

А.Е. Бузюркин

Исследование оптимальных условий взрывного нагружения металлических порошков в ампулах сохранения

А.Е. Buzyurkin

Investigation of Optimal Conditions for Explosive Loading of Metal Powders in Conservation Ampoules

Проведено численное моделирование распространения ударных волн и деформирования экспериментальной сборки при взрывном компактировании металлических порошков. Показаны особенности взаимодействия косых ударных волн в осесимметричном случае.

Ключевые слова: ударные адиабаты, уравнение состояния, ударные волны в пористом теле.

Numerical simulation of shock wave diffusion and experimental assembly deformation has been performed in a process of metal powder blasting. The paper shows specific features of the oblique shock waves interaction in the axe-symmetric case.

Key words: percussion adiabats, state equation, shock waves, porous media.

Введение. Проблема изучения характера взаимодействия косых ударных волн в пористых материалах и порошках является актуальной в смысле выбора оптимальных условий нагружения исследуемого образца для получения компакта с однородными физико-механическими свойствами. При компактировании порошка в цилиндрической схеме возникает нерегулярное взаимодействие ударных волн. При этом в скомпактированном порошке имеет место значительная неоднородность в смещениях, приводящая к неравномерному распределению параметров, а также происходит разрушение образца.

В работах В.Ф. Нестеренко [1] был предложен критерий образования прочного компакта

$$P > 2H_v, \quad (1)$$

где, согласно [1], $H_v \approx 3Y_s$.

Критерий (1), полученный из анализа экспериментальных данных, по [1], может быть записан в виде

$$P > 6Y_s. \quad (2)$$

В свою очередь, Р. Прюммер [2] в качестве условия получения однородной, по своим свойствам, цилиндрической прессовки без особенностей в центре за счет маховского отражения использует условие $P \approx H_v$, где P – давление детонации. Сравнивая условие (1) с условием $P \approx H_v$, автор [1] приходит к выводу о невозможности получения в цилиндрической схеме нагружения без центрального стержня однородного компакта. Давление в ударной волне, необходимое для получения прочного компакта (2),

всегда будет приводить к маховскому отражению в центре.

Другой важной проблемой является сохранение готового компакта после нагружения. С приходом волн разгрузки возникают растягивающие напряжения, приводящие к частичному или полному разрушению образца. В качестве критерия разрушения возьмем превышение максимального растягивающего напряжения σ_{max} некоторого критического значения σ_* . В соответствии с принятой гипотезой должно соблюдаться следующее условие разрушения:

$$\sigma_{max} > \sigma_*, \quad (3)$$

где σ_{max} – величина наибольшего из главных напряжений для исследуемого напряженного состояния; σ_* – предельное напряжение.

Величина σ_* в данной работе оценивается по формуле

$$\sigma_* = (2/3)Y_s \ln(1/m_1),$$

где m_1 – остаточная пористость. Если принять, что плотность готового компакта составляет 99%, тогда $m_1 = 0,01$ и $\sigma_* \approx 3Y_s$.

Результаты расчетов и обсуждение. Для того чтобы исследовать влияние режимов нагружения, а в частности, изучить влияние скорости детонации, толщины слоя взрывчатого вещества и величины давления продуктов взрыва на свойства исследуемого образца, была численно решена задача о компактировании порошка в осесимметричном случае. Постановка задачи приведена на рисунке 1. Решалась полная система уравнений дефор-

мирования пористого упруго-пластического материала [3]. Действие продуктов взрыва на порошок моделировалось давлением, приложенным к верхней границе. Величина давления определялась из формулы, аппроксимирующей поведение давления при разлете продуктов детонации [4]. На нижней границе ставилось условие жесткой стенки, а правая граница была свободна от напряжений. На левой границе рассматривалось условие жесткой стенки.

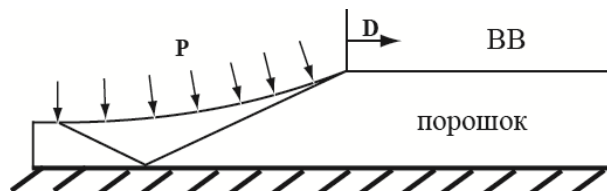


Рис. 1. Постановка задачи

Расчеты проводились по схеме М. Уилкинса [5] для пористого алюминия различной начальной пористости. Ударная волна распространялась слева направо.

Используя критерий разрушения (3), можно определить границу сплошного и разрушенного материала. Области скомпактированного материала и разрушенной части для различных толщин заряда взрывчатого вещества при значениях величины внешнего давления приведены на рисунке 2. Из анализа представленных графиков видно, что увеличение толщины заряда взрывчатого вещества и, следовательно, увеличение времени спада нагрузки не приводит к существенному уменьшению разрушенной зоны.

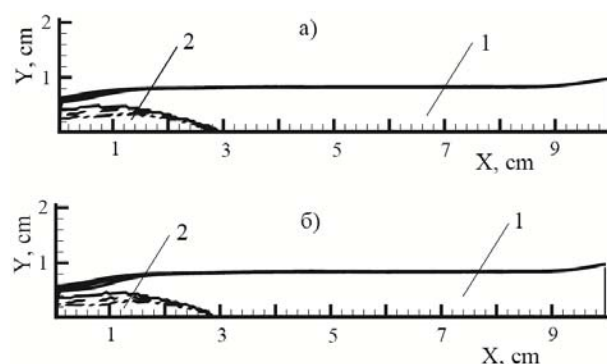


Рис. 2. Области скомпактированного материала и разрушенной части для различных толщин заряда взрывчатого вещества при значениях величины внешнего давления $P = 0,05$ Мбар (а) и $P = 0,075$ Мбар (б). Скорость детонации $D = 0,5$ см/мкс. Сплошная линия соответствует толщине заряда $\delta_e = 2$ см; штриховая линия – толщине $\delta_e = 3$ см; штрихпунктирная – $\delta_e = 5$ см.

Цифрой 1 отмечена область скомпактированного материала, цифрой 2 – область разрушения

Рисунок 3 демонстрирует влияние величины приложенного давления на размер области

разрушения. Как видно из рисунка, увеличение внешней нагрузки не приводит к уменьшению зоны разрушения. Таким образом, можно отметить, что в результате увеличения времени спада давления, приложенного к образцу при увеличении толщины заряда взрывчатого вещества, или значения внешней нагрузки не происходит уменьшение размеров разрушенной зоны при фиксированных скоростях распространения детонационной волны.

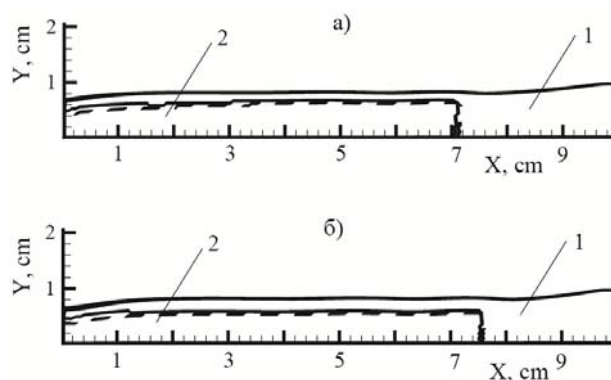


Рис. 3. Области скомпактированного материала и разрушенной части для различных значений величины внешнего давления $P = 0,05$ Мбар (а) и $P = 0,075$ Мбар (б). Скорость детонации $D = 0,7$ см/мкс. Сплошная линия соответствует толщине заряда $\delta_e = 3$ см; штриховая – $\delta_e = 5$ см

Уменьшение скорости детонационной волны приводит к существенному сокращению объема зоны разрушения. На рисунке 4 показаны скомпактированные и разрушенные области в образце для различных значений скорости детонации при фиксированных значениях толщины заряда и величины внешнего давления.

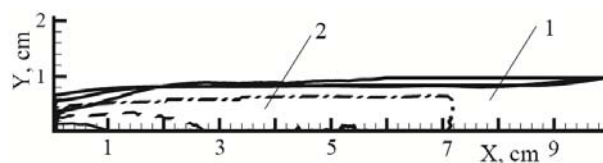


Рис. 4. Области скомпактированного (цифра 1) материала и разрушенной части (цифра 2) для различных значений скорости детонации. Сплошная линия соответствует скорости детонации $D = 0,3$ см/мкс; штриховая – $D = 0,5$ см/мкс; штрихпунктирная – $D = 0,7$ см/мкс

Поскольку в случае цилиндрической симметрии происходит нерегулярное отражение, то в результате образуются неоднородности свойств материала. На рисунке 5 приведено распределение температуры T по толщине образца в скомпактированной области для значения скорости детонации $D = 0,5$ см/мкс. Из графиков видно, что наблюдается значительная неоднородность в распределении параметров. Вблизи оси образца скорость и температура имеют большие значения, чем на некотором удалении от оси.

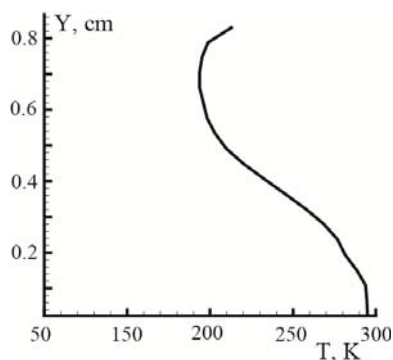


Рис. 5. Распределение температуры T по толщине образца в компактированной области для значения скорости детонации $D = 0,5$ см/мкс

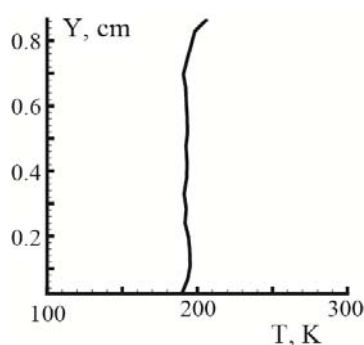


Рис. 6. Распределение температуры T по толщине образца в компактированной области для значения скорости детонации $D = 0,3$ см/мкс

На рисунке 6 показано распределение температуры T по толщине образца в компактированной области для значения скорости детонации $D = 0,3$ см/мкс. Здесь, при тех же параметрах нагружения, наблюдается равномерное распределение параметров готового образца.

В результате оказывается возможным получение компактированных порошков с однородным распределением параметров компакта. Необходимым условием для этого является достаточно малая скорость детонации, равная для алюминиевого порошка $D = 0,3$ см/мкс. При этом, с одной стороны, должно быть выполнено условие компактирования (1), а с другой – обеспечена однородность параметров нагружения по толщине.

Заключение. Таким образом, компактирование порошков с малыми скоростями детонации приводит к существенному уменьшению зон разрушения в готовых образцах и равномерному распределению параметров материала в компактированной части.

В результате проведенного анализа показано, что увеличение времени спада давления, приложенного к образцу при увеличении толщины заряда взрывчатого вещества, или возрастание значения внешней нагрузки не приводит к уменьшению размеров разрушенной зоны при фиксированных скоростях распространения детонационной волны. В то же время при уменьшении скорости распространения детонационной волны размер области разрушения существенно снижается.

Библиографический список

1. Нестеренко В.Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. – Новосибирск, 1992.
2. Prümmer R. Powder compaction // Explosive welding, forming and compaction / Ed. T.Z. Blazinsky. – London; New York, 1983.
3. Киселев С.П., Фомин В.М. О модели пористого материала с учетом пластической зоны, возникающей в окрестности поры // ПМТФ. – 1993. – №6.
4. Пай В.В., Кузьмин Г.Е., Яковлев И.В. Приближенная оценка параметров нагружения в композиционных материалах для случая сильных ударных волн // ФГВ. – 1995. – Т. 31, №3.
5. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М, 1967.