

измерений при постоянном потенциале зонда на участке стационарной концентрации заряженных частиц в плазме.

2. Определение коэффициента рекомбинации заряженных частиц по совокупности обоих методов дает значения, близкие к литературным данным.

3. Импульсным зондом можно при известном коэффициенте рекомбинации заряженных частиц определить коэффициент подвижности положительных ионов.

4. Концентрации заряженных частиц, определенные из зондовых измерений, в 1,5—2 раза превышают концентрации электронов, измеренные СВЧ-интерферометром.

Поступила в редакцию 16/IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Тихомиров и др. А. с. СССР, № 416617; Бюл. изобр., 1974, 7.
2. G. S. Aravin, Yu. K. Karasevich P. A. Vlasov e. a. Proc. XV Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Pt. II. Minsk, 1981.
3. И. Л. Панкратьева, В. А. Полянский. Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, 2, 102.
4. Лин, Тир. Вопросы ракетн. техн., 1964, 5, 16.
5. C. F. Hansen. Phys. Fluids, 1968, 11, 4, 904.
6. Ю. И. Беляев, В. А. Полянский, Е. Г. Шапиро.— В кн.: Аэродинамика больших скоростей/Под ред. Г. Ф. Теленина. М.: Изд-во МГУ, 1979.
7. И. Мак-Даннел. Процессы столкновений в ионизованных газах. М.: ИЛ, 1966.
8. Г. С. Аравин, И. А. Власов, Ю. К. Карасевич и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 49.
9. В. К. Душня.— В кн.: Тр. Института механики МГУ. № 21. М., 1973.
10. Е. В. Маколкин, И. А. Евграфов и др. А. с. СССР, № 386327; Бюл. изобр., 1973, 26.
11. Б. М. Смирнов. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

*Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. П. Погорелов
(Москва)*

Исследования условий и механизма инициирования ударными волнами гетерогенных взрывчатых веществ, составляющих основную массу применяемых в практических целях ВВ, имеют важное значение и представляют большой интерес для понимания сущности и закономерностей процесса возбуждения детонации. Конечная цель этих исследований состоит в выявлении объективных характеристик чувствительности ВВ к ударно-волновому воздействию и в количественном их описании. Основные результаты работ, посвященных этому вопросу, представлены в [1—6].

Можно выделить два основных направления в экспериментах: регистрация профилей давления или массовой скорости с помощью датчиков, «закрепленных» в заданной лагранжевой точке [7—11], и определение параметров вводимой в образец ВВ ударной волны, вызывающей взрыв [12—14]. В первом случае полученная информация дает более полные сведения о процессе перехода ударной волны в детонационную, в то время как исследования по второму направлению в большей степени направлены в сторону практического использования. Результаты разработок по каждому направлению могут быть предметом самостоятельного детального анализа.

Для описания экспериментальных данных широко применяются различные математические модели, включающие законы сохранения в дифференциальной форме с соответствующими начальными и граничными условиями, уравнения состояния компонентов и закон эперговыделения, основанный, как правило, на формальном кинетическом подходе [5, 15,

16]¹. Хотя на этом пути удалось весьма полно воспроизвести ряд особенностей перехода инициирующей ударной волны в детонационную [15, 16], из-за формализации закона энерговыделения (в первую очередь) определяющая роль в дальнейшем развитии представлений в области инициирования гетерогенных ВВ принадлежит экспериментальным исследованиям.

В настоящем обзоре обобщаются и анализируются результаты исследований по второму из указанных выше направлений. Интервал рассматриваемых давлений инициирующей ударной волны охватывает область $p_{и} \approx 1 \div 10$ ГПа при характерной длительности импульса давления от нескольких десятых до нескольких микросекунд. При таких параметрах ударно-волновой нагрузки для большинства гетерогенных ВВ реализуется переход инициирующей УВ в детонационную.

Исследование возбуждения детонации одномерными ударными волнами

К настоящему моменту накоплена обширная экспериментальная информация о реакции твердых гетерогенных ВВ на ударно-волновое воздействие. Однако из-за различия методических подходов не всегда можно единообразно интерпретировать и количественно оценить экспериментальные результаты. Поэтому в настоящей работе приняты во внимание только те экспериментальные данные, которые получены в условиях, когда параметры вводимой в ВВ ударной волны (амплитуда, длительность, профиль) могут быть установлены с приемлемой степенью надежности.

Традиционным стал метод ударно-волнового нагружения ВВ путем торможения на неподвижном образце скоростного ударника, ускоряемого взрывом ВВ, электровзрывом проводника или газовой пушкой. Этот метод при известных ударной адиабате непрореагировавшего ВВ и материала ударника, а также скорости соударения позволяет легко рассчитать параметры создаваемой в ВВ ударной волны. История давления на границе ВВ, находящегося в контакте с ударником, имеет вид, показанный на рис. 1 [17]. В дальнейшем параметры ударной волны, входящей в ВВ, будем характеризовать амплитудой p_{Φ} и длительностью t_0 .

Результаты экспериментальных исследований многих авторов убедительно показали, что возбуждение взрыва (детонации) ударными волнами зависит не только от амплитуды p_{Φ} ударной волны, но также и от длительности t_0 действия давления с этой амплитудой [12, 14, 18—21]. Указанная закономерность получена для ряда исследованных гетерогенных ВВ (химически чис-

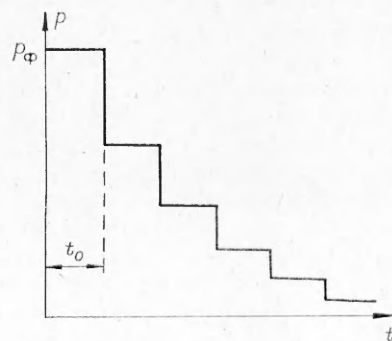


Рис. 1. Типичная расчетная зависимость давления, действующего на поверхность ВВ, от времени [17].

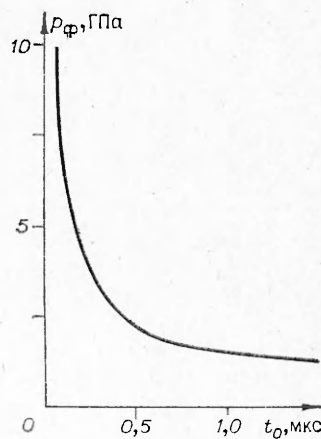


Рис. 2. Типичная зависимость $p_{и}(t_0)$ [14] ТГ 50/50.

¹ См. также библиографию к этим работам.

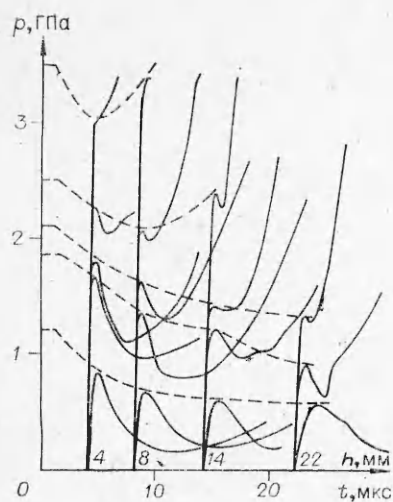


Рис. 3. Профили давления в различных сечениях состава ТГ 50/50 [11] (при $h = 0$ даны расчетные значения давлений).

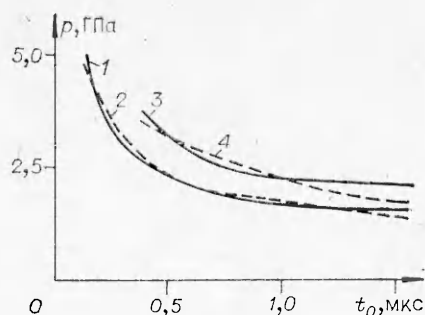


Рис. 4. Зависимость критических параметров инициирования ТНТ стальным (1) и алюминиевым (3) ударником от характерного времени действия импульса [14].
 $p_0 t_0$, $\text{H}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$: 2 — $280 \cdot 10^6$, 4 — $524 \cdot 10^6$.

тых и смесевых): ТНТ (литой и пресованный), гексоген, ТГ 50/50, состав В-3, нитростильбен, состав РВХ-9404, состав ТАТВ и др. Можно поэтому считать, что влияние длительности ударной волны на амплитуду инициирующей ударной волны присуще всем гетерогенным ВВ.

Наиболее последовательно и подробно зависимость $p_n(t_0)$ изучена в работах [12, 14]. Типичный вид кривой $p_n(t_0)$ в координатах $p_\Phi - t_0$ показан на рис. 2 (под p_n понимается величина p_Φ при заданном t_0 на рис. 1, по достижении которой в ВВ возбуждается детонация). Зависимость $p_n(t_0)$ разделяет плоскость p_Φ, t_0 ($p_\Phi > 0, t_0 > 0$) на две области: выше кривой лежат состояния, при которых происходит полная или частичная детонация, в состояниях ниже кривой детонация не возбуждается. Положение кривой $p_n(t_0)$ в известной мере условно, так как вблизи предела возникновения детонации ее возбуждение носит вероятностный характер. Это, однако, не изменяет общего характера поведения $p_n(t_0)$. Положение кривой $p_n(t_0)$, приведенной на рис. 2, подтверждено независимыми опытами с регистрацией временных зависимостей $p(t)$ манганиновыми датчиками [11]. Регистрация профилей давления в различных сечениях h с изменением p_Φ на фронте ударной волны, вводимой в ВВ, наглядно показывает (рис. 3) особенности эволюции ударной волны в детонационную. В области низких начальных давлений (для ТГ 50/50 при $p < 1,2$ ГПа и характерной длительности импульса давления $\sim 0,33$ мкс) ударная волна распространяется по ВВ как по инертному веществу.

С увеличением начальной амплитуды p_Φ ударной волны за ее фронтом отмечается заметное повышение давления, что свидетельствует о наличии взрывчатого превращения в ВВ. Скорость нарастания давления, связанного с взрывчатым превращением, увеличивается в процессе распространения ударной волны по ВВ и зависит от величины p_Φ . С повышением p_Φ средняя скорость нарастания давления в заданном сечении резко возрастает. Соответственно время задержки взрывчатого разложения t_3 заметно уменьшается по мере распространения ударной волны по ВВ и с увеличением значения p_Φ . При давлениях, соответствующих кривой $p_n(t_0)$ и выше, происходит быстрый процесс перехода системы (ударная волна плюс область повышенного давления) в нормальную детонационную волну.

Иницирующее давление p_n зависит от t_0 . При $t_0 < t_0^*$ величина p_n резко возрастает с уменьшением t_0 . Напротив, для $t_0 > t_0^*$ наблюдается медленное убывание p_n с ростом t_0 . Каждому конкретному ВВ с определенной структурой и начальной температурой соответствует свое значение t_0^* и соответственно $p_n(t_0^*)$: для состава ТГ 50/50 $t_0^* \approx 0,5$ мкс, $p_n \approx$

$\approx 2,5$ ГПа [14], для гексанитростильбена $t_0^* \approx 0,5$ мкс, $p_n \approx 3,6$ ГПа [20]. По [1], вид $p_n(t_0)$ может быть объяснен сменой механизма взрывчатого превращения: при малых давлениях реакция осуществляется через горячие точки, при больших — в виде теплового взрыва в объеме ударно-сжатого ВВ. В самом деле, при малых давлениях средней объемный разогрев составляет, по оценкам, несколько десятков градусов, чего явно недостаточно для того, чтобы вызвать развитие реакции. Для объяснения экспериментальных фактов необходимо ввести представление о существовании локальных областей разогрева. Заметим, что механизм образования горячих точек во многих отношениях еще изучен мало и является предметом дискуссий [22—26].

С повышением давления пшципующей ударной волны прогрессирующую роль играет объемный разогрев ударного сжатия, который, начиная с $p_n > 5$ ГПа для состава ТГ 50/50, становится определяющим. Взаимное положение зависимостей $p_n(t_0)$ характеризует сравнительную чувствительность различных ВВ — чем выше величина p_n при заданном t_0 , тем меньше чувствительность ВВ к ударно-волновому воздействию. Анализ показывает, что сравнительная ударно-волновая чувствительность согласуется с имеющимися представлениями о сравнительной чувствительности, определяемой стандартными методами.

Независимо выполненными экспериментами на ТНТ [14] и составе РВХ-9404 [27] показано, что на p_n в микросекундном диапазоне значительный t_0 существенное влияние оказывает градиент спада $\frac{\partial p}{\partial t_*}$ давления за ударной волной, вводимой в ВВ, т. е. скорость «снятия» давления за фронтом ударной волны. Это явление может быть объяснено следующим образом. В состоянии с p_n химическая реакция взрывчатого превращения проходит еще недостаточно глубоко. При быстром спаде давления аналогично уменьшаются плотность и температура, т. е. система быстро выходит из своего состояния на фронте ударной волны. В результате этого химическая реакция обрывается. Напротив, при медленном спаде давления за фронтом ударной волны все параметры изменяются медленно и химическая реакция взрывчатого превращения продолжается — происходит взрыв.

Таким образом, для возбуждения детонации при равных t_0 в случае быстрого спада давления необходима амплитуда ударной волны, большая по сравнению с ударной волной с меньшей скоростью уменьшения давления из-за разгрузки сзади. Для ТНТ зависимости $p_n(t_0)$ показаны на рис. 4. Верхняя зависимость отвечает примерно вдвое большей скорости спада давления. Отмечается также большое различие постоянных для критерия $p^2 t_0$.

На ударно-волновую чувствительность ВВ оказывают влияние плотность и размер частиц. По [20], при постоянной $t_0 = 0,035$ мкс для гексанитростильбена, имеющего дисперсность 10; 2,56 и 1,59 м²/г, вероятность взрыва при давлении 7,0 ГПа составляет соответственно 1,00; 0,75 и 0,20. Этот результат не следует, однако, распространять на другие значения t_0 . В то же время опыты с гранулированным гексагеном с размерами частиц 40—80 и 200—400 мкм не показали заметной разницы между кривыми $p_n(t_0)$ при $t_0 = 0,5 \div 1,0$ мкс [12]. Неподобные эксперименты по изучению влияния размера частиц указывают на тенденцию к повышению ударно-волновой чувствительности с его уменьшением.

Имеющиеся данные о зависимости p_n при постоянном t_0 показывают, что при больших давлениях чувствительность падает с ростом плотности. По [20] для гексанитростильбена с дисперсностью 2,56 м²/г и $t_0 = 0,035$ мкс $p_n = 3,8$ и 5,3 ГПа при $\rho_0 = 1,30$ и 1,60 г/см³ соответственно. Для ТНТ уменьшение чувствительности с ростом ρ_0 следует из результатов [28]. В области больших давлений такая зависимость логично вытекает из предположения, что при больших p важную роль играет объемный разогрев. Очевидно, что чем выше пористость ВВ, тем выше температура при ударном сжатии, что и объясняет указанный эффект.

Результаты опытов с различной пористостью подкрепляются опытами с многократным сжатием прессованного ТНТ слабыми ударными волнами [29], в которых зарегистрировано уменьшение чувствительности к воспламенению ударной волной, связанное с уплотнением ВВ первой ударной волной. Уплотнение слабой первой ударной волной снижает количество потенциальных горячих точек и приближает ВВ к гомогенной среде. Аналогичный факт отмечается в работе [30] для состава В. Заметим, что эффект первой ударной волны может быть противоположным. По [29], для литого тротила чувствительность повышается, если время между двумя ударными волнами составляет ~ 10 мкс. Можно полагать, что в данном случае первая ударная волна, создавая напряжения, превосходящие предел прочности, разрушает первоначальную структуру, повышая количество потенциальных горячих точек.

В литературе часто встречается суждение о независимости для гетерогенных ВВ в отличие от гомогенных перехода инициирующей ударной волны в детонационную от начальной температуры [15]. Результаты экспериментов на литом тротиле [31], выполненных при различной начальной температуре и близких условиях ударно-волнового нагружения образцов из ВВ, свидетельствуют, однако, об ощутимой зависимости p_n от T_0 : $p_n = 2,8$ ГПа при $T_0 = 291$ К и $p_n = 5,7$ ГПа при $T_0 = 20,4$ и $77,4$ К. Кажущееся противоречие устраняется, если принять во внимание ранее упомянутое изменение механизма превращения при ударном сжатии ВВ при больших давлениях. В рассматриваемом случае ударные волны можно считать сильными, т. е. нужно учитывать объемный разогрев. Для достижения примерно равной температуры при низкой начальной температуре следует приложить большие давления по сравнению с повышенной начальной температурой.

Наличие инертных добавок может привести к аномальной реакции ВВ на ударно-волновое воздействие. Добавление к гексогену и смеси ему составу ТНТ с гексогеном воска вызывает в области давлений в несколько гигапаскалей уменьшение ударно-волновой чувствительности ВВ при $T_0 = 63$ С по сравнению с нормальной начальной температурой, что связывается с влиянием низкоплавкого компонента (воска) в ВВ [32]. Влияние начальной температуры, следовательно, зависит от конкретных свойств ВВ (в том числе его компонентов) и амплитуды прикладываемого к ВВ импульса давления.

Отметим, что отклонение от одномерности движения, например, при распространении детонации по каналам из ВВ, имеющим углы поворота, существенно усложняет картину течения и анализ результатов экспериментов [33].

Критерии оценки чувствительности гетерогенных твердых ВВ к ударно-волновому воздействию

С прогрессом в экспериментальном изучении процесса ударно-волнового инициирования углублялось понимание сущности процесса и совершенствовались формы его описания. Экспериментальные факты свидетельствуют о многообразии и сложности явлений, связанных с эволюцией ударной волны в детонационную [1]. Поэтому трудно ожидать, что на сегодняшний день может быть сформулирован критерий ударно-волновой чувствительности гетерогенных ВВ, достаточно полно описывающий эти многообразия и сложность. Тем не менее, исследователями достигнут определенный прогресс в попытке установить в количественной форме критерий ударно-волновой чувствительности на макроскопическом уровне.

В разное время предложено несколько критериев для оценки чувствительности. Зависимость расстояния l_0 перехода инициирующей ударной волны в детонационную от амплитуды p_n ударной волны (так называемая $p_n - l_0$ -зависимость) выявлена для многих взрывчатых веществ и составов. Общими закономерностями для конкретного вида ВВ являются

уменьшение величины l_0 с возрастанием p_n и увеличение l_0 с ростом начальной плотности. Применение такого подхода для оценки чувствительности, очевидно, ограничено идентичностью условий испытания (равенство давлений, длительности действия импульса давлений и т. д.). В этом случае $p_n - l_0$ -зависимости остаются важным критерием сравнительной ударно-волновой чувствительности. При большой длительности вводимого в ВВ импульса давления прямоугольного профиля величина p_n слабо зависит от t_0 [17, 20]. В подобных условиях можно и дальше упрощать зависимость $p_n - l_0$, принимая в качестве критерия только критическое давление $p_{кр}$ возбуждения детонации вне его связи с t_0 . Критерий $p_{кр}$ имеет еще более ограниченный характер, но не лишен определенного практического смысла.

В литературе широко обсуждается предложенная в работе [34] концепция критической энергии. Аналитическая форма энергетического критерия может быть представлена в виде $put_0 = \text{const}$ или $p^2 t_0 / \rho_0 D = \text{const}$. При слабом изменении D последний вид энергетического критерия упрощается до $p^2 t_0 = \text{const}$. В приведенных соотношениях p_ϕ — давление в ВВ; t_0 — время его действия; ρ_0 — начальная плотность ВВ; D — скорость ударной волны в ВВ при давлении p_ϕ ; u — массовая скорость в ВВ при этом давлении. Критерий представляет собой энергию, переданную через единицу площади поверхности при одномерном нагружении ВВ.

При нагружении тонким скоростным ударником p и u отождествляются с давлением и массовой скоростью на границе раздела ВВ в течение времени t_0 , равного времени первой циркуляции ударной волны по толщине ударника. Рядом исследователей показано, что критерий $p^2 t_0$ или $p^n t_0$ (показатель степени n несколько отличен от 2) удовлетворительно описывает экспериментальные данные в области малых значений t_0 при относительно высоких амплитудах давления [20, 35—39]. При больших t_0 в силу упомянутого выше своеобразного хода зависимости $p_n(t_0)$ критерий $p^2 t_0$ или $p^n t_0$ с постоянным значением n не выполняется, заметно отклоняясь от экспериментальных данных.

По [40], процесс ударно-волнового инициирования в зависимости от уровня давления ударной волны может быть условно разделен на три этапа. При $p \leq p_1$ химические реакции протекают медленно, и для их ускорения требуется длительное время. Как следствие этого, существуют потери энергии в очагах разогрева, и критическая энергия будет возрастать. Если же $p \geq p_2$, то имеет место быстрое химическое превращение и снижение времени реакции. В этом случае можно ожидать уменьшения величины критической энергии. В промежуточной области давлений ударной волны в ВВ $p_1 < p < p_2$ инициирование происходит при примерно постоянной величине критической энергии.

Критерий критической энергии ($put_0 = \text{const}$ или $p^2 t_0 = \text{const}$) не отражает экспериментально выявленного эффекта влияния размера частиц и плотности [15, 37]. Зависимость критерия от размера частиц ВВ ($p^2 t_0$ слабее для более мелких частиц) и начальной плотности ВВ ($p^2 t_0$ возрастает с падением ρ_0) прямо противоположна зависимости воспламенения от этих же параметров. По-видимому, величина $p^2 t_0 = \text{const}$ коррелирует с нарастанием процесса химического разложения и переходом в детонацию, но не с воспламенением [37]. Вопрос о том, какую стадию процесса описывает критерий $p^2 t_0$, является дискуссионным. Так, в [15] в отличие от [37] считается, что этот параметр «достаточно хорошо описывает начальную стадию процесса — воспламенение». Это лишний раз подчеркивает сложность процесса инициирования гетерогенных ВВ ударными волнами. На величину критической энергии кроме плотности и размера частиц оказывают влияние и другие факторы, такие как наличие инертных добавок, добавки с химическими эффектами, начальная температура ВВ. В общем случае изменение физических и химических свойств ВВ влияет на величину критической энергии.

В работе [31] на основе энергетического критерия предложена фе-

поменологическая теория зависимости инициирующего давления от начальной температуры. При фиксированной длительности импульса давления критическая энергия (на единицу площади) представляется в форме $E(t) = \rho_0 D (ku^2/2 + E_0)$, где D — волновая скорость; u — массовая скорость; E_0 — начальная тепловая энергия ВВ. Коэффициент k зависит от амплитуды инициирующего импульса p_n и лежит в пределах $1 \leq k \leq 2$. Приведенное соотношение позволяет предсказать p_n как функцию T_0 при неизменной длительности импульса давления. Величина $E(t)$ не может быть вычислена в настоящее время теоретически и находится из эксперимента.

Заметим, что критерии, в основе которых лежит концепция критической энергии, строго говоря, применимы для прямоугольного инициирующего импульса давления. Несмотря на очевидную ограниченность критерия E , он, безусловно, полезен и важен для практики, так как позволяет оценить или приближенно предсказать результат воздействия ударной волны на ВВ. В [13] предпринята попытка использовать в качестве критерия инициирования величину приращения удельной внутренней энергии ΔE ВВ при сжатии ударной волной: $\Delta E = u^2/2 = p/2 \cdot (v_0 - v)$, где v_0 и v — удельный объем ВВ перед и за фронтом ударной волны в ВВ соответственно. Этот параметр, однако, хуже согласуется с экспериментальными данными, чем рассмотренный выше $p^2 t_0$ [15].

В [21] предложен критерий, основанный на концепции минимального инициирующего импульса, а в [41] — критерий критического ускорения λ , который зависит от физических свойств ВВ, по которому распространяется ударная волна, кинетики реакций за фронтом ударной волны и записывается в виде

$$\lambda = v_0 D G \omega Q / c_T (1 - \mu) c^2,$$

где v_0 — начальный удельный объем; $G = \frac{\partial p}{\partial T}$; ω — скорость реакции; Q — теплота реакции; c_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме; c — скорость звука; $\mu = D^2/c^2$. Эволюция массовой скорости связана с величиной λ соотношением

$$\frac{du}{dt} = (1 - \mu) \left[1 + \frac{2\mu}{1 + 2k} \right]^{-1} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \lambda \right),$$

где $k = -\frac{D^2}{v_0 p'_n(v)}$, а $p'_n(v)$ — производная по объему вдоль адиабаты

Гюгонио ВВ. Если $\frac{\partial u}{\partial t} > \lambda$, то волна ускоряется, при $\frac{\partial u}{\partial t} < \lambda$ замедляется.

Случай $\frac{\partial u}{\partial t} = \lambda$ отвечает стационарному процессу. Для учета влияния кривизны ударной волны в ВВ в [42] предложено представлять критическое ускорение λ как сумму $\lambda = \lambda_{хим} + \lambda_{кр}$, где $\lambda_{хим}$ — критическое ускорение, связанное с тепловыми, химическими и механическими свойствами ВВ, а $\lambda_{кр}$ — критическое ускорение, соответствующее геометрии поверхности фронта ударной волны.

В предположении, что существует некоторый минимальный инициирующий импульс, который необходимо обеспечить, чтобы начались процессы, приводящие к возбуждению детонации, в [21] рассмотрены новые формы критериев инициирования. Энергетический критерий преобразуется к формам

$$(pu - p_{min}u_{min})t = const, \quad (p^2 - p_{min}^2)t = const,$$

$$\left[\frac{(p - Y)^2}{\rho_0 D} - p_{min}u_{min} \right] t = const,$$

где p_{min} — минимальное значение давления, при котором происходит инициирование; u_{min} — соответствующее ему значение массовой скорости;

Y — давление схлопывания пор. Последняя из форм учитывает механическую прочность ВВ, которую следует принимать во внимание для слабых ударных волн в ВВ. Еще один вид критерия на основе концепции минимального инициирующего импульса выражается через массовую скорость: $u > u_{\min} > u_y$, $[(u - u_y)^2 - (u_{\min} - u_y)^2]t = \text{const}$, где u_{\min} — минимальное значение массовой скорости, способной вызвать детонацию; u_y — массовая скорость при напряжении, равном пределу текучести ВВ. Величина u_y учитывается в случае слабых ударных волн в ВВ. Критерии критического ускорения и минимального инициирующего импульса пока мало апробированы, но несомненно заслуживают внимательного изучения. В частности, для практического использования критерия минимального инициирующего импульса необходимо найти метод определения параметров вблизи предела текучести и величин p_{\min} и u_{\min} .

Основные результаты и выводы

1. Результаты экспериментальных исследований показывают сложность и многообразие проявления реакции гетерогенных ВВ на ударно-волновое воздействие. Достигнуты несомненные успехи в изучении процесса возбуждения детонации в гетерогенных ВВ ударными волнами. Однако полная картина процесса еще далека от своей завершенности, перспективы дальнейших исследований связаны с совершенствованием экспериментальных и расчетных методов.

2. Ударно-волновая чувствительность гетерогенных ВВ определяется как их физико-химическими свойствами и начальной температурой, так и характеристиками инициирующего импульса давления. Экспериментально установлено, что величина инициирующего давления p_n зависит от длительности t_0 его действия и градиента (скорости) спада давления за фронтом ударной волны, вводимой в ВВ. Из физико-химических свойств на ударно-волновую чувствительность оказывают влияние начальная плотность (пористость), размер частиц и их распределение, наличие инертных добавок. Характер зависимости $p_n(t_0)$ указывает на смену механизма химического превращения: от механизма «горячих точек» к объемному разогреву при переходе от малых давлений инициирующей ударной волны к большим.

3. Макроскопические критерии ударно-волновой чувствительности, основанные на энергетических концепциях, согласуются с экспериментальными результатами в узком диапазоне характеристик инициирующих УВ: при малой длительности и соответственно больших давлениях, где большую роль в химических превращениях играет объемный разогрев ВВ при ударном сжатии. Эти критерии не отражают локальности разогрева, влияния плотности, размера и распределения частиц. Для каждого типа ВВ значение константы в критериях изменяется в широких пределах в зависимости от его плотности, размера частиц и начальной температуры. Несмотря на условность и ограниченность энергетических критериев, их применение в области малых значений t_0 имеет практический смысл, ибо позволяет оценить ударно-волновую чувствительность.

Поступила в редакцию 14/XI 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремлю, С. Д. Савров, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
2. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория ВВ. М.: Оборонгиз, 1960.
3. Ю. Б. Харитон.— В кн.: Вопросы теории ВВ. Вып. 1. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
4. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
5. Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981.
6. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых ВВ ударом. М.: Наука, 1968.
7. А. Н. Дремлю, С. А. Колденов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6.

8. А. Н. Дремни, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.
9. G. Waacklerle, G. Johnson, P. Halleck. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
10. Г. И. Канель, А. Н. Дремни. ФГВ, 1977, 13, 1.
11. Ю. В. Батьков, С. А. Новиков, А. П. Погорелов и др. ФГВ, 1979, 15, 5.
12. Y. de Longueville, C. Fauquignon, H. Moulard. Sixth Symp. (Internat.) on Detonation. California, 1976.
13. М. Я. Васильев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
14. Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. П. Погорелов и др. ФГВ, 1981, 17, 6.
15. В. С. Соловьев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
16. V. M. Titov, V. F. Lobanov, S. A. Bordzilovski a. o. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
17. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак, С. А. Новиков и др. ФГВ, 1977, 13, 2.
18. E. F. Gittings. Fourth Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1965.
19. B. D. Trott, R. G. Jung. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Pasadena, 1970.
20. A. S. Schwarz. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
21. R. H. Stresau, J. E. Kennedy. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
22. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 125, 3220.
23. Б. А. Хасанов, А. А. Борисов, Б. С. Ермолаев и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
24. В. С. Соловьев, А. В. Аттетков, А. В. Бабкин и др.— В кн.: Детонация. Вып. II. Черноголовка, 1981.
25. D. V. Hayes. Eighth Internat. Collog. on Gasdynamics of Explosives and Reactive Systems. Minsk, 1981.
26. Е. Г. Баранов, О. И. Оберемок, Е. А. Семенюк. ФГВ, 1981, 17, 5.
27. R. E. Setchell. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
28. М. Я. Васильев. ФГВ, 1965, 1, 3.
29. V. M. Boyle, D. L. Pilarski. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
30. M. C. Chick, D. J. Hatt. Ibid.
31. V. M. Titov, V. V. Silvestrov, V. V. Kravtsov. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
32. Ch. Klee, D. Ludwig. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
33. С. А. Новиков, В. И. Шутов. ФГВ, 1980, 16, 2.
34. F. E. Walker, R. J. Wasley. Explosivestoffe, 1969, 17, 1.
35. Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. П. Погорелов и др.— В кн.: Детонация. Вып. II. Черноголовка, 1981.
36. C. A. Handle, J. R. Jumphrey a. o. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
37. P. Howe, R. Frey a. o. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
38. D. V. Hayes. Ibid.
39. М. В. Баталова, С. М. Бахрах, В. П. Зубарев. ФГВ, 1980, 16, 2.
40. F. E. Walker. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
41. J. W. Nunziato, J. E. Kennedy, D. K. Hardesty. Ibid.
42. P. J. Chen, J. E. Kennedy. Ibid.

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА

Г. И. Канель, А. Н. Питюлин
(Черноголовка)

В настоящее время известно достаточно много экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению и расчетному описанию процессов ударно-волнового деформирования металлов, ионных кристаллов и других пластичных материалов. Вместе с тем совершенно недостаточно информации о поведении в этих условиях хрупких материалов, хотя реология таких сред значительно сложнее. В данной работе представлены результаты регистрации и анализа волновых профилей в модельном керамическом материале на основе карбида титана (80% по массе) с никелевой связкой. Образцы приготовлены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Для расчета объемной сжимаемости керамики методом смесей [1] определяли ударную адиабату чистого карбида титана. Измерения прово-