

становится меньше единицы, т. е. определяющее влияние на эффект расслоения начинает оказывать волна разрежения, отраженная от свободной поверхности Al.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарг Дж. С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов.— М.: Мир, 1966.
2. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом.— Новосибирск: Наука, 1980.
3. Голубев В. К., Новиков С. А., Синицына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ // ПМТФ.— 1981.— № 2.— С. 112.
4. Erktan J. O. // The Phys. Fluids.— 1958.— 1, N 6.— P. 535.
5. Привалов Ю. М., Солоненко В. Р., Тарасов Б. А. Воздействие скользящей детонации на сжимаемую стенку // ФГВ.— 1976.— 12, № 3.— С. 444.
6. Погорелов А. П., Глушак Б. Л., Новиков С. А. и др. О зависимости импульса отдачи от жесткости преграды в режиме скользящей детонации слоя ВВ // Там же.— 1977.— 13, № 5.— С. 771.
7. Мизес Р. Математическая теория течений сжимаемой жидкости.— М.: ИЛ, 1961.
8. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
9. Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. // Высокоскоростные ударные явления/ Под ред. Р. Кислоу.— М.: Мир, 1973.
10. Дудолов И. П., Ракигин В. И., Сутулов Ю. Н. и др. Ударная сжимаемость полистирола с различной начальной плотностью // ПМТФ.— 1969.— № 4.— С. 148.

г. Москва

Поступила в редакцию 3/VII 1990

УДК 531.663

М. В. Лисанов, А. В. Дубовик

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗАРЯДА НА ПАРАМЕТРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ УДАРЕ

На основе модели термопластического разрушения и воспламенения тонкого слоя вязкопластического материала при ударе и использовании нормального закона распределения прочности зарядов ВВ выполнены численные расчеты параметров инициирования и кривых частостей взрывов в зависимости от размеров заряда и энергии удара.

В настоящее время чувствительность твердых взрывчатых веществ (ВВ) к механическим воздействиям оценивается методом критических напряжений [1] и комплексом стандартных методик, основанных на определении частости (вероятности) взрывов (ГОСТ 4545-80). При испытаниях на чувствительность к удару образец спрессованного ВВ толщиной h_0 помещается между торцами двух цилиндрических металлических роликов радиусом R , по которым наносится осевой удар падающим грузом массой M со скоростью v_0 . Взрыв происходит в процессе деформации заряда, если давление прочностного разрушения P_1 превышает критическую величину $P_{кр}$. По методу критических напряжений значение $P_{кр}$ определяется варьированием толщины образцов и является одной из основных характеристик механической чувствительности ВВ. В стандартных методах испытаний масса заряда (навески) постоянна, и чувствительность ВВ характеризуется величиной частости взрывов F или энергией падающего груза, соответствующей частости F_0 , равной 0, 50 или 100 %.

Не обсуждая здесь достоинства и недостатки, присущие указанным методам испытаний, зададимся целью выяснить причины, влияющие на точность определения показателей чувствительности ВВ, вследствие которых данные о степени опасности ВВ, полученные разными группами исследователей, не всегда согласуются между собой. Один из основных факторов, влияющих на вероятность возникновения взрыва и погрешность определения $P_{кр}$, — разброс значений прочности заряда вблизи средней

величины σ_0 , достигающий в зависимости от условий изготовления образцов ВВ 10—25 % [1].

В данной работе выполнен теоретический анализ влияния прочности заряда на параметры воспламенения твердых ВВ ($\dot{P}_{кр}$, F) в условиях копровых испытаний на чувствительность к механическим воздействиям. Основу для проведения расчетов составляет математическая модель явления термопластического разупрочнения и воспламенения тонкого слоя вязкопластического твердого вещества при низкоскоростном ударе, разработанная в [2, 3].

В расчетах параметров инициирования использованы следующие основные предположения: 1) сжатие слоя ВВ одноосно и осесимметрично; 2) температура плавления вещества $T_{пл}$, линейно зависящая от p , является границей механического разогрева ВВ; 3) время разрушения заряда меньше времени пробега звуковых волн по системе нагружения копра; 4) максимальный разогрев T локализован в плоскости сдвига вблизи контактной границы заряда с ударником, и закон изменения $T(t)$ определяется по формуле тепловой динамики трения двух полупространств [2, 4]:

$$T = T_0 + \frac{1}{2\sqrt{\pi\lambda\rho c}} \int_0^t \frac{u(\xi)\tau(\xi)}{\sqrt{t-\xi}} d\xi,$$

$$\tau = \tau_s + \mu w/2h, \quad \tau_s = \tau_s^0 \left(\frac{T_{пл} - T}{T_{пл} - T_0} \right)^\nu, \quad (1)$$

$$\tau_s^0 = \sigma_s^0 / \sqrt{3}, \quad T_{пл} = T_{пл}^0 + \beta p, \quad P = \frac{2}{R^2} \int_0^R p r dr,$$

где T_0 — начальная температура; t — время; λ , ρ , c — теплопроводность, плотность, теплоемкость ВВ; $u \sim w/h$ — радиальная скорость течения вещества; h — толщина заряда; $w = |dh/dt|$ — скорость сжатия заряда, определяемая из соотношения волнового приближения [3, 5]; τ — сдвиговое напряжение, складывающееся из предела текучести на сдвиг τ_s и вязкой составляющей; μ — пластическая вязкость; r — радиальная координата; P — среднее давление в образце (давление удара); σ_s^0 , $T_{пл}^0$ — предел текучести ВВ на сжатие и температура плавления ВВ при нормальных условиях; β , ν — эмпирические коэффициенты.

Для определения времени воспламенения t_v , рассчитывалось значение функции $\psi(t) = \int_0^t \tau_{ад}^{-1} [T(t')] dt'$ ($\tau_{ад} = (cR^0 T^2 / QZE) \exp(E/R^0 T)$ — период индукции адиабатического теплового взрыва при температуре T ; E — энергия активации химической реакции термоспада ВВ; Q — теплота взрыва; Z — предэкспонент). Воспламенение возникает при условии $\psi(t_v) = 1$ [6].

Из результатов проведенных в [2] расчетов следует, что величина эффективного предела прочности ВВ, определяемая как $\sigma = P_1 / (1 + 2R/3\sqrt{3}h_0)$, слабо зависит от условий удара и не превышает величину σ_s^c более чем на 5—7 %. Поэтому под прочностью заряда σ в дальнейшем будем понимать предел текучести заряда ВВ на сжатие σ_s^0 .

Физическая причина разброса значений прочности зарядов объясняется неравномерностью распределения плотности вещества в объеме спрессованного образца, наличием полидисперсности частиц, влиянием структуры кристаллов и пр. Теоретический учет всех этих факторов, имеющих случайный характер, весьма сложен. Поэтому в качестве первого приближения примем, что в исходном состоянии каждый испытываемый на удар образец ВВ имеет прочность σ , равномерно распределенную по объему заряда. При этом сами значения σ всех зарядов ВВ

определяются законом нормального распределения случайных величин, характеристики которого будут параметрами рассматриваемой задачи.

Очевидно, что взрыв отсутствует, если прочность настолько высока, что заряд не разрушается, или, если величина σ , определяющая мощность трения на плоскости скольжения τu , и само давление P в образце при его разрушении малы для возникновения очагов воспламенения ВВ. Этими двумя обстоятельствами определяются соответственно верхняя σ_p и нижняя σ_b границы интервала значений прочности заряда, который разрушается со взрывом. Величины σ_p и σ_b и их связь с параметрами удара и частотой взрывов ВВ найдем следующим образом.

Значение σ_b , при котором образец с h_0 воспламеняется, и соответствующее давление разрушения $P_b \approx \sigma_b(1 + 2R/3\sqrt{3}h_0)$ определяются численным расчетом по указанным соотношениям и формулам (4) — (7) из [2].

Предельное значение, больше которого заряд при заданной толщине и энергии удара не разрушается, определяется по формуле для предельного состояния сжатого пластического слоя

$$\sigma_p = P_x / (1 + 2R/3\sqrt{3}h_0), \quad (2)$$

где $P_x = v_0 \sqrt{MK/\pi R^2}$ — максимально возможное давление удара при абсолютно упругой деформации заряда и системы нагружения (холостой удар); K — жесткость системы нагружения копра. При $\sigma > \sigma_p$ разрушения нет и $P_1 = P_x$.

Вероятность возбуждения взрыва вычислим с помощью интеграла ошибок:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta\sigma} \int_{\sigma_b}^{\sigma_p} \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\Delta\sigma} \right)^2 / 2 \right] d\sigma. \quad (3)$$

Здесь σ_0 — среднее значение прочности; $\Delta\sigma$ — среднеквадратичное отклонение от среднего значения. Иными словами, частота взрыва $F = 100f(\%)$ заряда с заданной толщиной h_0 определяется вероятностью его изготовления с величиной прочности $\sigma = \sigma_b \div \sigma_p$ при фиксированном значении $\Delta\sigma$.

Соотношения (1) — (3) совместно с уравнениями неизотермической деформации и воспламенения зарядов ВВ при ударе [2] составляют замкнутую систему уравнений для определения функции вероятности взрывов в зависимости от условий механического воздействия и характеристик заряда. Расчеты проведены для испытаний октогена на чувствительность к удару на копре, причем приняты следующие значения параметров удара и физико-химических характеристик ВВ: $Q = 5,52$ МДж/кг, $Z = 10^{16}$ 1/с, $E = 45$ ккал/моль [8], $\rho c = 2 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · К), $\lambda = 0,11$ Вт/(м · К), $\beta = 2,4 \cdot 10^{-7}$ К/Па, $\nu = 0,4$, $\mu_0 = 10$ Па · с, $K = 2,7 \cdot 10^8$ Н/м, $M = 10$ кг, $R = 5$ мм.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости давления удара P , максимального разогрева ΔT и параметра ψ от времени для двух образцов октогена с разными σ_s^0 , начинающих деформироваться при $P_0 = \sigma_s^0(1 + 2R/3\sqrt{3}h_0) \approx P_1$.

Видно, что максимум температуры толстого образца $\Delta T_{\max} = 480$ К достигается раньше по времени за счет более высоких значений сдвигового напряжения $\tau \sim \sigma_s^0$ и скорости сжатия слоя $w \sim P_0 - P(t)$. Однако резкое увеличение скорости спада давления $|dP/dt|$ уменьшает температуру плавления вещества $T_{пл} \sim \beta \nu$, являющуюся границей разогрева ВВ. Вследствие этого интенсивное разрушение тонкого образца, характеризующегося повышенными значениями скорости трения $u \sim w/h$, приводит к более высокому разогреву $\Delta T_{\max} = 515$ К и воспламенению заряда при $t_b = 8,6$ мкс. Толстый образец за время разрушения t_p не воспламеняется: $\psi(t_p) < 1$, $\psi(t_p) \approx 0$.

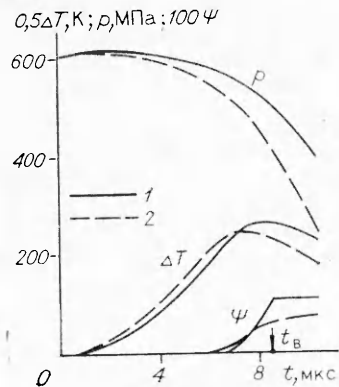


Рис. 1. Зависимости давления удара, максимального разогрева $T - T_0$, функции ψ от времени t при разрушении образцов ($\sigma_0 = 125$ (1) и 70 МПа (2), $h_0 = 0,50$ (1) и 0,25 мм (2)).

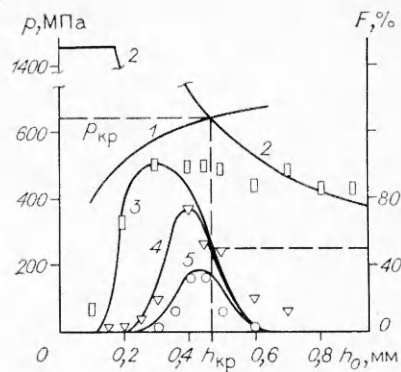


Рис. 2. Зависимости минимального давления воспламенения $P_{в}$ (1), среднего давления разрушения p_1 (2), частоты взрывов F (3, 4, 5) октогена от начальной толщины заряда h_0 .

На рис. 2 приведены результаты расчета давлений воспламенения $P_{в}$ (кривая 1), разрушения P_1 , соответствующего среднему значению прочности октогена $\sigma_0 = 125$ МПа (2) и частоты взрывов F (3-5) в зависимости от начальной толщины h_0 . Величина $P_{в}$ не зависит от энергии удара при $v_0 < 5$ м/с (2, 3 - расчет при $v_0 = 2,2$ м/с, 4, 5 - $v_0 = 1,4$ и 1,2 м/с).

Для определения величины σ_p по (2) использовались следующие экспериментальные значения максимального давления для копра К-44-2: 1) при $v_0 = 2,2$ м/с - $P_x = 1460$ МПа, 2) $v_0 = 1,4$ м/с - $P_x = 860$ МПа, 3) $v_0 = 1,2$ м/с - $P_x = 730$ МПа. Критическим условиям возбуждения взрыва октогена соответствует точка пересечения кривых 1 и 2 на рис. 2 с координатами $P_{кр} = 640$ МПа, $h_{кр} = 0,472$ мм, близким к экспериментальным значениям $P_{кр} = 640 \pm 30$ МПа, $h_{кр} = 0,43 \pm 0,04$ мм [1].

Точками на рис. 2 показаны экспериментальные данные [1] по определению частоты взрыва октогена в указанных выше условиях удара. Отметим хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений максимумов F_{max} зависимости $F(h_0, v_0)$. При снижении энергии удара F_{max} уменьшается, а его координата $h_{0max} \rightarrow h_{кр}$.

Обсудим причину расхождения теории и эксперимента для $v_0 = 2,2$ м/с при $h_0 > 0,5$ мм. Дело в том, что экспериментальные данные не позволяют отделить взрывы на первом спаде давления (первом разрушении) от взрывов на последующих спадах P . Расчеты выполнены для однократного разрушения образца. Рассмотрим условия для повторного разрушения. Очевидно, для разрушения остаточного слоя ВВ толщиной h_k необходимо, чтобы его несущая способность, определяемая величиной $P_k \approx \sigma_0(1 + 2R/3\sqrt{3}h_k)$, не превосходила максимального давления удара $P_{xк} = v_k\sqrt{MK}/\pi R^2$, которое создает в образце механическое воздействие с упругой энергией $W_k = Mv_k^2/2$, оставшейся в системе нагружения после первого разрушения. Считая, что за время первого разрушения энергия груза меняется мало, скорость центра тяжести системы нагружения $v_k = v_0\sqrt{1 - P_1^2/P_x^2}$. Подставляя указанные формулы в условие разрушения остаточного слоя ($P_k/P_{xк} < 1$), получим критерий повторного разрушения заряда ВВ:

$$\frac{3\sqrt{3MK}v_0h_0}{2\pi R^3\sigma_0\sqrt{1 + h_0^2/h_k^2}} > 1. \quad (4)$$

Из (4) следует, что возможность двукратного разрушения образца увеличивается при уменьшении σ_0 и R , повышении начальной скорости удара, жесткости системы нагружения K , h_0 и $h_{кр}/h_0$. Для типичных условий деформации ВВ $h_0 = (3 \div 5)h_{кр}$. Подставив в (4) $R = 0,5$ см, $M = 10$ кг, $K = 0,27$ МН/м, находим, что условие (4) для октогена выполняется для $v_0 = 2,2$ м/с при $h_0 > 0,5 \div 0,85$ мм, что близко к величине $h_0 \approx 0,4$ мм, при которой теоретическая кривая 3 на рис. 2 отклоняется от экспериментальных точек, характеризующих зависимость $F(h_0)$. При уменьшении энергии удара W_0 согласие расчета с экспериментом улучшается (см. рис. 2, 4, 5). Это подтверждается и расчетом по формуле (4), из которой следует, что повторное разрушение заряда для $v_0 = 1,4$ м/с должно происходить при $h_0 > 0,8 \div 1,3$ мм, для $v_0 = 1,2$ м/с — при $h_0 > 0,9 \div 1,6$ мм.

Рассмотрим зависимость параметров инициирования F , $P_{кр}$ от величины разброса прочности $\Delta\sigma$. Из свойств интеграла (3) следует, что при $\sigma_p > \sigma_0 + 2\Delta\sigma$ частота взрывов в критических условиях инициирования ($h_0 = h_{кр}$) $F_{кр} = F(\sigma_b = \sigma_0) \approx 50\%$ и не зависит от значения $\Delta\sigma$. В общем случае ($h_0 \neq h_{кр}$) зависимость $F(\Delta\sigma)$ не монотонна и зависит от h_0 . Так, расчет $F(h_0, \Delta\sigma)$ при $v_0 = 1,4$ м/с показывает, что увеличению параметра $\Delta\sigma/\sigma_0$ от 0,05 до 0,15 при $h_0 = 0,5$ мм повышает F от 14 до 35%, а при $h_0 = 0,4$ мм снижает от 100 до 84%. Эти результаты показывают, что использование частоты взрывов в качестве характеристики чувствительности ВВ создает значительные трудности при анализе результатов испытаний ВВ, поскольку частота взрывов зависит не только от свойств ВВ и условий удара, но и от качества изготовления образцов. Именно с этим обстоятельством связан большой разброс данных по чувствительности ВВ, полученных с помощью методов ГОСТа, и их плохая воспроизводимость.

Далее показано, что величина $P_{кр}$, полученная методом критических напряжений, наименее зависит от качества изготовления зарядов ВВ. Найдём связь погрешности определения $\Delta P_{кр}$, обусловленной зависимостью давления инициирования от прочности заряда $P_b(\sigma)$, с разбросом величины ΔP_1^0 в критических условиях. Пусть $\delta \sim \Delta\sigma$ — доверительный интервал прочности σ , а зависимость $P_b(\sigma)$ имеет вид

$$P_b = P_{кр}(\sigma/\sigma_0)^n, \quad (5)$$

n — константа. При $h_0 \ll R$ $\sigma \approx 3\sqrt{3}h_0P_b/2R$, поэтому в координатах $P - h_0$ (5) имеет вид $P_b = P_{кр}(h_0/h_{кр})^{n/(1-n)}$, а кривая $P_b(h_0)$ — граница раздела областей точек, соответствующих разрушению заряда со взрывом, от точек, соответствующих отказу. Общепринята оценка погрешности определения $P_{кр}$: $\Delta P_{кр} = (P_{макс}^- - P_{мин}^+)/2$, где $P_{макс}^- = P_b^-(\sigma_0 + \delta)$ — максимальное давление разрушения заряда без взрыва; $P_{мин}^+ = P_b^+(\sigma_0 - \delta)$ — минимальное давление разрушения со взрывом; $\Delta P_1^0 = \delta(1 + 2R/3\sqrt{3}h_{кр})$, а относительная ошибка $\Delta P_1^0/P_{кр} = \delta/\sigma_0$. Учитывая, что при $\delta \ll \sigma_0$ функция $(1 \pm \delta/\sigma_0)^n \approx 1 \pm n\delta/\sigma_0$, находим

$$\Delta P_{кр} = nP_{кр}\delta/\sigma_0 = n \cdot \Delta P_1^0 \quad (6)$$

Для рассмотренного случая расчета параметров инициирования октогена (см. рис. 2) зависимость (5) при $80 < \sigma < 170$ МПа согласуется с показателем $n = 0,2$. Тогда из формулы (6) следует, что величина погрешности определения критического давления $\Delta P_{кр}$ октогена в 5 раз меньше разброса давления разрушения ΔP_1^0 . Согласно [1], при $\Delta P_1^0/P_{кр} = 15 \div 25\%$, типичной для копровых экспериментов со вторичными ВВ, точность определения критических давлений $\Delta P_{кр}/P_{кр}$ не хуже 10%, что удовлетворительно согласуется с проведенной теоретической оценкой (оценка снизу). Отметим, что дополнительным источником погрешности является неточность измерений толщин зарядов $\Delta h_0/h_0$, величина которой возрастает при уменьшении h_0 .

Рассмотренный эффект зависимости критических параметров инициирования твердых ВВ от прочности образцов следует учитывать при анализе чувствительности смесевых ВВ, в том числе смесей с жидкими компонентами. Известно [7], что введение легкотекучей добавки в количестве нескольких процентов к твердому ВВ снижает прочность зарядов смеси на 30—50 %, что по (5) должно привести к снижению $P_{кр}$ на 7—15 %. Отсюда следует, что если для вторичных твердых ВВ $P_{кр} = 600 \div 800$ МПа, то полученные на их основе неотвержденные пастообразные составы, характеризующиеся величиной эффективной прочности σ в 5—10 раз меньшей, чем у твердых ВВ, могут иметь $P_{кр} = 300 \div 400$ МПа. Этот эффект снижения $P_{кр}$ обусловлен только уменьшением σ и совершенно не связан с химическим взаимодействием в смесевой системе, которая также независимо влияет на снижение величины $P_{кр}$ [9].

Итак, на примере октогена проанализировано влияние прочности заряда на характер разрушения и параметры воспламенения твердых ВВ при ударе на копре. На основе предположений о нормальном законе распределения значений прочности зарядов ВВ, испытываемых на чувствительность к удару, выполнены расчеты кривых частоты взрывов для типичных условий проведения копровых экспериментов. Показана возможность понижения критического давления возбуждения взрыва при введении в ВВ малопрочной текучей флегматизирующей добавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых ВВ ударом.— М.: Наука, 1968.
2. Дубовик А. В., Лисанов М. В. Расчет критических параметров инициирования твердых ВВ ударом на копре // ФГВ.— 1985.— 21, № 4.— С. 87.
3. Дубовик А. В., Лисанов М. В., Авдеев Е. А. Расчет параметров инициирования твердых энергетических веществ с учетом локализации пластической деформации при ударе // Хим. физика.— 1986.— 5, № 4.— С. 539.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.— М.: Наука, 1964.— С. 487.
5. Авдеев Е. А., Дубовик А. В. Влияние скорости нагружения на параметры разрушения и воспламенения тонких слоев твердых энергетических веществ // Хим. физика.— 1988.— 7, № 5.— С. 688.
6. Дубовик А. В., Лисанов М. В. Воспламенение жидких веществ при выдавливании в отверстие. I. Теоретический анализ процесса // ФГВ.— 1985.— 21, № 6.— С. 3.
7. Карпунин И. А., Боболев В. К. Влияние флегматизатора на возбуждение и развитие взрыва ВВ при ударе // ФГВ.— 1967.— 3, № 4.— С. 485.
8. Максимов Ю. Я. Термическое разложение гексогена и октогена // Теория ВВ: Тр. МХТИ.— М.: Высш. шк., 1967.— Вып. 53.
9. Боболев В. К., Карпунин И. А., Балинец Ю. М. и др. О некоторых особенностях возбуждения взрыва ударом и детонационной способности смесей окислитель—горючее // ФГВ.— 1979.— 15, № 2.— С. 140.

г. Москва

Поступила в редакцию 8/VI 1990

УДК 621.7.044.2

*В. Ф. Нестеренко, С. А. Першин, Б. В. Фармаковский,
А. П. Хинский, С. Н. Золотарев, Н. А. Усищев, С. Н. Новиков*

ВЗРЫВНОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ИЗ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Исследованы свойства и методы получения композиционных изделий на основе аморфных магнитомягких сплавов. С применением энергии взрыва изготовлены магнитные головки, экраны и магнитопроводы. Проведенные измерения эксплуатационных характеристик позволяют надеяться на применение взрывной технологии для получения этих изделий.