построенная по данным [4–7], характеризуется невысоким коэффициентом корреляции 0,89 (см. также [8, 9]).

Зависимость между p_{cr} и частостью взрывов установить не удается по ряду причин. Одна из них — значительное отличие механизмов инициирования взрыва в приборах со свободным и затрудненным истечением вещества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 97-03-32448).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дубовик А. В., Лисанов М. В.** Тепловая неустойчивость деформации и воспламенение зарядов реакционноспособных веществ при ударе // Детонация и ударные волны: Материалы 8-го Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка: ИХФ АН СССР в Черноголовке, 1986. С. 6–9.
2. **Качанов Л. М.** Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
3. **Дубовик А. В., Боболев В. К.** Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1972.
4. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
5. **Dubovik A. V., Denisaev A. A.** Analogy between a solid and visco-flowing explosives initiation by impact // 21th Intern. Pyrotechn. Seminar. Moscow, 1995. P. 182–186.
6. **Маурина Н. Д., Федосова Н. А., Рязанская В. С.** Методы и результаты изучения чувствительности промышленных ВВ к механическим воздействиям // Взрывное дело: № 68/25. М.: Недра, 1979. С. 158–168.
7. **Карпухин И. А., Боболев В. К. и др.** О некоторых особенностях возбуждения взрыва ударом и детонационной способности смесей окисли-

тель — горючее // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 2. С. 140–146.
8. **Дубовик А. В.** Методология исследований чувствительности ВВ к механическим воздействиям // Взрывчатые материалы и пиротехника: № 7–8. М.: ЦНИИНТИ КПК, 1994. С. 3–12.
9. **Кондриков Б. Н.** Сравнительный анализ методов определения чувствительности ВВ к механическим воздействиям // Там же. С. 12–25.

Поступила в редакцию 2/XII 1997 г.