

с тем, что при увеличении d_0 уменьшается поверхность раздела фаз, где происходит процесс обдирки капель. Поэтому при больших d_0 эффект обдирки ослабевает.

Для полностью размытой волны без переднего скачка интересно определить, при каких значениях M , m и d_0 капли дробятся, а при каких их дробление на всем протяжении волны отсутствует ($We_{12} < We_c$). На рис. 5 представлены кривые, показывающие границу между этими областями на плоскости (d_0, m) . Линии 1—3 построены для $M = 0,85; 0,95$ и $0,99$. Область вверху каждой кривой соответствует наличию дробления, а область внизу — его отсутствию. Видно, что с увеличением M область значений d_0, m , при которых капли не дробятся, уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аманбаев Т. Р., Ивандаев А. И. Структура ударных волн в двухфазных смесях газа с каплями жидкости // ПМТФ.— 1988.— № 2.
2. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г., Нигматулин Р. И. Газовая динамика многофазных сред.— Итоги науки и техники. Сер. МЖГ.— М.: ВИНТИ.— 1981.— Т. 16.
3. Ивандаев А. И. О влиянии нестационарных эффектов на обмен импульсом и теплом между фазами газозвеси в ударных волнах // Изв. АН СССР. ТВТ.— 1985.— Т. 23, № 4.
4. Гонор А. Л., Ривкин В. Я. Динамика капли // Итоги науки и техники. Сер. МЖГ.— М.: ВИНТИ.— 1982.— Т. 17.
5. Engel O. G. Fragmentation of waterdrops in the zone behind an air shock // J. Res. Nat. Bureau Stand.— 1958.— V. 60, N 5.
6. Ranger A. A., Nicholls J. A. Aerodynamic shattering of liquid drop // AIAA J.— 1969.— V. 7, N 2. Рус. пер. Рейнжер, Николлс. Аэродинамическое дробление каплей // РТК.— 1969.— Т. 7, № 2.
7. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е. и др. О режимах дробления капель и критериях их существования // Инж.-физ. журн.— 1981.— Т. 40, № 1.
8. Нигматулин Р. И. К вопросу о волнах уплотнения в двухфазных средах // Вестн. МГУ. Сер. 1, Математика, механика.— 1969.— № 4.
9. Ивандаев А. И. Распространение малых возмущений в смеси пара с каплями воды // Акуст. журн.— 1978.— Т. 24, № 1.

Поступила 10/II 1987 г.

УДК 532.598

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ ДВУМЕРНОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Н. А. Костюков

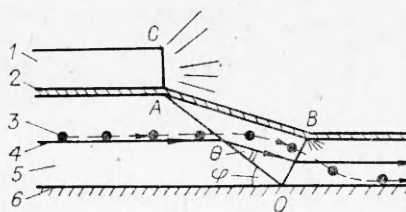
(Новосибирск)

Исследование поведения смесей разнородных частиц при ударно-волновом нагружении представляет интерес в связи с задачами взрывного компактирования порошковых композиционных материалов, реализации физико-химических превращений в порошковых смесях и т. д. В настоящее время один из наиболее распространенных источников информации о процессах, протекающих при ударном сжатии порошковых материалов,— изучение структуры образцов, сохраненных после нагружения. Однако этот метод имеет существенный недостаток: полученные данные, как правило, допускают неоднозначную трактовку, а соображения, возникшие на их основе,— лишь возможные подходы к объяснению причин и механизмов происшедших явлений. Более объективное заключение может быть получено на основе прямых наблюдений картины течения вещества в динамике. В этом плане наиболее информативным методом исследований представляется метод импульсного рентгенографирования.

В настоящей работе с помощью метода импульсного рентгенографирования впервые проведены прямые экспериментальные наблюдения структуры течения смесей разнородных твердых частиц при их ударном нагружении в условиях, близких к условиям практического применения.

Объектами исследований служили двухкомпонентные системы, состоящие из частиц легкого («прозрачного» для рентгеновского излучения) материала, между которыми в определенном порядке размещались частицы тяжелого («непрозрачного») материала. Размеры частиц обоих компонентов приблизительно одинаковы и составляли 0,5—1,0 мм. Отношение объемных долей тяжелого и легкого компонентов много меньше единицы,

поэтому в дальнейшем тяжелый компонент будет именоваться примесным, а легкий — основным. В качестве основного компонента использовались частицы алюминия, графита, песка и хлорида натрия. Примесными частицами служили гранулы, изготовленные из сплава вольфрама с молибденом, спеченного вольфрамового порошка и свинца. Форма гранул близка к сферической.



Р и с. 1

Ударно-волновое нагружение проводилось в плоской двумерной постановке (рис.1). Частицы основного компонента размещались в виде слоя 5 равномерной толщины на массивном стальном основании 6. Толщина слоя 15—20 мм, средняя плотность 30—50% плотности материала частиц. Внутри слоя на определенных глубинах размещались свинцовые фольги-«свидетели» 4 толщиной 20 мкм. Плоскости фольг параллельны поверхности основания. В одной экспериментальной сборке использовалось не более двух фольг, расположенных на разной глубине. Частицы примесного компонента 3 размещались над свинцовой фольгой в один ряд и находились в непосредственном контакте с ней. Расстояние между частицами составляло 5—10 их диаметров. На верхней поверхности слоя размещался плоский заряд взрывчатого вещества (ВВ) 1. Детонация заряда осуществлялась с одного из торцов таким образом, чтобы в исследуемой системе генерировалась косая ударная волна (УВ) OA , которая в результате наклонного взаимодействия с поверхностью основания порождала отраженную волну OB . Такой способ нагружения является хорошим приближением к условиям взрывного компактирования порошковых материалов.

Заряды изготавливались из аммонита 6ЖВ, гексогена и сплава ТГ 50/50. Между ВВ и поверхностью нагружаемого слоя располагались металлические пластины 2 толщиной 0,5—1 мм, которые служили для предотвращения фильтрации продуктов взрыва в межчастичное пространство.

Экспериментальные сборки размещались между источником рентгеновского излучения и кассетой с фотопленкой таким образом, чтобы плоскости, параллельные основанию, проектировались на пленку в виде линий. В момент нагружения свинцовые фольги-«свидетели» вовлекались в движение частицами основного компонента, не внося заметных искажений в течение за фронтом УВ [1]. В подвижной системе координат, связанной с фронтом детонации, проекции фольг совпадают с линиями тока основного компонента, а примесные частицы расположены вдоль траектории их движения. Типичные рентгенограммы приведены на рис. 2—4. Изображения зарядов ВВ отсутствуют, так как в экспериментах между зарядом и кассетой с фотопленкой размещалась массивная стальная плита, экранирующая излучение. Плита предназначалась для защиты кассеты от повреждения продуктами взрыва.

Следует отметить высокую информативность метода импульсного рентгенографирования. Он позволяет не только фиксировать взаимное положение линий тока основного компонента и траекторий примесных частиц, но и определять параметры ударно-волнового нагружения. Так, из законов сохранения на косом ударном скачке следует, что сжатие основного компонента, определяемое как отношение его плотности ρ за фронтом к исходной плотности ρ_0 , может быть вычислено по формуле $\rho/\rho_0 = \text{tg } \varphi / \text{tg}(\varphi - \theta)$ (φ и θ — углы наклона фронта УВ к поверхности основания и отклонения потока за фронтом).

Скорость распространения фронта УВ D вычисляется по известной скорости детонации W и углу φ : $D = W \sin \varphi$. Остальные ударно-волновые параметры определяются из законов сохранения на ударном разрыве. В экспериментах скорость детонации регистрировалась с помощью электро-



Р и с. 2



Р и с. 3



Р и с. 4

падают с линиями тока основного компонента, что означает наличие скоростной неравновесности между частицами разных компонентов. Физическая природа этого явления представляется достаточно простой. При переходе через фронты падающей и отраженной УВ направление потока частиц основного (легкого) компонента резко меняется, а линии тока — ломаные, состоящие из отдельных участков. Примесные частицы обладают большим запасом кинетической энергии по сравнению с частицами основного компонента. При переходе через фронт УВ они тормозятся в меньшей степени и продолжают двигаться, меняя направление под действием сил межчастичного взаимодействия. В общем случае окончательное выравнивание скоростей происходит на некотором расстоянии от фронта, поэтому траектории примесных частиц — относительно плавные линии. Их геометрия зависит от соотношения плотностей обоих компонентов и сил межчастичного взаимодействия.

Если силы межчастичного взаимодействия малы, то скоростная неравномерность может оставаться значительной в течение всего времени нагружения. В результате примесные частицы оказываются смещенными ближе к верхней границе слоя. Такие течения имели место в тех случаях, когда в качестве основного компонента использовались алюминий и хлорид натрия при амплитудах УВ, превышающих 2 ГПа (рис. 2). В некоторых экспериментах скоростная неравновесность оказывалась настолько значительной, что наблюдался эффект внедрения примесных частиц в металлическую пластину (рис. 3) или ее сквозное пробивание. Если же, напротив, силы межчастичного взаимодействия велики, то размер области выравнивания скоростей может оказаться сравнимым с характерным размером частиц. В этом случае примесные частицы будут двигаться вдоль линий тока основного компонента. Такие условия реализовывались в песке при амплитудах УВ до 5 ГПа (рис. 4). Очевидно, что для описания указанных систем применимы односкоростные модели пористых сред.

Возможны варианты течения, в которых соотношение размеров областей выравнивания скоростей за падающей и отраженной волнами таково, что примесные частицы достигают отражающей поверхности. При этом происходит их «оседание» на поверхности основания (рис. 1). Такие течения наблюдались в графите и хлориде натрия при нагружении относительно слабыми УВ.

Сила межчастичного взаимодействия определяется множеством факторов. В числе основных можно указать механические и теплофизические характеристики материалов частиц, их морфологию, относительную скорость перемещения. Установление зависимости между силой и указан-

контактных датчиков. Амплитуды падающих волн изменялись от 1 до 7 ГПа. Пределы диапазона изменения параметров нагружения ограничивались мощностью источника рентгеновского излучения и трудностями, связанными с защитой фотоленки от действия взрыва.

Анализ полученных рентгенограмм показывает, что в процессе нагружения положение примесных частиц относительно свинцовой фольги может заметно изменяться, т. е. траектории их движения не всегда сов-

ными факторами представляет сложную самостоятельную проблему. Только после ее решения в перспективе просматривается задача о теоретическом описании наблюдаемых эффектов. В данном случае представляется целесообразным провести качественный энергетический анализ явления.

Было замечено, что при фиксированных значениях параметров нагружаемой системы скоростная неравновесность в значительной мере определяется энергией УВ. В исследованном диапазоне общая тенденция характеризуется увеличением неравновесности с ростом энергии нагружения. Исходя из предпосылки об инерционной природе скоростной неравновесности полученный результат кажется естественным, поскольку увеличение ударно-волновой энергии означает рост скорости потока за фронтом волны. Однако следует иметь в виду, что характер зависимости силы межчастичного взаимодействия от энергии УВ может оказаться достаточно сложным. Действительно, при наличии скоростной неравновесности происходит обтекание примесной частицы материалом основного компонента. Для упрощения дальнейших рассуждений будем считать примесную частицу «абсолютно жесткой». В относительно слабых УВ процесс обтекания сопровождается интенсивной пластической деформацией или хрупким разрушением материала, находящегося в ближайшей окрестности обтекаемой частицы. При этом сила межчастичного взаимодействия в значительной мере зависит от прочностных характеристик материала.

Эффективная прочность порошкового материала за фронтом УВ (в данном случае материала основного компонента) обусловлена двумя факторами: индивидуальной прочностью самих частиц и прочностью межчастичных контактов, возникающей в процессе ударного сжатия. Кривая зависимости индивидуальной прочности частиц от энергии ударного нагружения имеет максимум, что объясняется влиянием скорости нагружения и температуры: динамическая прочность растет с увеличением скорости нагружения и уменьшается с ростом температуры. Прочность межчастичных контактов также носит немонотонный характер. Возникновение связей становится возможным лишь при значениях энергии ударного нагружения, превышающих некоторую величину, зависящую от теплофизических свойств материала частиц и их морфологии [2, 3]. Существует оптимальное значение энергии, при котором прочность контактных связей достигает максимального значения. Спад прочности при дальнейшем увеличении энергии нагружения обусловлен отрицательным влиянием температуры.

В мощных УВ при значениях энергии ударного нагружения, превышающих $E^* = c(T_{пл} - T_0) + H_{пл}$ (c — удельная теплоемкость материала, T_0 — исходная температура, $T_{пл}$ — температура плавления при давлении ударного нагружения, $H_{пл}$ — скрытая теплота плавления при давлении ударного нагружения), материал основного компонента переходит в жидкое состояние. В такой ситуации главный вклад в суммарную силу межчастичного взаимодействия вносит, по-видимому, сила вязкого трения, которая растет с увеличением относительной скорости перемещения, т. е. с увеличением энергии ударного воздействия.

Приведенные выше рассуждения позволяют предположить, что наблюдаемая в данной работе монотонно возрастающая зависимость скоростной неравновесности от энергии ударного нагружения не является общей закономерностью, а обусловлена, по-видимому, ограниченностью диапазона изменения параметров нагружения.

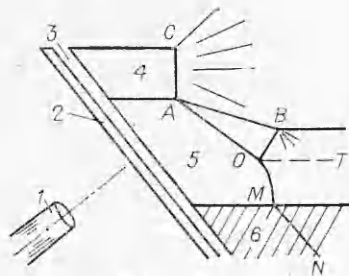
В тех случаях, когда примесный компонент представлен малопрочным или легкоплавким материалом, процесс взаимодействия может осложняться пластической деформацией примесных частиц или их хрупким разрушением. Кроме того, в зоне скоростной неравновесности возможно возникновение массопереноса, когда примесная частица оставляет «след» — тонкий слой материала, снятый с ее поверхности под действием сил трения. Такие эффекты зафиксированы в УВ интенсивностью свыше 2 ГПа при на-

гружении систем, в состав которых входили примесные частицы из свинца или спеченного вольфрамового порошка, а в качестве основного компонента использовался хлорид натрия. Заметим, что прочность вольфрамовых гранул сравнительно небольшая: они хрупко разрушались при статической нагрузке порядка 100 Н. При использовании высокопрочных и тугоплавких гранул из сплава вольфрама с молибденом рассматриваемые эффекты не наблюдались во всем исследованном диапазоне параметров нагружения.

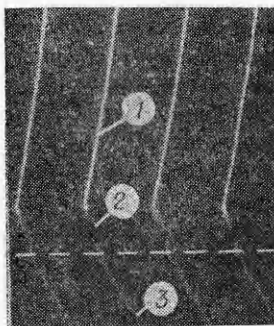
В данной работе не проводились рентгенографические исследования структуры течения при нерегулярном отражении УВ от поверхности основания, так как они требуют значительного увеличения размеров экспериментальныхборок, что недопустимо из-за ограниченной мощности источника излучения, которым мы располагали. Естественно предположить, что течения, возникающие за падающей и отраженной волнами при нерегулярном режиме отражения, должны быть аналогичны течениям при регулярном отражении. Можно ожидать, что в случае нерегулярного отражения существуют режимы течения, при которых соотношение размеров областей выравнивания скоростей за падающей и отраженной волнами таково, что будет иметь место проникание примесных частиц в область, сжатую маховской УВ. Поскольку поток вещества за маховской волной существенно дозвуковой, возмущения, возникающие в результате проникания примесных частиц, должны влиять на геометрию фронта УВ. Эксперимент это подтверждает. В работе проведены специальные исследования по оптической регистрации маховских ударно-волновых конфигураций в различных порошковых смесях. Указанный эффект обнаружен на смеси порошков нитрида бора с нихромом в весовом соотношении 15/85. Размеры частиц нитрида бора не превышали 10 мкм, нихрома — 60 мкм.

Схема экспериментов приведена на рис. 5, где 1 — СФР, 2 — пластина из плексигласа, 3 — зазор, заполненный газообразным аргоном, 4 — заряд ВВ, 5 — исследуемая порошковая смесь, 6 — основание, СА — фронт детонации, ОА — фронт падающей УВ, ОВ — фронт отраженной УВ, ОМ — фронт маховской УВ, МN — фронт УВ в материале основания, ОТ — поверхность тангенциального разрыва. Когда ударно-волновая конфигурация выходила на торец экспериментальной сборки, возникало кратковременное высвечивание аргона, находящегося в зазоре между плексигласовой пластиной и торцом сборки. Прекращение свечения вызывалось диспергированием плексигласа в УВ. Регистрация свечения проводилась на фоторегистре СФР в режиме целевой фоторазвертки при скорости движения луча по пленке $3 \cdot 10^3$ м/с. Для увеличения разрешающей способности метода торец экспериментальной сборки изготавливался наклонно к поверхности основания и в эксперименте ориентировался перпендикулярно оси СФР. Из геометрических соображений ясно, что проекция фронта маховской УВ на торец сборки обратно пропорциональна синусу угла между отражающей поверхностью и торцом. В наших экспериментах угол составлял $30-20^\circ$, что позволяло получить увеличение проекции фронта маховской УВ в 2—3 раза.

Фотохронограмма процесса приведена на рис. 6. Направление развертки справа налево, штриховая линия — положение отражающей поверхности, 1—3 — области свечений, вызванных соответственно падающей, маховской и УВ в материале основания. В центральной части фронта маховской волны виден явно выраженный изгиб, обусловленный, по нашему мнению, фильтрацией частиц нихрома из области течения за отраженной волной в область течения за маховской УВ. При исследовании маховских ударно-волновых конфигураций в однокомпонентных порошковых материалах [4] такой изгиб не наблюдался. Дополнительное свидетельство наличия фильтрации — увеличение концентрации частиц нихрома вблизи поверхности основания, обнаруженное при металлографическом изучении образцов, сохранных после нагружения.



Р и с. 5



Р и с. 6

Таким образом, в результате проведенных исследований можно утверждать, что при ударно-волновом воздействии на смеси разнородных твердых частиц возможно возникновение скоростной неравновесности за фронтом УВ. Неравновесность может быть незначительной и очень большой. В количественном отношении эффект определяется физико-механическими свойствами частиц и энергией ударного нагружения.

Автор выражает благодарность В. М. Титову и М. А. Могилевскому за внимание к работе и полезные замечания и А. С. Старостиной за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюков Н. А. Наклонное отражение ударных и детонационных волн в пористых средах: Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Новосибирск, 1978.
2. Kasiraj P., Vreeland Jr. T. et al. Shock consolidation of a rapidly solidified steel powder // Acta metallurgica.— 1984.— V. 32, N 8.
3. Роман О. В., Нестеренко В. Ф., Пикус И. М. Влияние размера частиц порошка на процесс взрывного прессования // ФГВ.— 1979.— № 5.
4. Костюков Н. А. Особенности наклонного отражения от преграды ударных волн в порошках // Динамика сплошной среды.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1977.— Вып. 29.

Поступила 10/IV 1987 г.

УДК 519.633

К ЭФФЕКТУ ТЕПЛООВОГО КРИЗИСА В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ПРИ НЕПОДВИЖНОМ ИСТОЧНИКЕ НАГРЕВА

Б. П. Герасимов, С. А. Семушин, А. А. Степанов, В. А. Щеглов
(Москва)

Как известно [1, 2], явление теплового кризиса в газовых потоках возникает при внутреннем энерговыделении (химические реакции, спонтанная конденсация газа) и внешнем тепловом воздействии на фиксированном участке потока (нагрев газа в электрическом разряде, в поле мощного лазерного излучения и т. д.). Для движущегося с потоком источника нагрева при энерговыделении, превышающем критическое значение, уравнения газодинамики допускают автомодельные аналитические решения в виде бегущих по потоку детонационных волн (см., например, [1—3]). При неподвижном источнике нагрева подобных решений, вообще говоря, не существует, поскольку здесь автомодельность отсутствует. Тем не менее если исходный поток сверхзвуковой, то в плоском одномерном случае возможно построение аналитического решения задачи о стационарной ударной волне (УВ), выходящей из зоны действия фиксированного источника нагрева с энерговыделением, превышающим критическое, и распространяющейся вверх по потоку. Построение такого решения — цель данной работы.]

Пренебрегая переходными процессами, связанными с формированием на участке тепловыделения УВ, исследуем подобное течение с момента времени, когда стационарная УВ уже вышла из зоны действия источника теплового нагрева. Заметим, что в таком потоке имеется четыре зоны тече-