

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ФИЗИКА ДЕТОНАЦИИ

ENERGETIC MATERIALS AND PHYSICS OF DETONATION

К ВОПРОСУ О ВОЗБУЖДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЗАРЯДАХ ВВ ПРИ ПРОНИКАНИИ В НИХ УДАРНИКОВ

И.Ф. Кобылкин, И.А. Павлова

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Механизмы возбуждения взрывных превращений в зарядах ВВ, заключенных в прочные металлические оболочки, при воздействии высокоскоростных ударников достаточно подробно рассмотрены в книге [1]. Там же приведены соотношения, позволяющие оценивать параметры ударного воздействия, необходимые для возбуждения различных режимов взрывного превращения на ударно-волновой стадии взаимодействия ударника с экранированным зарядом ВВ и на стадии пробития оболочки. В [1] также экспериментально показано, что и при последующем проникании ударника в заряд ВВ возможно возбуждение взрывных превращений в ВВ, даже если исключить разогрев ВВ и ударника на стадии пробития оболочки. В настоящей работе предлагается простая модель процесса возбуждения взрыва в зарядах ВВ при проникании в них ударников с относительно небольшими скоростями до нескольких сотен метров в секунду. Предлагаемая модель основана на положениях теории механической чувствительности твердых ВВ [2] и теории проникания недеформируемых тел в прочные среды [3].

В соответствии с универсальным законом сопротивления давление сопротивления прониканию может быть определено с помощью соотношения [3]

$$p = 3\sigma_{\text{пр}} + \chi \rho u^2,$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – предел прочности среды на сжатие; χ – коэффициент сопротивления головной части ударника: для полусферической головной части $\chi = 0,5$, для плоской $\chi = 1$; ρ – плотность среды; u – скорость проникания. Глубина проникания L ударника в заряд ВВ для такого закона сопротивления может быть определена с помощью соотношения [4]

$$L = \frac{l}{2\chi} \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \ln \left(1 + \chi \frac{\rho_{01} v^2}{3\sigma_{\text{пр}}} \right),$$

где l – длина ударника; ρ_{01} и ρ_{02} – плотности ВВ и материала ударника; v – скорость ударника. Вид этой зависимости представлен на рис. 1.

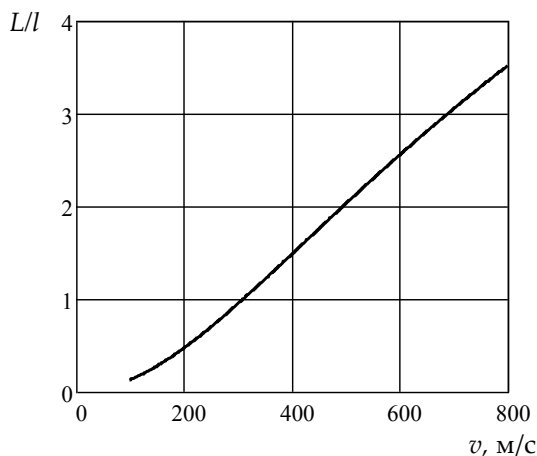


Рисунок 1. Зависимость относительной глубины проникания стального цилиндрического ударника с плоским торцом в заряд ВВ с пределом прочности на сжатие 100 МПа

В диапазоне скоростей 300 – 700 м/с ударник проникает в заряд ВВ плотностью 1,7 г/см³ на глубину, равную нескольким длинам ударника (1–3)l.

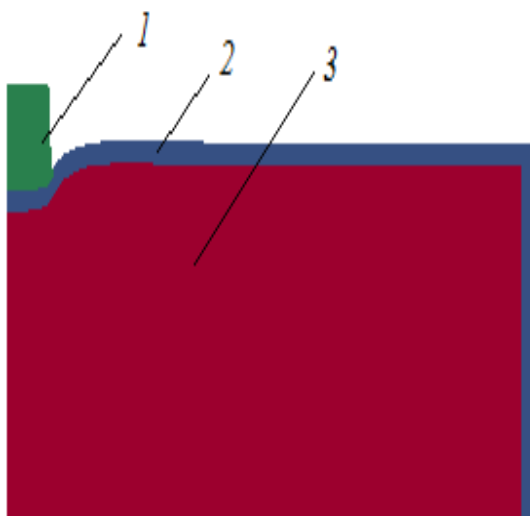


Рисунок 2. Процесс проникания ударника во взрывное устройство: 1 – ударник; 2 – оболочка; 3 – ВВ

Численное моделирование процесса пробития оболочки взрывного устройства и последующего проникания в заряд ВВ, в основном, подтвердили наши представления о характере обтекания ударника ВВ (рис. 2).

Источником разогрева ВВ является интенсивная пластическая деформация вытеснения ВВ из под движущегося ударника в пристеночную область каверны. В соответствии с теорией механической чувствительности ВВ [2] границей разогрева ВВ является плавление ВВ, которое начинается после достижения температуры плавления $T_{пл}$. Но сама температура плавления ВВ зависит от давления. В области небольших давлений эта зависимость имеет вид

$$T_{пл} = T_{пл0} + \alpha p,$$

где $T_{пл0}$ – исходная температура плавления ВВ; $\alpha = 200$ град/ГПа. Приравнявая $T_{пл}$ к критической температуре $T_{кр}$, необходимой для быстрого возбуждения взрывного превращения, в [2] приходят к понятию критического напряжения сжатия ВВ $p_{кр}$

$$p_{кр} = (T_{кр} - T_{пл0})/\alpha.$$

Поскольку для большинства бризантных ВВ $T_{кр} - T_{пл0} = 200\text{--}500$ град, то для них следует ожидать величины критического давления $1,0\text{--}2,5$ ГПа.

Приравнивая критическое давление $p_{кр}$ к давлению сопротивления проникания, получим соотношение для определения критической скорости проникания $u_{кр1}$ ударника в ВВ

$$u_{кр1} = \sqrt{(p_{кр} - 3\sigma_{пр})/\chi\rho}$$

Условием необходимым для возбуждения взрывного превращения в заряде ВВ при проникании в него ударника со скоростью u будет неравенство $u \geq u_{кр1}$. Для количественной оценки $u_{кр1}$ необходимо определиться с прочностью заряда ВВ. Напряжение разрушения при сжатии свободных литых и прессованных зарядов ВВ небольших размеров по порядку величины составляет 10 МПа. Предел прочности зарядов ВВ в виде тонких слоев, определенный в копровых испытаниях значительно больше и изменяется в пределах от 34 МПа для ТНТ до 125 МПа для октогена [2]. Давление прессования многих взрывчатых составов достигает 150–200 и более МПа. Поскольку проникание ударника осуществляется в заряд ВВ в прочной оболочке, то для оценки величины $u_{кр1}$ примем в среднем $\sigma_{пр} = 100$ МПа. Тогда при $p_{кр} = 1$ ГПа $u_{кр1} = 640$ м/с.

Кроме сжатия до критического давления для возбуждения взрыва ВВ необходимо разогреть до критической температуры. Оценку температуры разогрева вытесняемого объема ВВ можно выполнить следующим образом. За время dt ударник при проникании совершает работу $dA = Spudt$, где S – площадь миделевого сечения ударника. В соответствии со вторым законом термодинамики, эта работа в результате пластического деформирования приведет к разогреву вытесняемого объема ВВ. Вытесняемый объем равен $S_r u dt$ и на основании уравнения теплового баланса можно записать

$$Spudt = \rho S_r u dt C \Delta T_{ср},$$

где C – теплоемкость ВВ; S_r – площадь поверхности головной части ударника; $\Delta T_{ср}$ – среднее приращение температуры деформируемого объема. Если принять распределение температуры по деформируемому объему вдоль линии проникания линейным, то максимальное приращение температуры ΔT_{max} будет в два раза превосходить $\Delta T_{ср}$. Из последнего уравнения следует простое соотношение для расчета среднего приращения температуры

$$\Delta T_{ср} = pS/(\rho C S_r).$$

Для ударника с плоским торцом $S = S_r$. Приравнивая приращение температуры ΔT_{max} к критическому и подставляя вместо давления p давление сопротивления прониканию ударника в заряд ВВ, получим соотношение для расчета критической скорости проникания $u_{кр2}$, разогревающей вытесняемый объем ВВ до критической температуры

$$u_{кр2} = \sqrt{C \Delta T_{кр} / 2 - 3\sigma_{пр} / \rho}.$$

Перед тем как перейти к количественным оценка необходимо определиться со значениями величин, входящими в формулу для $u_{кр2}$. Критический разогрев примем равным $\Delta T_{кр} = 500$ град; среднее значение теплоемкости $C = 1,3$ КДж/(кг·град), плотность заряда ВВ $\rho = 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Как и выше, для оценки величины $u_{кр2}$ примем в среднем $\sigma_{пр} = 100$ МПа. Для этих значений характеристик заряда ВВ получаем $u_{кр2} \approx 385$ м/с. Если же потребовать разогрева деформируемого объема до большей температуры, например, чтобы $\Delta T_{ср} = \Delta T_{кр} = 500$ град, то необходимая скорость возрастает до 700 м/с. Более подробный количественный анализ показывает, что в диапазоне $\sigma_{пр} = 50\text{--}300$ МПа при скоростях ударника, превосходящих $u_{кр1}$, гарантированно произойдет вспышка ВВ, поскольку необходимая для этого скорость меньше $u_{кр1}$.

Выполненный оценочный анализ показывает реалистичность механизма возбуждения взрывных превращений в зарядах ВВ при проникании в них ударников со скоростью 200–700 м/с за счет разогрева ВВ при интенсивной пластической деформации вытеснения ВВ из-под движущегося ударника в пристеночную область каверны. Для более строгого анализа необходимо учесть

разупрочнение ВВ из-за его разогрева и возможность дополнительного разогрева расплавленного ВВ из-за вязкой диссипации энергии.

Список литературы

1. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 354 с.
2. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Инициирование твердых ВВ ударом. – М.: Наука, 1968. – 174 с.
3. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Дорохов Н.С. и др. Частные вопросы конечной баллистики / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 592 с.
4. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974. – 344 с.

УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕАКЦИЙ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ПРИ УДАРЕ НИЗКОСКОРОСТНЫМИ ИНДЕНТОРАМИ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ

Г.В. Белов, А.Н. Китин, Н.И. Шустова

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Для разработки моделей инициирования взрывчатых составов (ВС) при ударных воздействиях ([1], [2]) необходимы экспериментальные данные, позволяющие выявить условия удара, соответствующие качественной смене реакции ВС: механическое повреждение ВС или инициирование реакции взрывчатого превращения. При этом важно иметь не точечные экспериментальные данные (разбросанные по параметрам ударника и конструкции сборки с ВС), а физические зависимости, связывающие параметры удара с условиями инициирования в возможно широком диапазоне их изменения. Это, с одной стороны, позволит использовать такие зависимости для практических оценок, а с другой, сужает возможности подгонки неадекватных физических моделей под экспериментальные данные.

Полученные нами в последние годы результаты по инициированию образцов из флегматизированного октогена ударниками со сферической формой инденторов позволяют рассчитывать на возможность выявления таких зависимостей. Анализ этих результатов представлен в настоящем докладе. При этом данные по параметрам иницируемого взрывчатого превращения и динамике его развития не рассматриваются. Их можно найти в цитируемых работах.

1. Постановка экспериментов и результаты

Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 1.