

Н.А. Костюков, Г.Е. Кузьмин, В.М. Шаталин

ТЕЧЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОБЛАСТИ ВЕТВЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

С помощью фольговой методики и металлографического исследования ориентации частиц ПМ в сохраненных после нагружения компактах показано, что при регулярном отражении сталкивающихся УВ течение в области их ветвления однородно. При нерегулярных отражениях существует явно выраженный высокоскоростной поток вещества за фронтом маховской волны. В области ударно-волнового ветвления возможны два качественно отличающихся режима течения: без проскальзывания высокоскоростного потока и с проскальзыванием потоков. Течение без проскальзывания наблюдается при амплитудах маховских УВ, не превышающих некоторого порогового значения, зависящего от начальной плотности ПМ. На границе высокоскоростного и низкоскоростного потоков существует переходная зона в виде вязкого следа.

Проведено численное решение модельной задачи о смешении двух однородных потоков вязкой жидкости. На основе сопоставления результатов расчетов и экспериментов по регистрации характерных параметров вязкого следа установлено, что эффективная вязкость ударно-сжатого медного порошка дисперсностью ≤ 60 мкм составляет $\sim 0,01$ м²/с. При этом материал остается в твердофазном состоянии и имеет плотность, близкую к плотности монолита.

Изучение структуры течений, возникающих в условиях наклонного столкновения ударных волн (УВ) в порошковых материалах (ПМ) представляет интерес в связи с прикладными аспектами, в частности, с возможностью получения высокоплотных компактов [1, 2]. Одна из наиболее распространенных схем взрывного компактирования приведена на рис. 1. Нагружение осуществляется контактными зарядами взрывчатых веществ (ВВ) в режиме бегущей детонации. При этом в ПМ генерируются наклонные УВ, сталкивающиеся в центральной части образца.

Известно, что наклонные отражения УВ могут происходить в регулярном и нерегулярном режимах [2—4]. При регулярном режиме в ударно-сжатом ПМ возникают отраженные УВ. Линия (точка) ударно-волнового ветвления в плоских (осесимметричных) образцах движется вдоль плоскости (оси) столкновения (рис. 1, а). Характерная особенность нерегулярного режима — возникновение между сталкивающимися волнами новой УВ — маховской. При этом линия ударно-волнового ветвления отходит от плоскости (оси) столкновения (рис. 1, б). Течение в области сжатия может быть довольно сложным и не всегда описывается простой трехударной теорией [3].

Целью настоящей работы было изучение возможных структур течения ПМ в области ударно-волнового ветвления при регулярных и нерегулярных режимах отражения УВ. Исследования проводились на порошке меди дисперсностью ≤ 60 мкм. Исходная плотность составляла 0,5—0,7 плотности монолитного состояния, амплитуда нагружения ~ 1 ГПа.

Изучение картины течения ПМ в момент взрывного нагружения проводилось на основе металлографического исследования образцов, сохраненных после нагружения. Для регистрации течения ПМ в момент нагружения использовалась фольговая методика. Внутри исследуемого ПМ размещались тонкие (20—50 мкм) металлические фольги-«свидетели», ориентированные перпендикулярно плоскости (или оси) столкновения УВ (см. рис. 1). В процессе ударно-волнового сжатия образца фольги вовлекались в движение частицами ПМ, не внося заметных искажений в структуру течения [5]. В зависимости от характера распределения массовой скорости в области сжатия и времени существования течения разные участки фольги смещались на разные расстояния.

При изготовлении образцов проводилась предварительная подпрессовка ПМ до требуемой (повышенной по отношению к насыпной) исходной плотности. Для достижения равномерной плотности по всему объему образца подпрессовывали послойно, малыми порциями. При этом имела место деформация и переупаковка частиц, контактирующих с пуансоном, в резуль-

© Н.А. Костюков, Г.Е. Кузьмин, В.М. Шаталин, 1994.

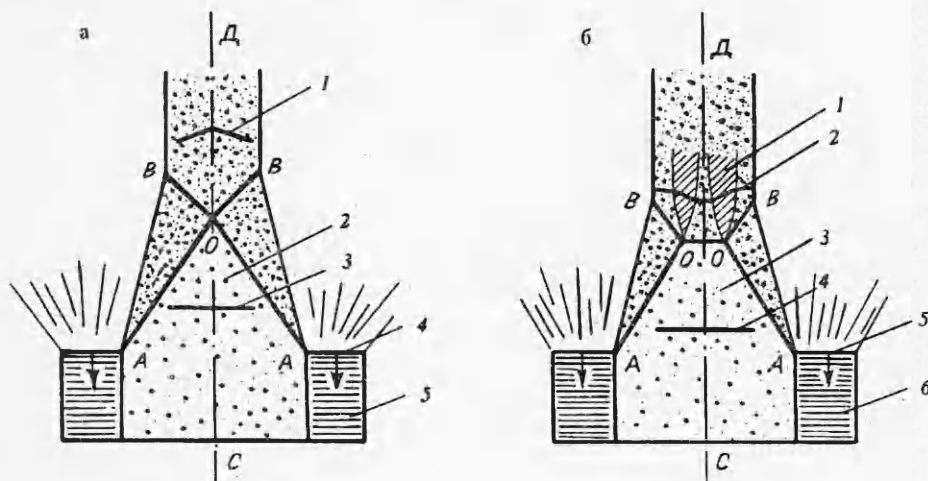


Рис. 1. Схемы нагружения ПМ в условиях регулярного (а) и нерегулярного (б) режимов отражения УВ.

1 — фольга-«свидетель» в области сжатия, 2 — невозмущенный ПМ, 3 — фольга-«свидетель» в невозмущенной области, 4 — фронт детонационной волны, 5 — заряд ВВ, 6 — пограничная зона (вязкий след), AO — фронт падающей УВ, OB — фронт отраженной УВ, OO — фронт маховой УВ, CD — плоскость столкновения УВ в плоских образцах или ось столкновения в осесимметричных образцах.

тате чего в подпрессованном образце возникали плоские границы раздела между соседними слоями (порциями) ПМ. В процессе последующего взрывного нагружения таких образцов геометрия указанных границ изменялась аналогично изменениям геометрии фольг-«свидетелей».

Сохраненные после нагружения плоские образцы разрезались по плоскости, перпендикулярной плоскости столкновения УВ и проходящей через вектор скорости детонации. В осесимметричных образцах делалось осевое сечение. Поверхности сечений шлифовались, полировались и обрабатывались специальными травителями, позволяющими выявить положение фольг в спрессованном ПМ (или границ раздела между слоями) и межчастичные границы. Подготовленные таким образом шлифы исследовались на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-2. Характерные особенности изменения геометрии фольг-«свидетелей» (или границ раздела между слоями) в ударно-сжатом ПМ и особенности ориентации частиц ПМ в разных областях компакта позволяли сделать выводы о структуре течения материала в момент нагружения. Типичные фотографии шлифов компактов, сохраненных после нагружения, приведены на рис. 2—4.

Результаты проведенных исследований показывают, что при регулярных режимах отражения УВ характер деформации фольг-«свидетелей» имеет вид излома в центральной части (см. рис. 1, а). По обе стороны излома поверхности фольг в основном остаются плоскими. Такая деформация может

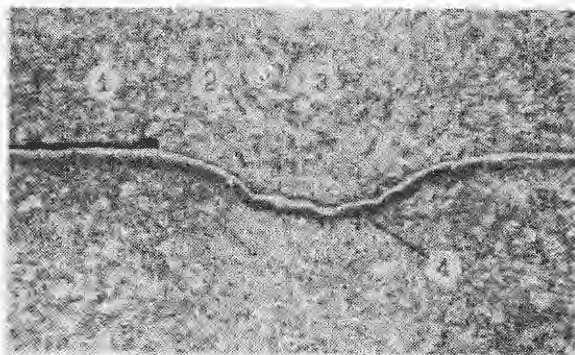


Рис. 2. Фотография шлифа компакта, полученного в условиях нерегулярного отражения УВ без проскальзывания потоков ($\times 40$).

Начальная плотность $5,8 \text{ г/см}^3$. Образец осесимметричный. Скорость детонации $3,3 \text{ км/с}$, направление детонации — сверху вниз.

1 — периферийная область (скомпактирована в условиях низкоскоростного течения), 2 — переходная зона (вязкий след), 3 — центральная область (скомпактирована в условиях высокоскоростного течения), 4 — фольга-«свидетель».

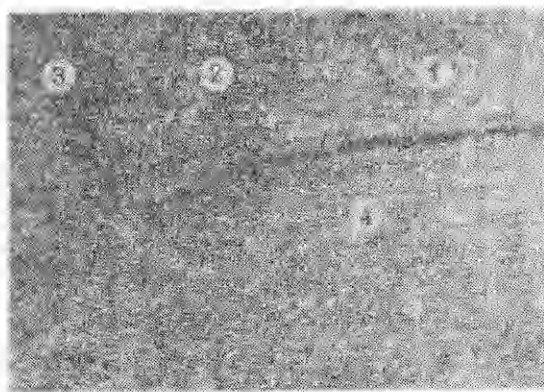


Рис. 3. Фотография шлифа компакта, полученного в условиях нерегулярного отражения УВ без проскальзывания потоков ($\times 63$).

4 — граница раздела между слоями ПМ, образованными при послойной подпрессовке образца до начальной плотности. Остальные обозначения и условия эксперимента те же, что на рис. 2.

возникнуть при линейном законе изменения времени воздействия потока ПМ на фольгу с увеличением расстояния от плоскости (оси) столкновения УВ, что, в свою очередь, обусловлено взаимной ориентацией фронтов падающих и

отраженных волн в области их ветвления. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об отсутствии заметных градиентов массовой скорости ПМ при регулярных режимах отражения УВ.

При нерегулярных режимах отражения центральные части фольг-«свидетелей» получают наибольшее смещение (см. рис. 1, б, рис. 2). Этот факт означает, что массовая скорость потока за фронтом маховской волны превышает скорость течения граничащих с ней периферийных областей и хорошо согласуется с результатами исследований [2, 3], полученных методом импульсного рентгенографирования.

Особого внимания заслуживает принципиально новый результат, который заключается в том, что течение ПМ в области сжатия может происходить в двух качественно отличающихся режимах: без проскальзывания высокоскоростного потока относительно прилегающих областей (рис. 2 и 3) и с проскальзыванием потоков (рис. 4).

Течение без проскальзывания наблюдается при относительно небольших амплитудах маховской УВ. Металлографические исследования структуры сохраненных компактов позволяют выявить пограничные зоны, разделяющие высокоскоростной и низкоскоростные потоки. Характерный размер зон (толщина) во много раз превышает средний размер частиц ПМ. Ориентация частиц ПМ, расположенных в пограничных зонах, свидетельствует о переносе импульса из области высокоскоростного течения в низкоскоростную область. Кроме того, в пределах пограничных зон отчетливо регистрируется искривление фольг-«свидетелей» и границ раздела между слоями (см. рис. 2 и 3). Характер искривления подтверждает наличие градиента массовой скорости ПМ в рассматриваемых зонах. В целом полученные результаты показывают, что пограничная зона может рассматриваться как вязкий след

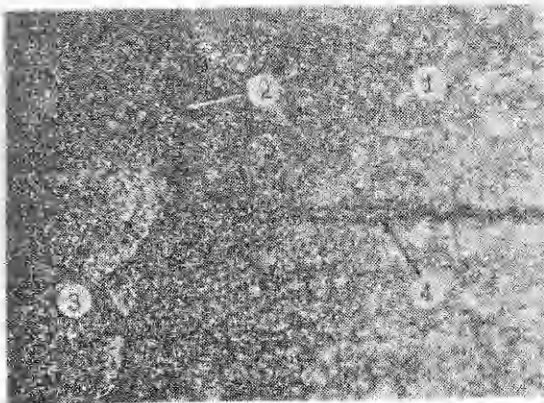


Рис. 4. Фотография шлифа компакта, полученного в условиях нерегулярного отражения с проскальзыванием потоков ($\times 63$).

Начальная плотность $5,3 \text{ г/см}^3$. Образец осесимметричный. Скорость детонации $3,3 \text{ км/с}$, направление детонации — сверху вниз.

1 — периферийная область (скомпактирована в условиях низкоскоростного течения), 2 — граница раздела высокоскоростного и низкоскоростного потоков (поверхность тангенциального разрыва скоростей), 3 — центральная область (скомпактирована в условиях высокоскоростного течения), 4 — граница раздела между слоями ПМ, образованными при послойной подпрессовке образца до начальной плотности.

Рис. 5. Расчетные (1) и экспериментальные (2) конфигурации фольг-«свидетелей».

$\nu, \text{м}^2/\text{с}$: а — 0,001, б — 0,01, в — 0,05. Штриховыми линиями обозначены расчетные границы вязкого следа. Числа около кривых означают моменты времени, для которых получены формы фольги.

на границе высокоскоростного и низкоскоростного потоков. Следует подчеркнуть, что при этом ПМ остается в твердофазном состоянии, а его плотность близка к плотности монолита.

Увеличение скорости распространения маховской УВ или уменьшение исходной плотности ПМ при фиксированной скорости маховской волны приводит к увеличению различия скоростей высокоскоростного и низкоскоростного потоков. При достижении критических условий происходит переход к режиму течения с тангенциальным разрывом скоростей, т.е. проскальзыванию потоков. Процесс проскальзывания сопровождается дополнительным тепловыделением на контактной границе двух потоков. В связи с этим в некоторых экспериментах наблюдался эффект плавления тонкого слоя ударно-сжатого ПМ в зоне проскальзывания (см. рис. 4).

Отметим один интересный факт. Приведенные на рис. 3 и 4 фотографии шлифов компактов показывают, что за фронтом маховской волны (область 3) происходит размытие границ между слоями подпрессованного ПМ. Этот эффект, по-видимому, обусловлен качественным различием в характере микротечений, возникающих при схлопывании пор в падающей и маховской волнах. Принимая во внимание, что амплитуда маховской волны в несколько раз превышает амплитуду падающей УВ [3], можно предположить, что во фронте маховской волны (в отличие от падающей) процесс схлопывания пор происходит в условиях интенсивных пластических деформаций поверхностей частиц или микроструйных течений [6]. Развитый характер микротечений ПМ в маховской волне служит причиной размытия плоско ориентированных поверхностей пограничных частиц.

Расчет коэффициента вязкости макротечения ПМ в области сжатия требует, вообще говоря, решения обратной задачи для двумерного нестационарного движения вязкой жидкости. Для приближенной оценки вязкости воспользуемся следующей упрощенной постановкой задачи. Пусть два однородных потока вязкой жидкости движутся с разными скоростями из бесконечности без трения вдоль разделяющей их плоской пластины. Систему координат выберем так, что ось x ориентирована вдоль пластины, а ось y направлена перпендикулярно к ней. В точке $x = 0, y = 0$ пластина обрывается и начинается вязкое перемешивание потоков. Задача в такой постановке описывается уравнениями

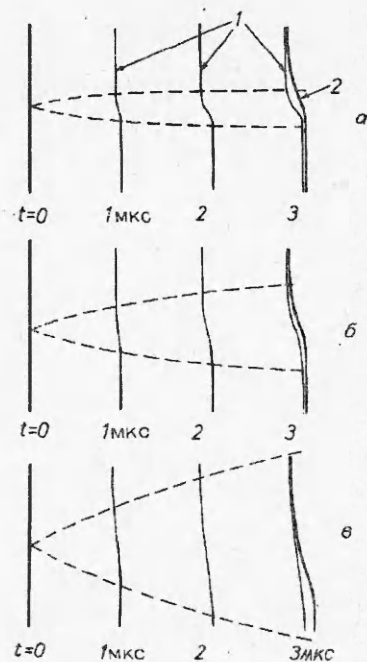
$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

с граничными условиями:

$$u = u_1, \quad v = 0 \quad \text{при } y > 0, \quad x \leq 0,$$

$$u = u_2, \quad v = 0 \quad \text{при } y < 0, \quad x \leq 0,$$



$$u \rightarrow u_1 \text{ при } y \rightarrow +\infty, x > 0,$$

$$u \rightarrow u_2 \text{ при } y \rightarrow -\infty, x > 0.$$

Здесь u и v — компоненты скорости соответственно вдоль осей x и y ; ν — вязкость, u_1 — скорость высокоскоростного потока; u_2 — скорость низкоскоростного потока.

Эта задача рассмотрена в [7], и ее решение можно представить в виде

$$u(x, y) = \frac{u_1 + u_2}{2} - \frac{u_2 - u_1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{y}{2} \sqrt{\frac{u_1}{\nu x}}} \exp(-z^2) dz,$$

$$v(x, y) = \frac{u_2 - u_1}{2} \sqrt{\frac{\nu}{\pi u_1 x}} \exp\left(-\frac{y^2 u_1}{4 \nu x}\right),$$

где z — переменная интегрирования.

Полученные соотношения позволяют рассчитать форму фольги, первоначально представляющей собой отрезок, симметричный относительно оси x при $x = 0$. Эффективное значение вязкости подбирается таким образом, чтобы достигалось наилучшее совпадение расчетной и экспериментальной форм фольги в вязком следе. При этом предполагались известными параметры течения ПМ за фронтом маховой волны и время существования течения.

На рис. 5 приведено сопоставление расчетов с экспериментом для ударно-сжатого порошка меди. Исходная плотность порошка составляла $5,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $u_1 = 1,05 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $u_2 = 1,0 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, время наблюдения 3 мкс. Видно, что предложенная упрощенная постановка задачи дает в целом правильное качественное описание поведения фольги в потоке. Удовлетворительное количественное совпадение расчетной и экспериментальной геометрии фольги достигается при значении $\nu \approx 0,01 \text{ м}^2/\text{с}$, что хорошо согласуется с результатом, полученным в [8] на основе изучения структуры течения ПМ с твердыми примесными включениями. Для получения более точных количественных данных требуется учет факторов, которыми пренебрегалось в данной упрощенной постановке задачи. В частности, представляется довольно вероятным, что высокоскоростной и низкоскоростной потоки могут иметь различные коэффициенты вязкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябинин Ю.Н. О некоторых опытах по динамическому сжатию вещества // ЖТФ. — 1956. — 26, вып. 12. — С. 2661—2666.
2. Дерибас А.А., Крупин А.В., Ставер А.М. и др. Экспериментальное исследование ударного сжатия титанового порошка и губки // ФГВ. — 1973. — 9, № 6. — С. 883—887.
3. Костюков Н.А. Влияние начальной плотности вещества на режим косоугольного столкновения ударных волн // ПМТФ. — 1977. — № 3. — С. 124—130.
4. Staver A. Physical Aspect of Explosive Compaction of Powders. // 5 th Int. Conf. of High Energy Rate Fabrication, Denver, Colorado, 1975. — Denver 1975, p. 2110—2131.
5. Ставер А.М., Костюков Н.А., Кузьмин Г.Е. Исследование течения за косоугольной ударной волной при взрывном прессовании порошков // Материалы 2 Международного симпозиума по обработке материалов взрывом. — Марианске Лазни: ЧНТО, 1973. — Т. 2. — С. 341—352.
6. Нестеренко В.Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. — Новосибирск: Наука, 1992.
7. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Течение струй вязкой жидкости. — М.: Наука, 1965.
8. Костюков Н.А., Яковлев И.В. Течение порошковых материалов вблизи примесных включений в условиях ударного нагружения // ФГВ. — 1992. — 28, № 2. — С. 109—111.

630090, г. Новосибирск, ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 16/VII 1993