

объяснимо, так как стекло при импульсных нагрузках разрушается хрупким образом — путем возникновения и раскрытия хрупких трещин, образующихся при достаточно низких значениях величин сдвиговых напряжений. Очевидно, во всех проведенных опытах интенсивность ударных волн, распространяющихся по частице, обеспечивает уровень напряжений, необходимый для ее разрушения.

Во-вторых, в описываемых опытах не наблюдалось кольцевой структуры поражения, характерной для удара металлических частиц. Это отличие становится понятным, если вспомнить, что разрушение стальных частиц происходит, когда материал находится в пластическом состоянии. Само разрушение вызывается действием растягивающих напряжений, создаваемых волнами разгрузки, которые, естественно, приходят в конкретное сечение в первую очередь с боковой поверхности деформированной частицы. Таким образом, можно предположить, что кольцевой характер разрушения стальных частиц связан с последовательными отколами ее внешних слоев. В то же время частица из стекла к моменту ее разрушения находится в упругом состоянии, а ее разрушение происходит посредством распространения волны хрупкого разрушения, приблизительно равномерно дробящей частицу.

При $v_0 = 10 \div 12$ км/с в случае стальных частиц на мишени наблюдается ряд более глубоких, по сравнению с остальными, каверн, расположенных почти точно по окружности. Они образуются осколками экрана, появление которых связано с краевыми эффектами при его разрушении. В опытах с частицами из стекла этого не наблюдается, поскольку уровень скоростей частиц, а тем более — реализующихся в экране напряжений в этом случае значительно ниже. Таким образом, при достаточно больших s_1 поражение мишени, защищенной экраном, при ударе хрупких частиц характеризуется полем каверн, близким к равномерному.

В [1] предложена приближенная методика расчета параметров экранной защиты по заданной метеоритной модели и требуемому уровню надежности. Проведенные исследования показывают, что в случае каменных метеоритов, моделируемых в поставленных опытах частицами из стекла, она может применяться только в случае ее существенной коррекции в соответствии с полученными данными.

Авторы выражают благодарность В. П. Урушкину за совместное проведение экспериментов с частицами из стекла.

*Поступила в редакцию
10/IV 1979*

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1977, 2.
2. В. П. Урушкин, Н. Н. Горшков, В. М. Титов. ФГВ, 1977, 13, 3.
3. В. М. Титов, Ю. И. Фадеев. Космические исследования, 1972, 10, 4.
4. А. П. Аникиева, Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1977, 3.
5. C. J. Maiden, A. R. McMillan. AIAA J., 1964, 2, 11.
6. Высокоскоростные ударные явления. М., «Мир», 1973.
7. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1975, 5.

К УДАРНОМУ СЖАТИЮ ПОРИСТЫХ ТЕЛ

В. Ф. Анисичкин

(Новосибирск)

Взрывное прессование порошков позволяет создавать новые материалы с полезными свойствами, в том числе такие, которые нельзя получить другими способами. Качество прессовок зависит от начальной

плотности порошка, способа его приготовления, геометрии и амплитуды ударной волны (УВ) и т. д. [1—6]. Ударные адиабаты пористых тел используются при построении уравнений состояния веществ при высоких давлениях и температурах [7—10]. Вещества с малой начальной плотностью, в том числе пористые, перспективны при создании высокоскоростных газовых потоков [11]. Важно свойство пористых веществ даже в небольших количествах заметно ослаблять воздействие УВ [8]. Успешное решение перечисленных задач требует достаточно полного понимания процесса ударного сжатия пористого тела.

Вопрос об ударных адиабатах пористых веществ рассмотрен в [12]. Считая коэффициент Грюнайзена Γ постоянным и термодинамическое равновесие за фронтом УВ установившимся, удалось описать аномальный ход ударной адиабаты при плотности, близкой к нормальной. Однако такое объяснение нельзя считать удовлетворительным, так как ход ударной адиабаты пористого вещества зависит не только от абсолютного значения Γ_0 , но и от характера его изменения с плотностью и температурой.

В [13] аномальный ход ударных адиабат объяснялся своеобразным изменением эффективного коэффициента Грюнайзена в основном за счет электронной теплоемкости. В [9, 14—17] учитывается тепловое давление электронов и строится уравнение состояния с использованием экспериментальных ударных адиабат пористых тел. Но в [18] показано, что вклад электронов в полное давление при ударном сжатии невелик.

Последние экспериментальные работы приводят к выводу, что термодинамическое равновесие за фронтом УВ не устанавливается и на процесс ударного сжатия влияют поры, что, возможно, является причиной своеобразного поведения ударных адиабат пористых тел. Отметим некоторые из этих работ. В [19] обнаружена зависимость плотности пресовок от количества содержащегося в порах воздуха. В [2] экспериментально найдены ударные адиабаты пористых Cu , Fe , W с очищенными порами и порами, содержащими различные неконтролируемые включения. Ход адиабат таких веществ существенно отличается. В [20] показано, что результаты экспериментов по ударному сжатию пористых стекла, окиси магния и мрамора нельзя объяснить, считая термодинамическое равновесие за фронтом УВ установившимся; указывается на возможность неполного схлопывания пор, заполненных газом, даже при высоких давлениях. В [21, 22] отмечается существенное влияние воздуха, сжимаемого вместе с порами, на процесс ударно-волнового сжатия. В [23, 24] однозначно показано, что пористые вещества при ударном сжатии ведут себя качественно иначе, чем сплошные. В свете этих данных представляется невозможным построение точных уравнений состояния веществ с использованием ударных адиабат пористых тел.

В [22, 25, 26] по методу смесей получено хорошее согласие расчетов с экспериментальными ударными адиабатами ряда сильно пористых веществ в предположении конечной ударной сжимаемости воздуха в порах. Но при этом степень сжатия пор при прохождении УВ трудно оценить независимо и приходится считать такой, чтобы описать эксперимент.

Для оценки влияния пор на ударное сжатие вещества воспользуемся полученным в [27, 28] соотношением, связывающим ударные адиабаты и нулевые изотермы веществ,

$$p_{\Gamma}/p_x = V_0/V, \quad (1)$$

где p_{Γ} — давление за фронтом УВ; p_x — потенциальная часть давления; V_0 — начальный удельный объем вещества; V — удельный объем вещества за фронтом УВ. Поскольку (1), согласно его выводу, применимо и к веществам с начальным объемом V_{00} , большим нормального, достаточно, чтобы начальная внутренняя энергия и давление были малы, то

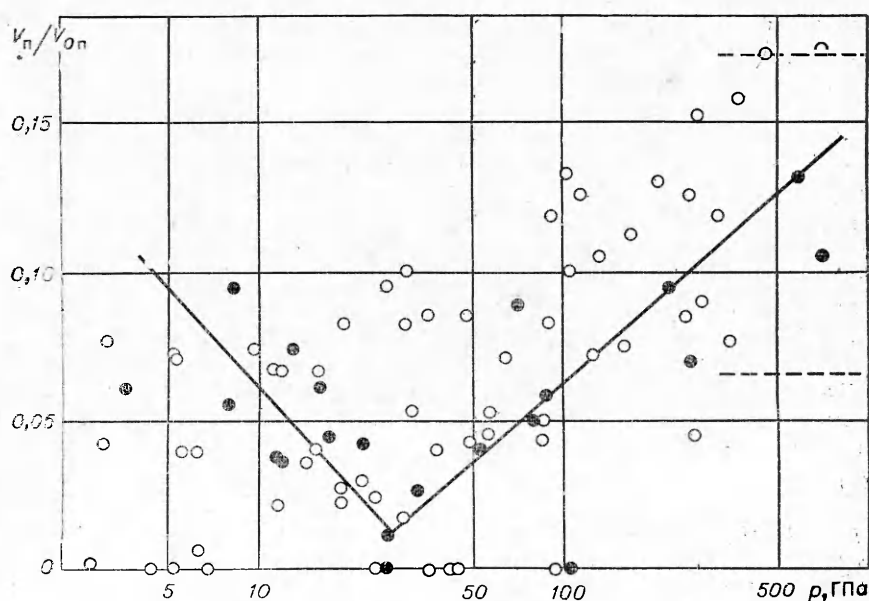
ударные адиабаты сплошного и пористого тел будут связаны уравнением

$$p_{\Gamma}/p_{\Pi} = V_0/V_{00} \quad (2)$$

при равных плотностях за фронтом УВ. Соотношение (2) справедливо, если не учитывать влияние пор и их содержимого на ход ударных адиабат. Однако соотношение (2), несмотря на его точность, не приводит к аномальному ходу ударных адиабат.

С помощью (2) и известных ударных адиабат сплошных веществ рассчитаны адиабаты пористых тел и сравнены с соответствующими экспериментальными данными [5, 7, 13, 16, 29, 31] для Fe, Cu, Ni, Pb, W с различными начальными пористостями. Основной причиной расхождения расчета (2) и экспериментальных данных считалось неполное схлопывание пор из-за заполняющих их газообразных продуктов.

Подробно ударное сжатие смесей и пористых материалов рассматривалось в [31]. Ниже, чтобы найти объем газа, заполняющего поры за фронтом УВ, используется правило аддитивности, при выполнении которого объем смеси равен сумме объемов компонентов при сжатии каждого из компонентов до одного и того же давления. На рисунке приведена найденная таким способом степень сжатия пор $V_{\Pi}/V_{0\Pi}$ в зависимости от давления за фронтом УВ. Такую своеобразную зависимость сжимаемости газа, заполняющего поры, от мощности УВ можно объяснить следующим образом. При не очень больших давлениях по пористому веществу кроме основной волны сжатия распространяются 1—2 предвестника с амплитудой порядка нескольких сотен паскаль [1, 2, 8, 29, 31, 32]. Следовательно, газ в порах сжимается почти предельно в двух-трех волнах, а пористое вещество уплотняется почти до монолита [31, 33]. При большей мощности УВ основной скачок давления догоняет предвестник, крутизна фронта возрастает, а его ширина уменьшается, сжатие становится существенно неизэнтропическим. В этом случае газ, заполняющий поры, сжимается почти предельно в одной УВ в 6 ÷ 15 раз [34] (штриховые линии на рисунке) и результирующая степень сжатия пор уменьшается. Этим объясняется аномальный ход ударных адиабат, когда плотность вещества падает с повышением давления в УВ. Подобным образом ведет себя и конечная плотность прессовок [4].



Зависимость степени сжатия пор от давления.

Возможность неполной прессовки вещества при высоких давлениях отмечается также в [35, 36].

Данные, приведенные на рисунке, сильно отклоняются от средней кривой. Кроме возможных экспериментальных ошибок это объясняется следующими причинами: в различных материалах давления, при которых предвестники сливаются с основным скачком давления, неодинаковы, поэтому не совпадают и давления, при которых достигается максимальное уплотнение за фронтом УВ, что отмечено в [5]. Кроме того, ширина фронта УВ меняется в зависимости от давления в ней [36], прочности и размера частиц [3, 16, 37], что также приводит к изменению степени сжатия пор. При большой пористости заметного по амплитуде предвестника может не быть. Вследствие этих причин выраженный максимум плотности на ударных адиабатах пористого вещества может отсутствовать вообще.

Для выделения описанных явлений в чистом виде были отобраны данные разных авторов по ударной сжимаемости меди одинаковой начальной пористости $m \sim 1,5$. На рисунке они показаны темными точками, которые хорошо ложатся на одну кривую. При малых давлениях по порошку распространяются предвестник и основной скачок, но поры сжимаются мало, так как еще существенна прочность частиц меди. При давлении около 20 ГПа ширина фронта УВ еще достаточно велика, а амплитуда мала, чтобы газ в порах успел сжаться многократно, почти изэнтропически. Порошок уплотняется максимально. При более высоких давлениях и, следовательно, меньшей ширине фронта УВ сжатие газа все более приближается к однократному ударному и объем пор увеличивается, т. е. налицо аномальное поведение ударных адиабат пористой меди.

В целом предложенная модель удовлетворительно описывает особенности ударного сжатия порошков. В частности, становится понятно, почему при взрывном обжатии цилиндрических пористых образцов по оси прессовки часто появляется полость [21]. Поскольку по оси образца давление в УВ выше, то степень сжатия порошка при определенном соотношении давлений на оси и на поверхности в центре может быть меньшей, чем у границ.

Соотношение (2) в принципе позволяет с учетом конечной сжимаемости пор, зависящей от давления, рассчитывать ударные адиабаты пористых тел при больших амплитудах УВ. Можно предположить, что (2) будет точно описывать ударное сжатие вакуумированного пористого тела, но здесь появляется следующая трудность. При малых давлениях существенны прочность частиц и динамика схлопывания пор [8, 33, 35, 36], что ограничивает применение (2). При больших же амплитудах УВ, как показано, например, в [38—40], поверхность частиц интенсивно нагревается и испаряется, причем пары вещества могут двигаться со скоростью гораздо большей скорости УВ, заполняя поры до прихода ударного фронта. Поэтому в отличие от малых и средних давлений при высоких давлениях ударные адиабаты вакуумированных и невакуумированных пористых веществ, видимо, будут мало отличаться.

Таким образом, результаты настоящей работы объясняют аномальный ход и позволяют приближенно рассчитывать ударные адиабаты пористых веществ с учетом включений в поры.

Автор признателен В. М. Титову за полезные обсуждения.

*Поступила в редакцию
11/1 1979*

ЛИТЕРАТУРА

1. R. R. Boade. Proc. Seventeenth Sagamore Army Materials Research Conference, Syracuse University Press, 1970.
2. Ronald K. Linde, Lynn Seaman, David N. Schmidt. J. Appl. Phys., 1972, 43, 8.

3. Roif A. Pruemmer. Proc. Fourth International Conference of the Center for High Energy Forming, Vail, Colorado, 1973.
4. H. Thomas McClelland, Henry E. Otto. Proc. Fourth International Conference of the Center for High Energy Forming, Vail, Colorado, 1973.
5. А. А. Баканова, И. П. Дудолоадов, Ю. Н. Сутулов. ПМТФ, 1974, 2.
6. Э. С. Антрощенко. Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976.
7. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др. ЖЭТФ, 1958, 34, 4.
8. W. Hergmann. J. Appl. Phys., 1969, 40, 6.
9. Robert J. Naumann. J. Appl. Phys., 1971, 42, 12.
10. А. А. Баканова, В. Н. Зубарев и др. ЖЭТФ, 1975, 68, 3.
11. В. М. Титов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 7. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1971.
12. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
13. К. К. Крупников, М. И. Бражник, В. П. Крупникова. ЖЭТФ, 1962, 42, 3.
14. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 4.
15. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, Р. Ф. Трунин. ЖЭТФ, 1962, 42, 1.
16. С. Б. Кормер, А. И. Фунтиков и др. ЖЭТФ, 1962, 42, 3.
17. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1970, 38, 3.
18. A. K. McManis. Bull. Americ. Phys. Soc., 1976, 21, 11.
19. А. Н. Михайлов, А. Ф. Беликова. Proc. III Symposium. Explosive Working of Metals, Mariánské, Lázně, 1976.
20. В. С. Трофимов, Г. А. Ададулов и др. ФГВ, 1968, 4, 2.
21. Е. Я. Куцовский, А. М. Ставер. ФГВ, 1975, 11, 3.
22. А. Н. Михайлов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1977, 13, 1.
23. Л. Г. Болховитинов. Докл. I Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1974.
24. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя и др. Докл. АН СССР, 1977, 236, 1.
25. Г. С. Доронин, В. П. Ступников. Изв. СО АН СССР, сер. техн. н., 1970, 3, 1.
26. Ю. Л. Алексеев, В. П. Ратников, А. П. Рыбаков. ПМТФ, 1972, 1.
27. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 2.
28. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 6.
29. R. R. Voade. J. Appl. Phys., 1968, 39, 12.
30. R. R. Voade. J. Appl. Phys., 1969, 40, 9.
31. Г. А. Богачев, В. Н. Николаевский. Механика жидкости и газа, 1976, 4.
32. L. Seaman. Proc. Seventeenth Sagamore Army Materials Research Conference, Syracuse University Press, 1970.
33. В. М. Butcher, M. H. Carroll, A. C. Holt. J. Appl. Phys., 1974, 45, 9.
34. A. F. Ghoniem, M. I. Rashed, A. K. Oppenheim. Acta Astronautica, 1977, 4, 3—4.
35. P. C. Lysne. J. Appl. Phys., 1970, 41, 1.
36. В. М. Butcher. Proc. Seventeenth Sagamore Army Materials Research Conference, Syracuse University Press, 1970.
37. M. M. Carroll, A. C. Holt. J. Appl. Phys., 1972, 43, 4.
38. Г. В. Беляков, В. Н. Родионов, В. П. Самосадный. ФГВ, 1977, 13, 4.
39. Г. В. Беляков. Докл. АН СССР, 1974, 218, 5.
40. Г. В. Беляков, В. Н. Родионов. Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976.

**ВЗРЫВНАЯ КАМЕРА ДЛЯ РАБОТЫ
СО ВЗРЫВОМАГНИТНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ
И ВЗРЫВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПЛАЗМЫ**

*А. Е. Войтенко, А. Ф. Демчук, В. П. Исаков
(Новосибирск)*

Наиболее мощным и относительно доступным первичным источником энергии в экспериментальной практике является заряд взрывчатого вещества. Использование этого источника долгое время сдерживалось отсутствием простых и надежных средств защиты от поражающих факторов взрыва: ударной волны, осколков, токсичных продуктов детонации и др. В настоящее время после создания методов расчета