

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ВВ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ

С. Г. Андреев, М. М. Бойко, В. С. Соловьев

(Москва)

В настоящее время достаточно полно изучено инициирование ВВ падающими ударными волнами постоянной или изменяющейся во времени амплитуды. Значительный интерес представляет инициирование ВВ при ступенчатом сжатии, которое наблюдается при взрывном нагружении ВВ через металлическую пластину [1], при косом столкновении волн [2], при отражении ударной волны в ВВ от жестких экранов [3]. Различие в процессах инициирования однородных и гетерогенных ВВ, наблюдаемое при однократном сжатии [4], в большей степени должны проявляться при ступенчатом сжатии. В данной работе двукратное ступенчатое сжатие достигалось отражением ударной волны от преграды или последовательным взрывом нагружающих зарядов, причем рассматривается слой ВВ, прилегающий к границе, генерирующей вторичную волну.

Следует различать действие ступенчатого сжатия на однородные и гетерогенные ВВ. При прохождении гладкой ударной волны давлением  $P_1$  однородное ВВ разогревается до температуры  $T_1$ , которая может быть определена с помощью модели молекулярного кристалла [5]. Совместное решение уравнения Аррениуса для задержки взрыва и уравнений, определяющих  $T_1$ , дает априорную зависимость  $\tau(P_1)$ . Волна вторичного сжатия амплитуды  $P(P=P_1+\Delta P)$ , образованная в результате отражения от жесткой стенки или при последовательном взрывном нагружении, распространяется по однородной среде, разогретой до  $T_1$  (имеется в виду, что волна  $P_1$  гладкая). Температура ударного разогрева ВВ за волной вторичного сжатия может быть определена, аналогично [5], решением системы

$$\left. \begin{aligned} \int C v dT &= \frac{1}{2} P_1 (v_0 - v_1) + \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (v_1 - v) - \int_{v_0}^v P_{T_0} dv, \\ C v &= R \left[ 3 + \sum_1^n \varepsilon^{(1)}(T) + \frac{(3a - \delta) - n}{1} \sum_1^n \varepsilon^{(2)}(T) \right], \\ P_{T_0} &= P_T(v), \\ P &= P(v_1; v). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Изотерма  $P_T(v)$  вычисляется по соотношениям работы [5]. Для органических жидкостей энергия изотермического сжатия может быть аппроксимирована выражением

$$\int_{v_2}^v P_{T_0} dv = 0,85 \int_{v_0}^v P dv.$$

Ударную адиабату вторичного сжатия  $P(v_1, v)$  можно, согласно [6], считать совпадающей с ударной адиабатой однократного сжатия в  $P-v$ -координатах. Вычисления по (1) показывают, что при ступенчатом сжатии разогрев ВВ значительно слабее разогрева однократного сжатия той же амплитуды. Система (1) позволяет по известной зависимости

$$\tau = \tau(P_1) \quad (2)$$

для однократного сжатия определить задержку взрыва при ступенчатом сжатии до давления  $P$  и давлении предварительного сжатия  $P_1$  (при этом предполагается время действия давления  $P_1 t_1 \rightarrow 0$ , что справедливо у границы с отражающей поверхностью).

Предварительно из (1) и (2) при  $P = P_1$  (однократное сжатие) определялась зависимость

$$\tau = \tau(T), \quad (3)$$

после чего из совместного решения (1) и (3) для двукратного сжатия находилось  $\tau = \tau(P_1, P)$ . При определении  $\tau = \tau(P_1, P)$  используется экспериментальная зависимость для задержек взрыва, что делает результаты вычисления более надежными по сравнению с расчетной формулой

$$\tau = \frac{Cv \cdot R \cdot T^2}{Q \cdot E \cdot z} \exp\left(\frac{E}{R \cdot T}\right).$$

На рис. 1 приведены вычисления для нитрометана. Кривая 1 — исходная экспериментальная зависимость  $\tau(P_1)$ . Семейство кривых 2, исходящих из точек на кривой 1, определяет задержки при ступенчатом сжатии ВВ от  $P_1$  (начальная точка кривой) до  $P$ . Следует заметить, что для отражения волны в ВВ от жесткой преграды давление предварительного сжатия  $P_1$  однозначно определяет давление вторичного сжатия. Последнее позволяет провести в  $P - \tau$ -координатах линию типа 3, соответствующую давлениям отражения и задержкам отражения от выбранного материала. Кривая 3\* построена в предположении зеркальности адиабаты торможения адиабате первичного сжатия, кривая 3\*\* — в предположении совпадения адиабат первого и второго сжатия в  $P - v$ -координатах [6].

Оптический метод регистрации и размеры сборок (ограниченный вес нагружающего заряда) не позволили с достаточной точностью фиксировать начало детонации в отраженной волне, но позволяют сделать вывод о том, что задержки детонации при отражении качественно правильно описываются расчетной зависимостью.

В работе [1] приводятся данные для инициирования смеси ТНМ/НБ 70/30 при однократном и ступенчатом сжатии, полученном отражением волны первичного сжатия от латунной преграды. Исследования проводились емкостным датчиком. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что задержки детонации при отражении качественно описываются предложенными расчетными зависимостями, иллюстрированными на рис. 1.

Вторичное ударное сжатие незначительно поднимает температуру ВВ и по отношению к гомогенному ВВ обладает «ослабленным» инициирующим действием. Это справедливо, если волна предварительного сжатия не нарушает гомогенности исходного ВВ. Если имеются факторы, приводящие к нарушению гомогенности при действии волны предварительного сжатия [7], то волна вторичного сжатия может обладать значительным инициирующим действием.

Поведение гетерогенных ВВ в волнах вторичного сжатия отличается от поведения гомогенного ВВ, так как волна вторичного сжатия идет по структуре гетерогенного ВВ, измененной волной предварительного сжатия. В настоящее время известно, что разложение ВВ начинается в «горячих точках» и зависит, кроме прочих факторов, от их концентрации. Последняя зависит от структуры заряда.

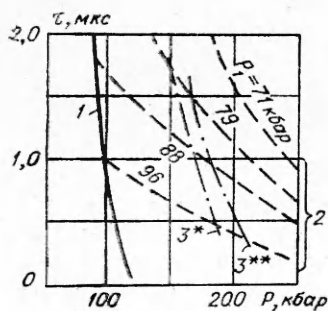


Рис. 1

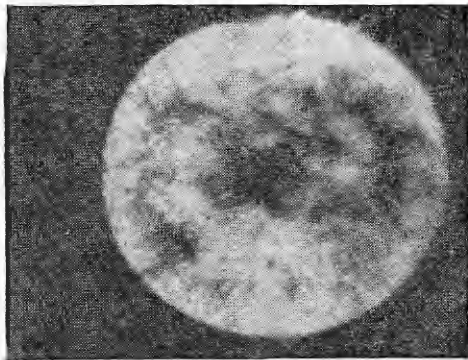


Рис. 2

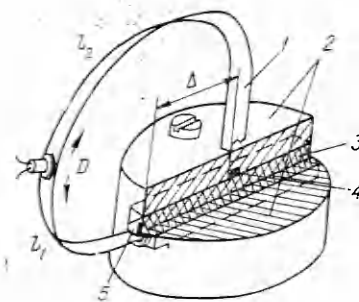


Рис. 3

На рис. 2 представлена фотография поперечного разреза цилиндра литого ТНТ после ударного нагружения импульсом  $\bar{P}_{max} \leq 5$  кбар длительностью  $t \sim 10-20$  мкс (при нагружении ТНТ помещался в дюралевую капсулу). Отливка ТНТ в сечении имела неоднородную исходную структуру. На периферии расположены крупные зерна, вытянутые к центру, охлажденные без ухода, в центре отливки — мелкозернистая зона, полученная уходом и перемешиванием в процессе застывания. Расположение очагов разложения отображает структуру и размер зерен ВВ. В периферийной крупнозернистой зоне концентрация очагов разложения значительно ниже концентрации очагов в мелкозернистой зоне.

В работе [2] приводятся данные по инициированию двух типов отливок ТНТ: крупнозернистых со структурой периферийной зоны плотностью  $1,60$  г/см<sup>3</sup> и мелкозернистой плотностью  $1,62$  г/см<sup>3</sup>. Показано, что ТНТ с мелкозернистой структурой, несмотря на большую плотность, значительно чувствительнее крупнозернистой структуры. Аналогичная зависимость чувствительности от размеров зерна получена в работе [8]. Это различие в чувствительности структур одного и того же ВВ легко объясняется, если предположить, что источник локального разогрева лежит по границам зерен при их сдавливании и относительном перемещении в ударно-нагружаемом заряде. В мелкокристаллической структуре теплоотвод внутрь ВВ (зерна) от источника разогрева ограничен вследствие малых размеров пропреваемого зерна. Значительное влияние теплоотвода от источников разогрева на затухание очагов разложения показано экспериментально для пористых ВВ [9].

В работе [2] отмечается, что под действием ударной волны гетерогенное ВВ изменяет структуру. Таким образом, чувствительность гетерогенного ВВ к вторичному сжатию зависит в значительной степени от того, насколько перестроится структура заряда под действием «предварительного» сжатия. Влияние перестройки структуры ВВ под действием ударной волны оценено в опытах, проведенных по схеме рис. 3 (1 — лента ВВ, 2 — корпус сборки, 3 — литой ТНТ, 4 — инициирующая таблетка, 5 — генератор ударной волны). Схема опыта основана на значительном уменьшении критического диаметра литого ТНТ при его дроблении и изменении структуры. На торце отливки из ТНТ сечением  $10 \times 10$  мм генерируется ударная волна взрывом «генерирующей» таблетки ВВ ( $d=10$  мм,  $\delta=0,6$  мм). На расстоянии 25 мм от торца находится инициирующая таблетка с размерами  $10 \times 5 \times 0,6$  мм. Каждая из таблеток в отдельности не обеспечивает детонации литого ТНТ, поэтому действие таблетки — генератора волны — сводится к дроблению отливки и перестройке в структуру, близкую к прессованному ТНТ. Такая перестройка фиксировалась на удалении 25 мм от торца под инициирующей таблеткой. Если к моменту детонации инициирующей таблет-

| $l_2-l_1$ ,<br>мм | $t_n$ ,<br>мкс | Эффект         |
|-------------------|----------------|----------------|
| 60                | -2,0           | Отказ          |
| 80                | 1,0            | »              |
| 100               | 3,5            | »              |
| 100               | 3,5            | Неполный взрыв |
| 100               | 3,5            | Детонация      |
| 120               | 8,0            | Неполный взрыв |
| 130               | 9,0            | »              |
| 140               | 10,5           | Детонация      |

ки ТНТ имел вид прессованного заряда, то он детонировал, что сопровождалось дроблением сборки и характерным отпечатком на свинцовом свидетеле. Время пребывания ТНТ от момента прихода фронта ударной волны до прихода импульса инициирующей таблетки  $t_n$  изменялось разностью хода детонационных волн ( $l_2-l_1$ ) по ленте ВВ ( $\delta=0,3$  мм)

$$t_n = \frac{2(l_2-l_1)}{D} - t\Delta. \quad (4)$$

В таблице приведена нижняя оценка  $t_n$ , для чего время пробега ударной волны в ТНТ принимается равным  $t_3 = \Delta/c$ , где  $c$  скорость звука. Видно, что перестройка структуры литого ТНТ в условиях опыта имеет порядок 10 мкс. Очевидно, это объясняется перестройкой структуры под действием волны разгрузки.

Во взрывчатых веществах со значительными неоднородностями (пористость) отдельные зерна в ходе ударного сжатия всего образца испытывают сжатие и разгрузку, которая, по всей вероятности, приводит к растрескиванию зерен. В этом случае степень и в особенности время дробления зерна (а следовательно, и изменения структуры образца в целом) определяются размером зерен в исходной структуре.

Таким образом, при ступенчатом сжатии гетерогенного ВВ чувствительность последнего может в определенных случаях превышать чувствительность к однократному сжатию.

Поступила в редакцию  
8/XII 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Летагин, В. С. Соловьев и др. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
3. М. И. Бражник, Л. В. Альтшулер, А. А. Тарасов. ФГВ, 1969, 5, 4.
4. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов. — В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., «Недра», 1967.
5. И. М. Воскобойников и др. ФГВ, 1972, 8, 4.
6. А. В. Дубовик, И. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 2, 4.
7. С. Г. Андреев, В. С. Соловьев. ФГВ, 1972, 8, 1.
8. H. Eyring., D. E. Powell a. o. Chem. Rev; 1949, 45, 69.
9. M. C. Chick. 4-th Symposium (International) on Detonation, Maryland, 1965.

УДК 539.375.5

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО РАСШИРЕНИЯ ТОНКИХ КОЛЕЦ ИЗ ОТОЖЖЕННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

*В. А. Рыжанский, В. Н. Минеев, В. И. Цыпкин,  
А. Г. Иванов, О. А. Клецевников*

(Москва)

В последние годы проводятся многочисленные исследования поведения металлических труб при их взрывном нагружении изнутри. В [1—5] описаны эксперименты, в которых стенки труб расширялись