

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОРОШКА НА ПРОЦЕСС ВЗРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ

*О. В. Роман, В. Ф. Нестеренко,
И. М. Пикус*

(Минск)

Взрывное прессование успешно применяется для изготовления изделий из порошковых материалов [1]. Однако до настоящего времени нет единого представления, какие физические явления определяют процесс взрывного формирования и его оптимальный характер. Давление нагружения — не единственный параметр, определяющий качество прессовок. Существенную роль играют степень сжатия, история процесса прессования и временные характеристики волн сжатия и разрежения. Проведенные исследования по ударному нагружению пористых тел позволили выделить явления, анализ которых с точки зрения термодинамики ударного сжатия побудил к проведению экспериментов по изучению влияния размера частиц на процесс ударного сжатия.

Динамические измерения [2, 3] показали, что для пористых тел (медь и песок) с одинаковой исходной плотностью, но с размерами частиц от 10 мкм до 1 мм ударные адиабаты близки друг к другу. В то же время величина неравновесной температуры контактов частиц существенно зависит от размера фракции при одинаковых условиях нагружения и начальной плотности [4]. Аналогичный результат получен в [5] с использованием другой методики. В [4] также высказано предположение, что наблюдаемая разница в поведении пористых тел с разным гранулометрическим составом может быть причиной их различных механических свойств после взрывной обработки. Размер фракции компонентов играет также важную роль и при ударном сжатии пористых многокомпонентных систем, в частности, он определяет распределение энергии между компонентами, что весьма существенно для протекания в таких смесях фазовых переходов, детонации смесевых взрывчатых веществ, получения качественных прессовок из этих материалов. В [6] показано, что характер ударного нагружения пористых тел не описывается слоистой моделью. Неравновесный характер выделения тепла при ударном сжатии может быть ответственным за протекание в пористой среде химических превращений [7] и поведение их ударных адиабат [8].

Предстоит определить, как указанные явления влияют на процесс взрывного формирования материала из порошков, представляющих технологический интерес и имеющих различные механические свойства. Анализ качества образцов вольфрама, полученных из порошка со средним размером частиц 5÷10 мкм и гранул со средним размером 1÷2 мм, показал, что образцы из гранул обладают более высокой технологической прочностью, нежели образцы, полученные из дисперсных порошков.

В качестве материалов для исследования использовались порошки и гранулы из вольфрама и фторопласта. Выбор этих материалов не случаен, так как вольфрам обладает очень низкой пластичностью, а фторопласт, наоборот, весьма пластичен. Это позволяет достаточно наглядно оценить влияние термодинамической неравновесности на эффекты пластического течения в разном диапазоне пластических свойств материала частиц. Следует отметить, что гранулы вольфрама — это пористые шарики, которые хрупко разрушались при статической нагрузке порядка 100 Н на фрагменты с размерами 10÷100 мкм.

Для сравнения динамического поведения порошков с разным гранулометрическим составом проведены измерения динамических парамет-

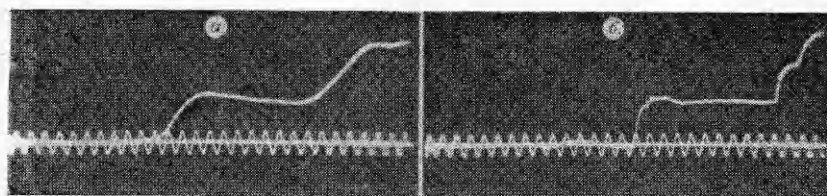


Рис. 1. Типичные осциллограммы регистрации динамических параметров ударной волны; частота калибровочных импульсов 1 МГц.
а) гранулированный порошок; б) дисперсный порошок.

ров с помощью электромагнитной методики [9]. Для предотвращения шунтирования измеряемой ЭДС материалом образца (при измерениях в пористом вольфраме) датчики, изготовленные из алюминиевой фольги толщиной 80 мкм, покрывались с двух сторон пленкой фторопласта толщиной 40 мкм. В опытах измерялась волновая и массовая скорости. Применение электромагнитной методики, даже с изолированным от образца датчиком, требует основания, так как движение проводящего материала в магнитном поле, параллельном плоскости фронта, приводит к появлению ЭДС в схеме электромагнитного датчика [10].

В [10] показано, что в образцах пористой меди массовая скорость, измеренная по этой методике, хорошо согласуется с данными [11], по крайней мере на фронте ударной волны. Максимальное различие в результатах, полученных с помощью этого метода и обычных методик, для пористой меди составляло 20% в диапазоне до 12 ГПа. При давлениях до 4 ГПа различие не превышало 10%. Поэтому, если не требуется высокая точность измерений, данная методика может быть применена для исследования ударных волн в проводящих пористых образцах.

Нагружение образцов осуществлялось зарядами из аммонита и смеси аммонита с хлористым натрием в массовом отношении 1:3 и 1:1. Размер зарядов — диаметр 70 и высота 70 мм. Для инициирования использовался генератор плоской волны ТГ 50/50+гексоген массой 100 г. Между ВВ и порошком прокладывался слой фторопласта толщиной 4 мм. Измерительная фольга имела размер 10×15 мм, что обеспечивало определение скорости, усредненной примерно по 100 частицам.

Типичные осциллограммы приведены на рис. 1, а, б. Рис. 1, а соответствует ударному сжатию вольфрама с фракцией 1÷2 мм. Нагружение осуществлялось смесью аммонита и соли (1:3). Данные по динамическим измерениям сведены в таблицу. Из-за большого времени нарастания (3÷4 мкс) массовой скорости в ударной волне до максимума (рис. 1а) в порошке из гранул и сравнительно малых без измерений (4 мм) определение величины скорости ударной волны не достаточно

ВВ	Материал образца	Массовая скорость, м/с	Давление, ГПа	Скорость ударной волны, м/с
Аммонит	Гранулы	575±40	—	—
	Мелкая фракция	800±70	4,8±0,3	1100±115
Аммонит +NaCl (1:1)	Гранулы	362±68	—	—
	Мелкая фракция	436±70	1,4±0,1	605±50
Аммонит +NaCl (1:3)	Гранулы	256±16	—	—
	Мелкая фракция	260±20	0,52±0,05	374±10

точно. По этим же причинам неясно, выходит ли на исследованном расстоянии от ВВ (6 мм) ударная волна в гранулах на стационарный режим. Поэтому для гранул приведены только значения массовых скоростей на фронте. При одинаковых параметрах за фронтом структура фронта у гранул и порошка существенно различна. У крупнозернистого порошка ясно виден предвестник, связанный, по-видимому, с распространением упругих возмущений по каркасу из гранул. Для мелкозернистого порошка характерен более крутой передний фронт ударной волны (рис. 1, б). С ростом давлений ширина фронтов массовой скорости уменьшалась.

Результат динамических экспериментов свидетельствует о том, что ударная адиабата гранул близка к ударной адиабате порошка, что согласуется с данными [2, 3]. Ударная адиабата вольфрама мелкой фракции близка к найденной в [11]. Обращает на себя внимание разница значений массовой скорости в порошке из гранул и в мелкодисперсном порошке в случае нагружения аммонитом (см. таблицу). Однако по причинам, отмеченным выше, интерпретировать эту разницу трудно. Не исключено, что она связана с разницей в адиабатах порошков различных гранулометрических составов.

Из полученных данных можно сделать вывод: при одинаковой начальной пористости образца полная внутренняя энергия в мелкодисперсном материале не меньше, чем в гранулированном. Исходя из этого, следовало ожидать, что в мелкодисперсном порошке должны создаваться одинаковые или даже более благоприятные условия для разогрева и пластического течения материала порошка. Однако практические результаты свидетельствуют об обратном. Как показал металлографический анализ (рис. 2), при ударном сжатии гранул наблюдается интенсивное пластическое течение частиц, способствующее образованию качественных межчастичных связей. Гранулы в исходном состоянии весьма хрупки и разрушаются на мелкие фрагменты при статической нагрузке 100 Н, но это не мешает им пластически течь при динамической нагрузке. Средняя плотность образца из гранул составляла 0,85 от теоретической.

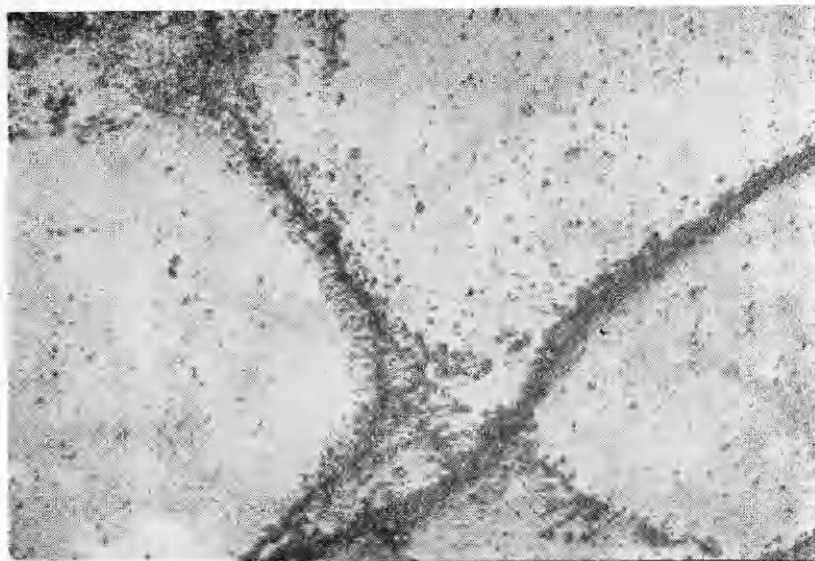


Рис 2. Микроструктура ударно-сжатого гранулированного порошка вольфрама. $\times 150$.

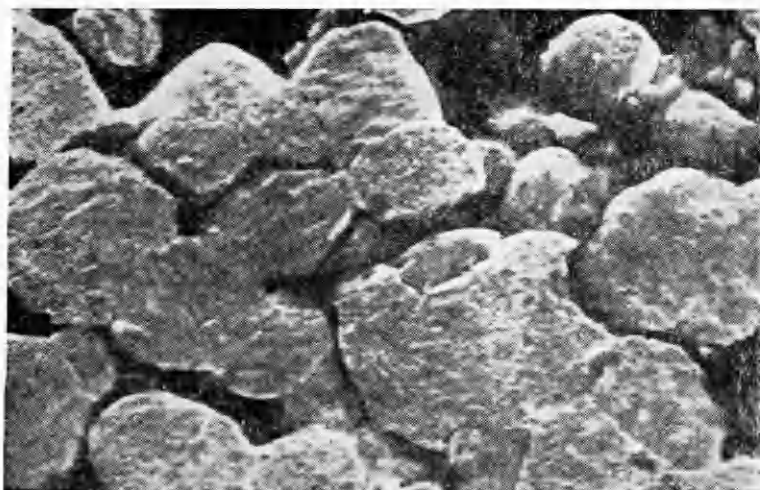


Рис. 3. Микроструктура ударно-сжатого дисперсного порошка вольфрама. $\times 3000$.

Фотография микроструктуры образца из мелкодисперсного (фракции $1\div 4$ мкм) порошка вольфрама, спрессованного взрывом, приведена на рис. 3. Чтобы получить компактный образец из мелкодисперсного вольфрама, пришлось уменьшать скорость метания нагружающей пластины по сравнению с нагружением образца из гранул, что привело к снижению давления и конечной плотности. Поскольку на стадии неполного уплотнения пористых сред давление слабо зависит от объема [11], можно ожидать, что это снижение давления не изменит качественной картины уплотнения частиц мелкозернистого порошка.

После прессования образец подвергался спеканию при 1250°C для придания ему начальной механической прочности, так как изготовить шлиф из сырого вольфрамового образца плотностью 65% от плотности монолита не возможно. Как следует из рис. 3, при взрывном прессовании мелкодисперсного порошка практически не отмечается пластического течения частиц, а процесс уплотнения протекает главным образом за счет переупаковки частиц и их скалывания по кромкам.

Следовательно, решающее влияние на формирование плотного образца оказывает не столько количество энергии, вкладываемой при ударном сжатии, сколько характер ее распределения. Это подтверждается и экспериментами с порошком фторопласта. В случае ударного сжатия крупных частиц (с диаметром $2\div 3$ мм) по границам наблюдается образование темного слоя, что, возможно, свидетельствует о деструкции фторопласта. В мелкодисперсном фторопласте (20 мкм), имеющем ту же начальную плотность (1 г/см^3), такого явления не наблюдалось, хотя плотность его после нагружения составляла 0,85 от теоретической. Не наблюдалось также различия в значениях массовой скорости на фронте ударной волны, измеренной на разном расстоянии от заряда в образцах из фторопласта с разным размером частиц при плоском нагружении. Давление в этих опытах изменялось от 10 ГПа на границе ВВ — образец до 3, 2 ГПа на расстоянии 32 мм от границы. Оценим энергию, выделяющуюся на контактах, в зависимости от размера частиц. Запишем зависимости для числа контактов частицы пористого тела с соседними в рамках глобулярной модели [12]

$$n = 3 + 22\theta^3, \quad (1)$$

для числа контактов в единице объема пористого тела

$$K = (18 + 132\theta^3) \theta \cdot \rho_0 / \pi D^3 \rho, \quad (2)$$

тогда для средней удельной энергии, выделившейся на единичном контакте

$$E_k = PD^3 \rho u^2 / (36 + 264\Theta^3). \quad (3)$$

Здесь Θ — относительная плотность; D — диаметр частицы; ρ — плотность частицы; ρ_0 — плотность вещества частицы; u — массовая скорость за фронтом ударной волны. Из (3) еще не следует, что величина температуры контактов частиц при всех давлениях также будет иметь кубическую зависимость от диаметра частиц. Действительно, температура контактов определяется не только энергией, выделившейся на контакте, но и размером самого контакта. Ясно, что величина продеформированной зоны вблизи контакта будет зависеть от величины фракции, увеличиваясь с ее размером. Это приводит к тому, что влияние размера частиц на температуру контактов будет слабее D^3 . При давлениях в несколько десятков килобар, как следует из экспериментов с медью и никелем [4, 6, 10], эта зависимость даже слабее зависимости полной поверхности частиц в единице объема от размера частиц ($1/D$) при одинаковой плотности порошков. При давлениях, приводящих к плотности за фронтом, близкой к плотности монолита, можно ожидать, что энергия в среднем равномерно распределяется по всей поверхности частиц (см. рис. 3).

Однако из-за связи величины продеформированной зоны с размером фракции зависимость поверхностной температуры от фракции более слабая, чем $\sim D$ [6, 10]. Если глубина зоны, где выделяется тепло, становится равной размеру частиц, исчезает зависимость температуры контактов от величины фракции, что и наблюдалось в экспериментах по измерению средней температуры контактов частиц в порошках меди и никеля при давлениях ≥ 10 ГПа [4, 6, 10].

Тем не менее приведенная формула для энергии, приходящейся на единичный контакт, может быть справедлива, если плотность за фронтом далека от плотности монолита.

Полученные результаты и приведенный анализ показывают, что размер частиц является важным фактором, определяющим возможность совместного пластического течения, а следовательно, и образование качественных связей между частицами при взрывном прессовании.

Для каждого материала существует определенный оптимальный гранулометрический состав, обеспечивающий наилучшее качество прессовок. Действительно, очень мелкая фракция приводит к равномерному распределению энергии по объему, и условие для образования связей по границам можно получить только при высоком уровне давлений, что может приводить к разрушению образцов в волне разгрузки. С другой стороны, слишком большой размер фракции приведет к концентрации энергии в зонах контакта, но за времена существования давления зерна могут не успеть продеформироваться таким образом, чтобы выбрать все пустоты и образовать связи на большей части поверхности частиц.

Время деформации, необходимое для заполнения поры, при ее размере порядка диаметра частиц $\tau \sim D/u$. Можно ожидать, что хорошее качество образцов будет получено при $t > \tau$, где t — время существования давления. Если $u = 500$ м/с, то целесообразно выбирать $D > 5$ мм, так как характерное время действия давления, создаваемого в большинстве схем нагружения взрывом, $t = 1 \div 10$ мкс. Вероятно, что оптимальный размер фракций лежит в диапазоне $0,1 \div 1$ мм. Оценим удельную энергию изменения формы частиц [13]

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{\sigma_{\Phi}^2}{G\rho}, \quad (4)$$

где σ_1 — предел текучести или предел прочности материала частиц; G — модуль сдвига. Для большинства металлов $\epsilon_{\phi} = 1 \div 10$ Нм, $\sigma_1 = 10^8 \div 10^9$ Н/м², $G \sim 10^{12}$ Н/м², $\rho \sim 10^4$ кг/м³. Полная внутренняя энергия одного килограмма вещества при ударном сжатии

$$\epsilon_{\pi} = u^2/2. \quad (5)$$

При $u = 0,5 \cdot 10^3$ м/с $\epsilon_{\pi} \sim 10^5$ Нм. Таким образом, $\epsilon_{\pi} \gg \epsilon_{\phi}$ и основная энергия при таких значениях массовых скоростей выделяется на контактах, так как потенциальная энергия при давлениях ≥ 10 ГПа пренебрежимо мала, что согласуется с экспериментом [6]. Отметим, что разница в концентрации энергии по границам — не единственная причина, приводящая к отличию в остаточных свойствах прессовок разной фракции. Например, порошки мелкой фракции, как правило, сильнее окислены с поверхности, что препятствует образованию качественных связей. Таким образом, для выбора оптимального режима взрывного прессования необходимо знание ударной адиабаты (для оценки запасаемой материалом энергии) и выполнение условий:

$$\epsilon_{\pi} > \epsilon_{\pi \min}, E_{\kappa} > E_{\kappa \min}, p > p_{\min}, t > \tau,$$

часть из которых обеспечивается выбором фракции.

Для взрывного прессования материалов, испытывающих фазовое превращение при повышении температуры, наоборот, требуется, чтобы энергия, выделяемая на контактах, была меньше некоторой критической, при которой наступает превращение (например, деструкция в случае с фторопластом).

Нахождение конкретных условий для каждого материала требует проведения дальнейших исследований.

Поступила в редакцию
28/VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. О. В. Роман. — В сб.: Порошковая металлургия. Вып. 1, Минск, «Высшая школа», 1977.
2. R. P. Board. Shock waves and Mechanical properties of Solids. Syracuse, U. P. N. Y., 1971.
3. М. Д. Дианов, Н. А. Златин и др. Письма в ЖТФ, 1976, 2, 12, 529.
4. В. Ф. Нестеренко. Автореф. канд. дис. Новосибирск, 1974.
5. Г. В. Беляков, В. И. Родионов, В. П. Самосадный. ФГВ, 1977, 13, 4, 614.
6. В. Ф. Нестеренко. — В сб.: Динамика сплошной среды. Т. XXIX, Механика взрывных процессов. Новосибирск, 1977.
7. Е. Г. Аввакумов, В. Е. Дьяков и др., ФГВ, 1975, 11, 6, 922.
8. В. С. Трофимов, Г. А. Ададунов и др., ФГВ, 1968, 4, 3, 244.
9. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2, 154.
10. V. F. Nesterenko. 4-th International Symposium on Explosive Working of Metals. Marianske Lasne, 1976.
11. А. А. Баканова, И. П. Дудолодов, Ю. Н. Сутулов. ПМТФ, 2, 1974, 117.
12. А. П. Карнаухов. Кинетика и катализ. 1971, 12, 4, 1025.
13. П. Г. Кириллов. Теория обработки металлов давлением. М., «Высшая школа», 1965.