

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах.— М.: Наука, 1968.
2. Райс М., Мак-Куин Р., Уолш Дж. // Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях.— М.: Мир, 1965.
3. Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е., Кузьменков Е. А. ПМТФ, 1987, 1.
4. Анисичкин В. Ф. ФГВ, 1984, 20, 2.
5. Бушман А. В., Фортон В. Е. УФН, 1983, 40, 2.
6. Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
7. Меньшиков Г. П. ФГВ, 1981, 17, 2, 114.
8. Долгов А. А., Мессинев М. Ю. ПМТФ, 1981, 5, 142.
9. Калиткин Н. Н. Численные методы.— М.: Мир, 1979.

Поступила в редакцию 23/II 1987,  
после доработки — 23/VIII 1988

УДК 620.171.3

## УСТАНОВКИ ВЗРЫВНОГО ТИПА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

*С. А. Новиков, В. А. Петров, В. А. Сушков, В. Н. Хворостин*  
(Москва)

Применение взрывчатых веществ (ВВ) как источника энергии в испытательных установках значительно увеличивает возможности исследований чувствительности материалов и конструкций к действию инерционных перегрузок, позволяя в широких пределах изменять длительность, амплитуду и форму нагружающего импульса. В [1] описана схема нагружения, по которой формируется трапецеидальный импульс давления с заданными параметрами при помощи простейшего взрывного устройства. Оно состоит из последовательно расположенных слоя ВВ, пластины-ударника и упругопластического демпфера, установленных на поверхности объекта испытания.

При подрыве заряда ВВ пластина-ударник практически мгновенно разгоняется до определенной скорости, сжимает демпфер, вследствие чего разгоняется образец с заданным уровнем перегрузки. При выравнивании скоростей ударника и образца нагружение заканчивается и вся разогнанная система плавно тормозится.

Из закона сохранения импульса получается выражение для определения длительности импульса

$$\tau = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta l_d}{Ng(1 - M/m)}}$$

где  $\Delta l_d$  — деформация демпфера;  $N$  — уровень перегрузки образца;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $M$ ,  $m$  — массы образца и ударника соответственно.

При проведении испытаний наиболее важен вопрос об увеличении длительности импульса, так как уровень перегрузки определяется динамической прочностью демпфера и достижение его требуемой величины не проблема. Повышение длительности импульса возможно за счет роста деформации демпфера или массы пластины-ударника. В обоих случаях это приводит к увеличению необходимой массы ВВ, что значительно усложняет испытания в лабораторных условиях, когда требуется локализация продуктов взрыва (ПВ) с помощью специальных камер.

Этих трудностей удается избежать при установке всей системы (нагружающего устройства и образца) в стволе с одним закрытым торцом, как в ударном стенде взрывного типа, описанном в [2]. В этом случае при подрыве заряда ВВ начальный пик давления «срезается» демпфером при распространении по нему УВ и движущаяся система разгоняется в

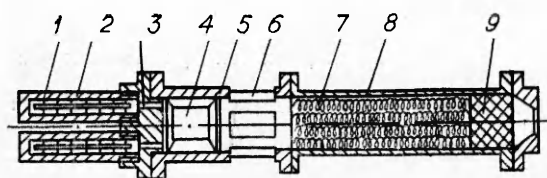


Рис. 1. Схема установки взрывного типа для механических испытаний.

визначення початкового піка тиску деформація демпфера все жє залишається достатньо високою.

Необхідність проведення випробувань со спадаючою во часі перегазкою привела к дальнішому совершенствованию метода взрывного пагруження образца. В настоящей работе приведены результаты разработки и экспериментальной отработки взрывного способа испытаний, использующего для создания испытательной нагрузки только остаточное давление продуктов взрыва заряда ВВ, и представлена расчетно-экспериментальная методика оценки параметров нагружающего импульса.

Ударные стенды, разработанные на основе данного метода (рис. 1), состоят из нескольких взрывных камер 2, разгонного 5, дренажного 6 и тормозного 8 отсеков. Применение многокамерной конструкции стенда позволяет более просто и надежно локализовать взрыв заряда ВВ и получить в камерах высокие уровни остаточного давления ПВ. Требуемая величина начального объема газа создается при этом за счет удлинения камер.

Внутренние полости взрывных камер и разгонного отсека разделены перегородками 3 с дроссельными отверстиями. Степень дросселирования камер  $S_{др}$  (определяемая как отношение суммарной площади поперечных сечений дроссельных отверстий к площади поперечного сечения разгонного отсека) выбирается такой, чтобы при подрыве зарядов ВВ 1 исключалось воздействие на образец 4 начальных пиковых нагрузок. По мере разгона за счет расширения ПВ перегрузка образца уменьшается. После прохождения им дренажного отсека ПВ стравливаются в атмосферу (или специальный ресивер при испытаниях в лабораторных условиях) и процесс пагружения заканчивается. Плавное торможение образца производится за счет неупругого присоединения к нему массы полиэтиленовой стружки 7 и деформации тормозного демпфера 9.

Как видно из описания, этот метод нагружения близок к «пушечно-му». Замена пороха на бризантное ВВ позволяет получать необходимый запас газа с требуемым давлением и прикладывать нагружающее усилие к образцу как практически мгновенно, так и с требуемым фронтом нарастания ее до максимума, что достигается за счет варьирования степенью дросселирования газа. Параметры нагружения можно оценить аналогично рассмотренному во внутренней баллистике [3] случаю мгновенного сгорания пороха и последующему адиабатическому расширению газа по мере движения образца.

Уменьшение давления на нагружаемом торце определяется в основном степенью расширения газа

$$C = (\bar{l}_к + l) / \bar{l}_н,$$

где  $\bar{l}_к$  — приведенная длина взрывной камеры, равная отношению суммарного объема взрывных камер к площади поперечного сечения разгонного отсека;  $l$  — перемещение образца. Зависимость текущего значения нагружающего усилия от перемещения имеет вид

$$P(l) = P_0 / C^k \quad (1)$$

( $P_0$  — начальная величина нагружающего усилия;  $k$  — показатель адиабаты ПВ, величина которого для составов ВВ на основе тэна, согласно [4], составляет  $\sim 1,17$ ).

Интегрированием зависимости (1) одновременно находится аналитическое выражение для скорости образца на выходе из разгонного отсека

$$V = \sqrt{\frac{2P_0 \bar{l}_k \left(1 - \frac{1}{C_{\max}}\right)^{k-1}}{M(k-1)}}$$

$C_{\max}$  — максимальная степень расширения газа в стенде.

Так как аналитической зависимости  $\tau(l)$  для рассмотренного случая расширения газа получить не удастся, то во внутренней баллистике длительность импульса определяется с помощью численных методов, что не совсем удобно при проектировании ударных стендов подобного типа. Для оценки параметров нагружающих импульсов, создаваемых с помощью описанных ударных стендов, необходимо учесть влияние на процесс расширения газа дросселирование его из камер в разгонный отсек, а также потери давления, например за счет утечек газа и его остывания.

Используемая в работе методика оценки параметров импульса базируется на экспериментальном определении зависимостей нагружающего усилия от времени при различных степенях дросселирования газа и подборе близких к ним аналитических зависимостей. Основываясь на последних, находят аналитические выражения для скорости образца на выходе из разгонного отсека и длительности нагружающего импульса. При экспериментальной отработке стендов с помощью пьезоакселерометров типа АП, устанавливаемых на макетах образца, регистрировались зависимости ускорения последнего от времени и по данным электроконтактной методики определялась его скорость на срезе разгонного отсека. Совместное использование этих двух методик давало погрешность определения текущих значений нагружающего усилия не более 10 %.

В опытах варьировались плотность заряжения взрывной камеры  $\rho$  (величина, равная отношению массы заряда ВВ к объему камеры), степень дросселирования газа, масса образца, длина разгонного отсека. Анализ результатов опытов показал, что максимальная величина  $P_0$  зависит в основном от плотности заряжения камеры и степени дросселирования газа.

В интервале  $\rho \approx 10 \div 100 \text{ кг/м}^3$

$$P_0 = \varphi_1 \rho S_p,$$

где  $S_p$  — площадь поперечного сечения разгонного отсека;  $\varphi_1$  — коэффициент пропорциональности, экспериментальная зависимость которого от степени дросселирования газа представлена на рис. 2.

Показано, что пиковые нагрузки, действующие на образец, исчезают при  $S_{др} \leq 0,08$ . Уменьшение степени дросселирования сопровождается повышением длительности фронта нарастания нагрузки,

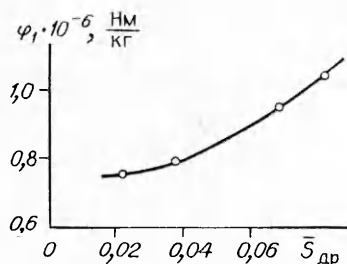


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента  $\varphi_1$  от степени дросселирования газа ( $\rho \approx 90 \text{ кг/м}^3$ ).

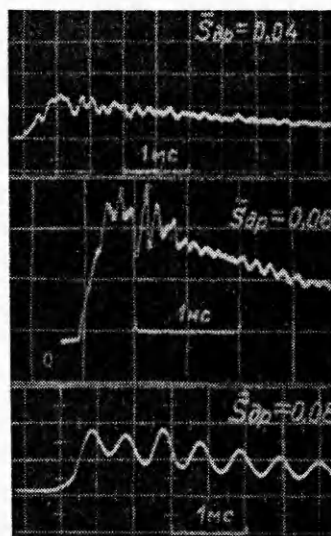


Рис. 3. Типичные осциллограммы зависимостей ускорения образца от времени.

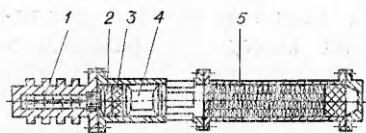


Рис. 4. Схема нагружения образца в установке взрывного типа импульсом перегрузки трапецеидальной формы.

1 — заряд ВВ; 2 — пластина-ударник; 3 — демпфер; 4 — объект испытания; 5 — разгонный отсек.

и при  $S_{др} \approx 0,03$  длительность фронта составляет  $\sim 1$  мс. Типичные осциллограммы зависимостей ускорения от времени приведены на рис. 3.

Для расчета конечного значения нагружающего усилия  $P_\tau$  запишем выражение

$$P_\tau = (1 - \bar{\Pi}) \cdot P_0 / C,$$

$\bar{\Pi}$  — относительная величина потерь силы  $P_\tau$ . По результатам опытов можно сделать вывод, что величина  $\bar{\Pi}$  наиболее существенно зависит от степени герметизации рабочих полостей камер и разгонного отсека, т. е. от утечек газа. С увеличением калибров камер и разгонного отсека коэффициент  $\bar{\Pi}$  уменьшается, что можно объяснить меньшим остыванием газа по мере увеличения диаметра камер. У исследованных стендов калибрами от 40 до 400 мм при длительности импульса до 10 мс  $\bar{\Pi} = 0,2 \div 0,5$ . При этом меньшее значение  $\bar{\Pi}$  у стендов больших калибров, снабженных самоуплотняющимися прокладками в месте подвижного соединения образца и разгонного отсека.

Коэффициент  $\bar{\Pi}$  для каждой конкретной конструкции стенда легко определить путем проведения нескольких тарировочных опытов с измерением фактической величины силы  $P_\tau$ . В исследованном интервале  $C \approx 1,5 \div 5$  экспериментальные зависимости нагружающего усилия от времени и пути близки к гиперболическим, и их можно записать в виде

$$P(t) = P_0 \frac{\tau}{\tau + \alpha t}, \quad (2)$$

$$P(l) = \varphi_2 P_0 \frac{\bar{l}_k}{\bar{l}_k + l}, \quad (3)$$

$$\alpha = (C - \varphi_2) / \varphi_2, \quad \varphi_2 = 1 - \bar{\Pi}.$$

Принимая, что  $P_0$  достигает максимальной величины мгновенно и перемещение корпуса стенда при нагружении отсутствует, интегрируя зависимости (2), (3) по времени и пути, найдем

$$V = \sqrt{\frac{2P_0 \bar{l}_k \varphi_2 \ln C_{\max}}{M}},$$

$$\tau = \frac{C - \varphi_2}{\ln C - \ln \varphi_2} \sqrt{\frac{2M \bar{l}_k \ln C_{\max}}{P_0 \varphi_2}}.$$

Рассчитанные значения  $V$  и  $\tau$  отличаются от опытных не более чем на 10 %.

Стенды описанного типа используются также для испытаний с формированием трапецеидального импульса по схеме рис. 4. Так как в данном случае заряд подрывается вне разгонного отсека, то на поршень не действует начальный пик давления, за счет чего значительно уменьшается деформация демпфера. Длительность импульса при выбранных  $l_p$  и  $m$  рассчитывается совместным решением уравнений движений образца и поршня

$$M \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F_d,$$

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = P(t) - F_d,$$

где  $x_1, x_2$  — текущие перемещения образца и поршня соответственно;  $F_d = NgM$  — усилие сжатия демпфера.

Учитывая, что наибольшая величина  $\tau$  будет при выравнивании скоростей поршня и образца в момент выхода поршня из разгонного отсека, а также принимая, что усилие  $F_d$  достигает постоянного значения мгновенно, можно получить выражения для расчета оптимального значения силы

$$P_0 = Ng(M + m) \frac{C_{\max} \varphi_2}{\varphi_2 (\ln C_{\max} - \ln \varphi_2)}$$

и для получаемых при этом величин  $\Delta l_d, V, \tau$ :

$$\Delta l_d = \left(1 + \frac{M}{m}\right) \left[ \bar{l}_p - \bar{l}_k \frac{(C - \varphi_2) - \ln C_{\max}}{\ln C_{\max} - \ln \varphi_2} \right],$$

$$V = \sqrt{2(l_p - \Delta l_d)Ng},$$

$$\tau = \sqrt{\frac{2(l_p - \Delta l_d)}{Ng}}.$$

Отличие расчетных и опытных значений параметров импульса для данного вида испытаний не превышало 15 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С. А., Синицын В. А., Погорелов А. П. ФГВ, 1980, 16, 6, 111.
2. Новиков С. А., Петров В. А., Багрянов Б. В. Проблемы прочности, 1982, 2, 97.
3. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1962.
4. Лин Э. Э., Сиренко А. В., Фунтиков А. И. ФГВ, 1980, 16, 4, 133.

Поступила в редакцию 23/XI 1987,  
после доработки — 19/IV 1988

УДК 548.23 + 539.89

### О ВОЗНИКНОВЕНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С. С. Бацанов, Е. В. Лазарева  
(Менделеево)

Проблема образования монокристаллов при ударном сжатии порошков представляется чрезвычайно интересной и практически важной. В настоящей работе исследовалось поведение гомогенной смеси тонкорастертого флюорита (в количестве 1—2 %) и графита тайгинского месторождения при динамическом нагружении в цилиндрической ампуле. Выбор объектов исследования обусловлен резким различием цвета компонентов смеси, позволяющим легко определить возможную коагуляцию частиц флюорита.

Эксперимент проводился по схеме скользящей детонации с интенсивностью головной УВ 50 ГПа. После вскрытия ампулы в коаксиальной области (в 10 % случаев) обнаружены белые кристаллы размером ~ 0,1 мм. Однако это не был  $\text{CaF}_2$ , так как кристаллы оптически анизотропны и имели плотность  $\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$  (флюорит изотропен,  $\rho = 3,2 \text{ г/см}^3$ ). Ряд кристаллов оказались столь совершенными, что удалось провести рентгеноструктурный анализ, который обнаружил каркас из  $\text{SiO}_4$ -тетраэдров. ИК-спектры поглощения также указывают на наличие связей Si — O.

Источником кремнезема могут быть примеси в самом графите (5—7 %, по данным анализа). Он мог развиваться также в результате окисле-