

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОГО СЖАТИЯ  
ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

*А. Н. Михайлов, А. Н. Дремин*

Для определения физических параметров металлических порошков при взрывном прессовании необходимо знать их кривые ударной сжимаемости (ударные адиабаты). Обычно применяемые методы определения этих адиабат требуют значительного количества экспериментов, постановка которых осуществляется в условиях плоского нагружения. В настоящей работе предлагается методика, позволяющая получить кривую сжимаемости порошка в условиях, близких к технологии взрывного прессования, и требующая минимального количества экспериментов.

Импульсное рентгенографирование процесса прессования применяется часто при рассмотрении картины сжатия порошка. Обычно для этого регистрируют несколько последовательных стадий процесса сжатия порошка с вставленной в него сеткой из фольги (масштабной сеткой) [1, 2]. Типичная рентгенограмма процесса и ее схема приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Контейнер с порошком 3 сжимается при скользящей детонации слоя<sup>1</sup> ВВ 1. На рентгенограмме видно положение фронта детонации 2, фронта ударной волны в порошке 4 и границы сжатый порошок — продукты взрыва 5. На рисунке показаны также нижняя металлическая подложка 6 и граница сжатый порошок — подложка после отражения ударной волны 7.

Зная скорость детонации, определяемую в том же эксперименте, и считая процесс стационарным, получаем масштаб времени на рентгенограмме, т. е. можем определить скорости перемещения фронтов 4 и 5. Поскольку волна в данном случае косая, то законы сохранения следует писать для нормальных составляющих потока ( $D_n = D_{ВВ} \cdot \sin \gamma$ ). Но при обычно встречающихся углах ( $\gamma \approx 10^\circ$ ) эта составляющая практически не отличается от составляющей, перпендикулярной направлению распространения детонации ( $D_\perp = D_{ВВ} \cdot \text{tg } \gamma$ ), поэтому будем определять именно последнюю.

Экспериментально по рентгенограмме измеряется угол наклона касательной к положению фронта. Расхождение рентгеновских лучей на ширине образца и невозможность установки всех плоскостей строго по оси пучка приводят к размытию границ или фронтов. Экспериментальная ошибка определения скоростей движения границ из-за этого составляет около 5%.

Таким образом, из начального участка картины сжатия имеем скорость ударной волны и массовую скорость порошка (по границе 5), т. е.

<sup>1</sup> Ширина слоя порошка в направлении рентгеновских лучей составляла 10—15 мм при расстоянии от трубки 100 см.



Рис. 1.

можно построить точку на ударной адиабате в координатах  $D$ ,  $u$  и вычислить давление ударного сжатия и степень сжатия порошка. Если отступить от начального участка, то видно, что волна сжатия в слое порошка затухает (фронты изгибаются). Это означает, что здесь сказывается волна разрежения в продуктах взрыва. Из рассмотрения картины сжатия в  $p$ ,  $u$ -координатах следует, что затухание волны отвечает движению точки по кривой сжимаемости в сторону уменьшения давления и массовой скорости. Однако рассчитывать состояние порошка в  $p$ ,  $u$ -координатах по участкам ударной волны, ушедшей от границы раздела, возможно, если есть уверенность в том, что параметры состояния постоянны по сечению порошка от границы фронта ударной волны до границы сжатый порошок — продукт взрыва. В нашем случае, очевидно, так и есть, так как скорость звука в сжатом порошке близка к скорости в компактном металле, т. е. много больше, чем скорость движения ударной волны по порошку.

Таким образом, определяя дальнейшее распространение фронтов 4 и 5, получаем несколько точек ударной адиабаты порошка с все уменьшающимися давлениями и массовыми скоростями. Для проверки правильности принятых допущений была определена ударная адиабата медного порошка пористости  $m=5$ . На рис. 3 точки, обозначенные различными символами, соответствуют различным слоям ВВ (1 — гексоген 10 мм; 2 — аммонит 40 мм,  $\rho_0=1,0$  г/см<sup>3</sup>; 3 — аммонит 40 мм,  $\rho_0=0,8$  г/см<sup>3</sup>; 4 — аммонит 20 мм,  $\rho_0=0,8$  г/см<sup>3</sup>). Кружком обведены значения, полученные по начальным участкам рентгенограмм сжатия, т. е. без принятых допущений. Не обведены точки, полученные по картине затухания волны. С достаточной для оценок давления точностью все точки лежат на одной кривой. Таким образом, можно, используя лишь одну рентгенограмму сжатия толстого слоя порошка, получить большой участок кривой сжимаемости.

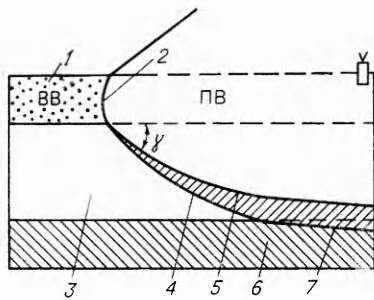


Рис. 2.

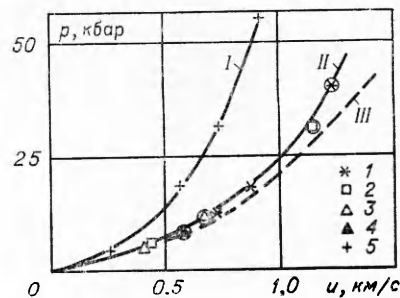


Рис. 3.

В литературе нет ударной адиабаты меди такой пористости и при таких небольших давлениях, что не позволяет сравнить настоящие эксперименты с экспериментами других авторов. Попытки теоретически описать процесс прессования с использованием модели сжимаемой или вязкой сжимаемой жидкости не приводят

Номер строки	Опыт I		Опыт II	
	$p$ , кбар	$u$ , км/с	$p$	$u$
1	7,5	0,51	5	0,40
2	29	0,18	25	0,15
3	32	0,20	21	0,12
4	20	0,13	13	0,08
5	58	0,36	45	0,29

к удовлетворительному результату [3]. Воспользовавшись обстоятельством, что волны здесь слабые, можно рассчитывать ударную адиабату из адиабаты меди, как это предлагается, например, в работе [4]. При низких давлениях член уравнения, описывающий сжимаемость самих металлических частиц, пренебрежимо мал по сравнению с членом, описывающим сжатие воздуха в порах, и им можно пренебречь. На рис. 3 представлены кривые, отвечающие предположениям, что воздух сжимается ударно в 10 раз (кривая II) и что поры смыкаются (III). Видно, что эти кривые расположены близко друг к другу, но первое предположение лучше описывает экспериментальные результаты.

Пренебрежение членом уравнения, описывающим сжимаемость самого металла, позволяет построить адиабату порошка из материала, ударная адиабата монолита которого неизвестна. Так, например, на рис. 3 кривая I — расчет для твердосплавного порошка БК-52, являющегося сложным сплавом семи металлических и неметаллических составляющих. Точки 5 получены экспериментально описанным выше методом.

Та же рентгенограмма (см. рис. 1) позволяет получить параметры отраженной от нижней подложки волны. Скорость распространения границы сжатый порошок — подложка есть массовая скорость в отраженной волне. Эти данные интересно сравнить с кривой сжимаемости меди, чтобы судить, насколько свойства сжатого порошка приближаются к свойствам сплошного металла. Результаты двух экспериментов представлены в таблице, в которой даны параметры падающей на подложку волны в порошке (строка 1) и при отражении (строка 2). Строки 4 и 5 содержат расчетные параметры, полученные по зеркальному отражению адиабаты порошка и адиабаты сплошной меди соответственно. В строке 3 представлены результаты расчета, аналогичного тому, по которому строилась адиабата первого сжатия, но в предположении, что металл не сжимается, а сжимается только воздух, оставшийся в порах после первого сжатия. Следует иметь в виду, что этот расчет тем более верен, чем толще слой сжатого порошка (чтобы не сказался эффект многократного отражения). Результаты, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что последний расчет дает наиболее близкие к эксперименту значения.

Отделение ИХФ АН СССР,  
Черноголовка

Поступила в редакцию  
25/ XII 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 4, 568.
2. А. А. Дерибас, А. В. Крупин и др. ФГВ, 1973, 9, 6, 883.
3. Г. Е. Кузьмин, А. М. Ставер. ФГВ, 1973, 9, 6, 898.
4. Г. С. Дорониц, В. П. Ступников. Изв. СО АН СССР, сер. техн. наук, 1970, 3, 1.