

ЛИТЕРАТУРА

1. Evans A. G. The mechanical performance of fibre reinforced ceramic matrix composites // Proc. 9th RISQ International Symposium on Metallurgy and Materials Sciences, «Mechanical Physical Behaviour of Metallic and Ceramic Composites»/Eds. by S. I. Andersen, H. Lilholt, O. B. Pedersen.— Roskilde, 1988.
2. Газьмин В. И., Милейко С. Т., Твардовский В. В. Разрушение модельного композита с керамической матрицей // Механика композит. материалов.— 1988.— № 2.
3. Твардовский В. В. К теории псевдомакротрещин в анизотропном теле (Ч. I. Одиночная псевдомакротрещина) // Изв. АН СССР. МТТ.— 1991.— № 2.
4. Marshall D. B., Cox B. N., Evans A. G. The mechanism of matrix cracking in brittle-matrix fibre composites // Acta Met.— 1985.— V. 33, N 11.
5. McCartney L. N. Mechanics of matrix cracking in brittle-matrix fibre-reinforced composites // Proc. Roy. Soc. Lond.— 1987.— V. A—409.— P. 329.
6. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела.— М.: Наука, 1977.
7. Мухелишвили Н. И. Сингулярные интегральные уравнения.— М.: Гостехиздат, 1946.
8. Твардовский В. В. К теории псевдомакротрещин в анизотропном теле (Ч. II. Взаимодействие макро- и псевдомакротрещин) // Изв. АН СССР. МТТ.— 1991.— № 3.
г. Черноголовка *Поступила 16/VII 1990 г.*

УДК 532.593:621.7.044.2

И. А. Костюков

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРАНИЧНЫХ ЗОН ПРИ ДВУМЕРНОМ ВЗРЫВНОМ КОМПАКТИРОВАНИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

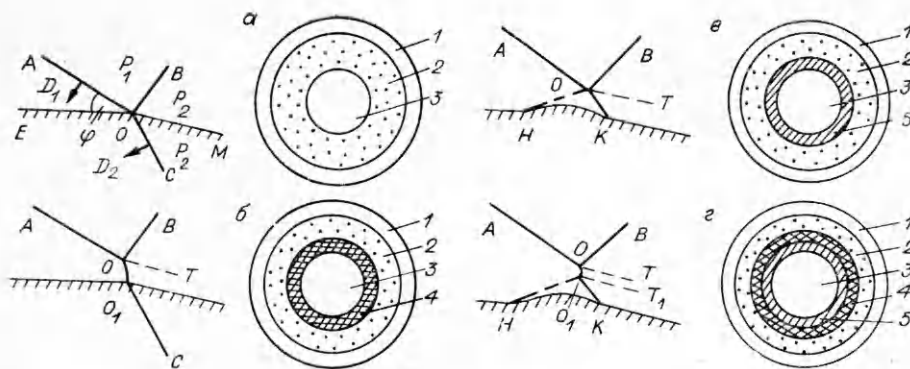
1. Введение. При компактировании порошковых материалов (ПМ) в условиях двумерного взрывного нагружения возможно возникновение зон структурных неоднородностей, расположенных вблизи границ раздела ПМ с деформируемой преградой. Такие неоднородности наблюдаются, например, в порошковых компактах цилиндрической формы, содержащих внутри монолитный стержень [1, 2], или при нанесении ПМ на плоскую металлическую подложку [3, 4]. Результаты металлографии позволяют выделить два основных типа неоднородностей: высокотемпературные («горячие») зоны, структура которых свидетельствует о значительном разогреве ПМ в процессе компактирования [1, 3, 4], и низкотемпературные («холодные») зоны, где процесс компактирования не сопровождается существенным повышением температуры [2].

В настоящее время нет устоявшейся точки зрения на механизмы возникновения указанных неоднородностей. Причина в том, что в большинстве работ выводы основываются главным образом на результатах металлографии структуры компактов, сохраненных после нагружения. При этом утрачивается наиболее ценная информация, касающаяся поведения ПМ в динамике, т. е. в момент нагружения. Результаты металлографии являются лишь косвенными свидетельствами динамических процессов, протекающих в ПМ, и нередко допускают неоднозначную интерпретацию. Это создает широкие возможности для выдвижения существенно различных концепций.

Естественный путь внесения ясности в рассматриваемую проблему — проведение комплексных исследований, сочетающих анализ структуры сохраненных образцов с прямыми экспериментальными наблюдениями картины течения ПМ в момент нагружения и численными расчетами областей существования различных режимов течения. Это определило цель настоящей работы, которая заключалась в изучении возможных вариантов течений, возникающих при наклонном отражении ударных волн (УВ) в ПМ от поверхности монолитной металлической преграды, и выяснении влияния картины течения на структурные особенности получаемых компактов.

2. Исследуемые материалы. Эксперименты проводились на порошках титана, никеля, меди, моноконида титана (TiNi) и оловянистой бронзы. Бронзовые частицы имели форму, близкую к сферической. Форма частиц остальных порошков неправильная. Дисперсность изменялась в диапазоне от 20—50 до 400—630 мкм. Исходная плотность ПМ составляла 30—63 % плотности монолитного состояния.

В экспериментальных сборках преграды изготавливались из алюминия, меди, никеля и молибдена. В численных расчетах использовался также бериллий. Такой выбор объектов изучения обусловлен широким спектром изменения физико-механических характеристик и практической значимостью некоторых из них для решения конкретных задач.



Р и с . 1

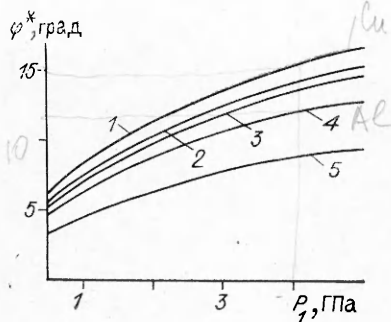
3. Методы экспериментальных исследований и численного счета. Экспериментальные наблюдения режимов течения и численные расчеты проводились в плоской двумерной постановке, а изучение структуры ПМ после взрывного нагружения — на осесимметричных компактах с центральным стержнем. Схемы нагружений аналогичны [1—4]. В большинстве экспериментов толщина слоя ПМ много меньше диаметра центрального стержня, что позволяло пренебречь эффектом кумуляции УВ в процессе ее схождения к оси образца. Параметры осесимметричного нагружения ПМ были близки к параметрам нагружения в плоской постановке. Скорость детонации заряда взрывчатого вещества изменялась в диапазоне 3,0—7,6 км/с. Интенсивность падающей УВ в ПМ 1—5 ГПа.

Картина течения ПМ в момент нагружения регистрировалась с помощью методов импульсного рентгенографирования [5] и сверхскоростной оптической регистрации ударно-волновых конфигураций в момент выхода на свободную поверхность экспериментальной сборки [6]. Численные расчеты проводились на основе методики, описанной в [7, 8]. Структура сохраненных компактов изучалась на оптическом микроскопе.

4. Результаты. А. *Режимы двумерных течений и структуры пограничных зон.* На рис. 1 представлены результаты исследований возможных вариантов течений, возникающих при наклонном отражении падающей УВ AO от поверхности преграды EM . При малых углах падения реализуется регулярный режим отражения (рис. 1, а). Он характеризуется наличием двух ударно-волновых фронтов в ПМ (падающего AO и отраженного OB) и одного OC в материале преграды. Точка ветвления фронтов расположена на отражающей поверхности. Образцы, спрессованные при таком режиме течения, имеют однородную структуру во всей области 2, включая зоны, граничащие со стенкой ампулы сохранения 1 и преградой (стержнем) 3.

При углах падения φ , превышающих некоторое критическое значение φ^* , происходит качественное изменение картины течения. Точка ветвления падающего и отраженного фронтов отходит от поверхности преграды и в ПМ возникает третья УВ — маховская OO_1 . Такие режимы отражения называют маховскими или нерегулярными. Течение за маховской и отраженной УВ может быть довольно сложным. На рис. 1, б изображен простейший случай, когда области течений за фронтами маховской и отраженной УВ разграничиваются поверхностью тангенциального разрыва OT .

Существенным отличием состояния ПМ за фронтом маховской УВ по сравнению с прилегающим слоем материала, сжатого отраженной УВ, является значительно большее приращение тепловой энергии. Иногда оно может привести к плавлению и даже испарению ПМ в последующей разгрузке [9]. Проведенные в настоящей работе металлографические исследования показывают, что в образцах, скомпактированных в условиях нерегулярного отражения УВ, имеются «горячие» зоны 4, прилегающие



Р и с . 2

к поверхности преграды. Толщины зон сравнимы с высотой маховской ножки OO_1 .

Сопоставление полученных результатов с данными [3, 10, 11] позволяет утверждать, что физическая природа образования «горячих» зон та же, что и природа возникновения «центральных» зон при взрывном компактировании цилиндрических пористых тел. Она обусловлена перераспределением энергии ударного сжатия по объему компакта при нерегулярных режимах отражения УВ. Можно предположить, что и механизмы образования «горячей» зоны в основном сходны с

механизмами, рассмотренными в [10, 11]. В пользу этого свидетельствуют одинаковые качественные изменения структуры обеих («горячей» и «центральной») зон при количественных изменениях параметров маховской УВ.

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов зависимости критического угла φ^* от интенсивности падающей УВ P_1 в пористой меди (исходная плотность $5,6 \text{ г/см}^3$) для различных преград: 1 — медной, 2 — никелевой, 3 — молибденовой, 4 — алюминиевой, 5 — бериллиевой. Отметим один факт, который, по нашему мнению, заслуживает внимания. Обычно при одномерных ударно-волновых отражениях течение определяется одним параметром преграды — ее акустическим импедансом (при фиксированном ПМ и амплитуде падающей УВ). Взаимное расположение кривых на рис. 2 показывает, что при двумерных отражениях акустический импеданс не является единственным параметром, определяющим структуру течения и, в конечном итоге, состояние ударно-сжатого ПМ. Из анализа расчетных уравнений следует, что второй параметр, существенно влияющий на положение рассматриваемых границ, — это скорость распространения пластической УВ в материале преграды.

Схемы течений, приведенные на рис. 1, а, б, реализуются при условии $V(P_1) > D_2(P_2)$ ($V(P_1) = D_1(P_1)/\sin \varphi$ — скорость распространения нагрузки по поверхности преграды, $D_1(P_1)$ — скорость распространения падающей УВ в ПМ, $D_2(P_2)$ — пластической УВ в ПМ преграды, P_2 — давление отражения).

Увеличение φ при фиксированной амплитуде падающей волны P_1 приводит к ослаблению неравенства, а при превышении некоторого критического φ^0 — к изменению знака неравенства на противоположный. При этом происходит изменение характера течения. Возникает качественно новый режим, представленный на рис. 1, в. Его особенность заключается в появлении бугра деформации на поверхности преграды в окрестности области повышенного давления HK и как следствие — в импульсном воздействии на ПМ со стороны преграды.

Об этом свидетельствуют результаты рентгенографии структуры течения ПМ в момент нагружения. На снимках фиксируется зона повышенной плотности, фронтальная граница которой обозначена OH . Оптическая регистрация ударно-волновых конфигураций при таких режимах нагружения становится невозможной из-за экранировки свечения вследствие опережающего выхода на поверхность экспериментальной сборки возмущений, распространяющихся по материалу преграды.

Понятие фронтальной границы зоны повышенной плотности OH весьма условно. Это может быть фронт слабой УВ или передняя граница волны сжатия. Металлография сохранных после нагружения компактов показывает, что в зависимости от условий нагружения толщина рассматриваемой зоны может быть существенно разной: либо сравнимой со средним размером частиц, либо превышающей его на порядок. Очевидно, что в такой ситуации понятие «волна сжатия» не всегда применимо в общепринятом значении этого термина. Однако для упрощения описания

механизма образования структурных неоднородностей вблизи поверхности преграды в дальнейшем будем называть границу $ОН$ фронтом отошедшей волны сжатия. По нашему мнению, такое упрощение не вносит принципиальных ошибок в приведенные ниже качественные рассуждения.

Таким образом, в рассматриваемом случае взаимодействие падающей УВ происходит не с поверхностью преграды, а с пограничной зоной подпрессованного ПМ. Такое взаимодействие сопровождается возникновением отраженных волн $ОВ$, $ОК$ и поверхности тангенциального разрыва скоростей $ОТ$ (рис. 1, $в$). Причем в отличие от режима течения, показанного на рис. 1, $б$, основное уплотнение пограничной зоны 5 осуществляется сравнительно слабым импульсным воздействием $ОН$. Поэтому она является «холодной» по отношению к области 4.

Толщина «холодной» пограничной зоны зависит от нескольких причин. Одна из главных — амплитуда бугра деформации, которая, в свою очередь, определяется скоростью перемещения материала преграды по нормали к поверхности и временным интервалом, на котором происходит это перемещение. Последний зависит от разности скоростей $D_2 - V$.

Взаимодействие падающей и отошедшей волн может происходить в нерегулярном режиме (рис. 1, $г$), который имеет место при углах падения, превышающих критическое значение $\widehat{\varphi}$. Возникающая при этом маховская УВ $ОО_1$ вносит свой вклад в формирование структуры пограничной зоны: она состоит из чередующихся «холодного» 5 и «горячего» 4 слоев.

В зависимости от амплитуды падающей УВ и угла падения структура «горячего» слоя 4 может быть весьма различной [12—14]. В частности, она либо представляет собой однородный застывший расплав, либо состоит из чередующихся слоев, отличающихся пористостью, микротвердостью, характером травления и т. д. Качественно аналогичные структуры наблюдались в «центральной» зоне осесимметричных компактов [10, 11].

Рассмотренные выше три критических значения углов падения УВ на поверхность преграды (φ^* , φ^0 и $\widehat{\varphi}$) зависят от динамических сжимаемостей нагружаемого ПМ, материала преграды и возникающих в них параметров течений. В настоящей работе не проводился расчет $\widehat{\varphi}(P_1)$ из-за трудностей, связанных с определением параметров течений в области $ОНК$. Однако, основываясь на данных импульсного рентгенографирования и металлографии, можно утверждать, что в исследованном диапазоне параметров нагружения выполнялись соотношения $\varphi^* < \varphi^0 < \widehat{\varphi}$.

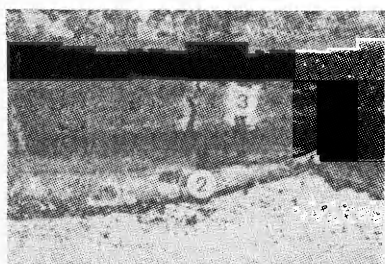
Б. Пограничные эффекты на поверхностях преград сложной формы. Специальная серия экспериментов была посвящена изучению структуры осесимметричных компактов, содержащих центральные стержни сложной конфигурации. Стержни имели форму многоступенчатой гантели, т. е. состояли из нескольких цилиндрических участков различных диаметров, соединяющихся коническими поверхностями противоположной ориентации. Такая конфигурация стержней позволяла варьировать угол падения УВ на отражающую поверхность в сторону увеличения и уменьшения по отношению к углу падения на цилиндрическую поверхность. В наших экспериментах изменение угла падения достигало $\pm 20^\circ$, что соответствовало изменению скорости V от нескольких процентов до нескольких сотен процентов (в зависимости от начального значения φ).

Результаты металлографии сохранных после нагружения образцов показали наличие прямой корреляции между разностью скоростей $D_2 - V$ и толщиной «холодной» зоны: последняя возрастала с увеличением указанной разности и достигала 15—20 размеров частиц ПМ. На тех участках образцов, где имело место обратное соотношение скоростей, «холодная» зона отсутствовала.

При определенных условиях нагружения в сохранных компактах можно наблюдать «остановленный» бугор деформации. На рис. 3 дана фотография бугра деформации 1 на поверхности алюминиевого стержня.

Механизм
10 слоев
по
направлению
утолщения
компрессии

Аркадь
форма -
замысел
не р.
1000
1000/1000



Р и с . 3

ПМ — бронзовые частицы дисперсностью 50—100 мкм. Цифрами 2 и 3 обозначены «холодная» и «горячая» зоны в ПМ. Как правило, рассматриваемый эффект наблюдается на конических поверхностях, ориентация которых способствует увеличению скорости распространения нагрузки V . «Остановившийся» бугор регистрировался в тех компактах, где течение ПМ над цилиндрической поверхностью стержня осуществлялось в режиме рис. 1, 2.

Принимая во внимание конечную скорость изменения амплитуды бугра деформации при изменении параметров нагружения, полагаем, что его «остановка» на конических поверхностях обусловлена резким переходом разности скоростей $D_2 - V$ от положительного значения к отрицательному и как следствие опережением переднего фронта бугра фронтом маховской УВ.

В. Пограничные эффекты на поверхностях преград с разными акустическими свойствами. В некоторых экспериментах использовались цилиндрические стержни, составленные из двух или нескольких секций одинакового диаметра. Секции изготавливались из материалов с заметно отличающимися акустическими импедансами и (или) скоростями распространения возмущений. Торцы секций тщательно шлифовывались. Такая постановка экспериментов позволяла иметь информацию о влиянии акустических свойств преграды на структуру пограничной зоны ПМ.

В результате металлографии полученных компактов установлено, что при фиксированных параметрах нагружения «холодная» зона в ПМ возникала на поверхностях лишь тех секций, для которых выполнялось условие $(D_2 - V) > 0$. В опытах не обнаружено взаимосвязи между рассматриваемым эффектом и акустическим импедансом материала преграды.

Довольно трудно учесть и оценить влияние механических характеристик материала преграды на толщину «холодной» зоны, качественно оно заключалось в уменьшении толщины «холодной» зоны с увеличением прочностных свойств преграды.

Отметим, что в пределах некоторого начального участка секции происходило плавное изменение толщины «холодной» зоны. Длина переходного участка (т. е. той части секции, на которой толщина «холодной» зоны выходила на стационарное значение) зависела от параметров нагружения и физико-механических свойств преград. В настоящей работе данный вопрос специально не изучался, полагаем, что в целом это тема отдельного большого исследования.

Г. Влияние дисперсности ПМ на структурные особенности компактов вблизи поверхности преграды. Одна из основных характеристик пористых сред — дисперсность (или средний размер частиц). В общем случае рассмотрение пористых сред без учета их дискретной структуры означает отрыв от реальности. Однако это утверждение относится к разным задачам в различной степени, т. е. есть задачи более и менее чувствительные к характерному размеру пористой среды. Выяснение влияния дисперсности ПМ на структурные особенности компактов вблизи поверхности преграды важно по нескольким причинам. Одна из них обусловлена необходимостью правильного выбора определяющего параметра при построении математической модели образования «холодной» пограничной зоны.

В настоящей работе проведена серия экспериментов по изучению структуры взрывных компактов, полученных из ПМ разной дисперсности при одинаковых условиях нагружения. Нагружение проводилось в осесимметричных ампулах с центральным стержнем. Порошок засыпался в ампулу послойно. Слои отличались дисперсностью, но имели одинаковую исходную плотность. Для предотвращения проникания одной фракции в межчастичное пространство другой между слоями располагали

лись прокладки из тонких металлических фольг. Высота каждого слоя (т. е. размер вдоль оси ампулы) много больше его толщины.

Результаты металлографии показывают, что в исследованном диапазоне параметров нагружения и изменения дисперсности ПМ толщина «холодной» зоны не зависит от размера частиц, а число частиц, уместающихся в зоне, убывает с увеличением их размера. Заметим, что этот вывод хорошо согласуется с данными [15].

В свете рассматриваемой проблемы нельзя обойти вниманием и тот факт, что изменение размера частиц ПМ в несколько раз при фиксированных исходной плотности и параметрах нагружения приводит к пропорциональному изменению ширины фронтов падающей и маховской УВ [15]. Таким образом, можно говорить о полном отсутствии корреляции между шириной фронта УВ и толщиной «холодной» зоны.

В связи с этим отметим, что в наших экспериментах амплитуда маховской УВ, как правило, составляла несколько ГПа и, значит, ширина ее фронта не превышала среднего размера частиц [15, 16]. Однако в зависимости от дисперсности ПМ и материала преграды (стержня) толщина «холодной» зоны могла изменяться на порядок.

Понимание полученных результатов с позиций структур течений, показанных на рис. 1, *в*, *г*, не вызывает затруднений. Фиксированные исходная плотность ПМ и параметры нагружения позволяют предположить, что независимо от размера частиц ПМ имеют место близкие условия формирования бугра деформации на поверхности преграды. Следовательно, должны быть одинаковыми импульсные воздействия на ПМ со стороны преграды, обусловленные наличием бугра. В свою очередь это означает одинаковые объемы порового пространства, выбираемого в ПМ в результате указанных воздействий, и, в конечном итоге, толщины «холодных» зон.

Отсюда понятно, что в задаче о математическом моделировании «холодной» пограничной зоны характерным параметром является не размер частиц ПМ, а амплитуда бугра деформации, возникающего на поверхности преграды.

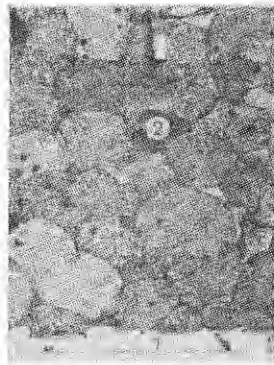
Д. Деформация сферических частиц ПМ. Известно [17], что использование во взрывных экспериментах ПМ из частиц сферической формы весьма полезно и информативно. Например, на основе результатов металлографии характера деформации частиц можно получать дополнительную информацию о величине и направлении распространения импульсной нагрузки по объему образца.

Проведенные нами исследования формы сферических бронзовых частиц после взрывного компактирования в осесимметричной постановке дают основание для следующих утверждений.

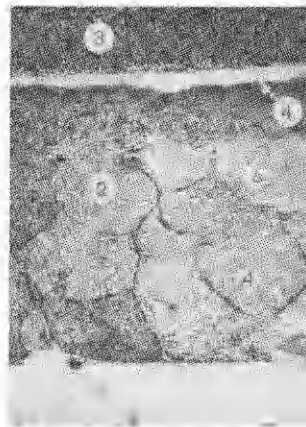
1. При регулярных режимах отражения УВ от поверхности преграды (рис. 1, *а*) формоизменение сферических частиц носит одинаковый характер во всей области 2. Типичная фотография продольного сечения компакта дана на рис. 4. Видно, что форма частиц в области 2 соответствует направлению распространения импульса сжатия от стенки ампулы (на фотографии не показана) к преграде 1.

2. При режимах течения, приведенных на рис. 1, *в*, *г*, импульсы сжатия в периферийной 2 и «холодной» 5 зонах имеют разные направления: в периферийной — к преграде, в «холодной» — от преграды.

3. Интенсивность импульсного воздействия на ПМ в «холодной» зоне определяется свойствами материала преграды (при прочих равных условиях). 4. Плотность ПМ в «холодной» зоне близка к плотности монолитного состояния. Однако в большинстве экспериментов не обнаружено явно выраженных металлографических признаков наличия межчастичных связей. Согласно [12—14], причина заключается в малой амплитуде отошедшей волны или плавном нарастании параметров нагружения. В некоторых случаях, например при больших амплитудах падающей УВ и низких прочностных характеристиках материала преграды, импульсное воздействие на ПМ со стороны преграды носит ударно-волновой характер. Это



Р и с . 4



Р и с . 5

видно из фотографии продольного сечения компакта, приведенной на рис. 5, где 1 — алюминиевый стержень, 2 — «холодная» зона, 3 — нижняя часть «горячей» зоны, 4 — узкая полоса материала, не поддающаяся травлению в процессе приготовления шлифа. Интенсивные пластические деформации тыльных поверхностей частиц ПМ в зоне 2 и, в частности, струйный характер взаимодействия частиц А и Б свидетельствуют о том, что амплитуда отошедшей УВ превышает динамический предел прочности компактируемого материала в несколько раз [17]. При этом не наблюдалось струйных течений частиц в зоне, уплотненной падающей УВ.

Весьма интересным фактом является наличие на фотографии светлой полосы 4; полагаем, что ее возникновение связано с дополнительным тепловыделением, обусловленным тангенциальным разрывом скоростей на поверхности O_1T_1 в момент нагружения. Импульсный характер такого тепловыделения и большие скорости теплоотвода [14] в сторону «холодной» зоны допускают возможность образования метастабильных структур в зоне 4. В пользу этого свидетельствуют также результаты измерений твердости частиц: 100 Нv в исходном состоянии, 190 в зоне 2, 130 в зоне 3 и 380 в зоне 4.

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать следующие выводы. 1. Возникновение «горячих» и «холодных» пограничных зон в процессе взрывного компактирования ПМ обусловлено особенностями двумерных течений вблизи границы раздела с преградой: неоднородностями по скорости, тепловой энергии, плотности и другим параметрам. 2. Физическая природа появления «горячих» зон аналогична природе «центральных» зон, возникающих при взрывном компактировании цилиндрических пористых тел [10, 11]. Она вызвана нерегулярными режимами отражения УВ от поверхности преграды, сопровождающимися значительным приростом тепловой энергии и массовой скорости ПМ за фронтом маховской волны по сравнению с прилегающими относительно холодными слоями. 3. Возникновение «холодных» зон наблюдается только в тех случаях, когда скорость распространения нагрузки по поверхности преграды меньше скорости распространения пластической УВ в материале преграды. Эффект обусловлен импульсным воздействием на ПМ со стороны преграды, которое, в свою очередь, вызвано появлением бугра пластической деформации на ее поверхности.

Вполне возможно, что в настоящей работе не нашли освещения некоторые аспекты исследуемой проблемы и приведенные выше схемы течений не исчерпывают все варианты. В то же время рассмотренные схемы, на наш взгляд, наиболее показательны и вполне достаточны, чтобы понять важные в практическом отношении закономерности образования структурных неоднородностей, активно влиять на них и успешно использовать при решении конкретных задач.

В заключение укажем, что впервые «холодная» зона была экспериментально зарегистрирована на осесимметричных компактах в [2]. Однако авторы связывают причину ее возникновения с конечной шириной фронта УВ в ПМ. Нетрудно показать, что такая точка зрения накладывает принципиальные ограничения на точность определения критических углов перехода регулярных режимов отражения УВ в нерегулярный и, таким образом, ставит под сомнение достоверность результатов [6—8]. Поэтому необходимо специально отметить, что полученные в настоящей работе данные позволяют признать указанную концепцию недостаточно обоснованной.

Автор благодарит А. С. Старостину за помощь в проведении экспериментов, В. М. Фомина и В. Ф. Нестеренко за плодотворное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабуль В., Багровский Я., Бережанский К. Взрывная прессовка порошков // ФГВ.— 1975.— № 2.
2. Kusubov A. S., Nesterenko V. F., Wilkins M. L., Resugh J. E. et al. Dynamic deformation of powdered materials as a function of particle size // Mater. of Intern. semin. on high energy working of rapidly solidified materials.— Novosibirsk, 1989.
- [3. Kostjukov N. A. Formation mechanism of metallurgical inhomogeneities accompanying shock compaction of porous metals // Shock waves and high — strain — rate phenomena in metals: Proc. Intern. Conf., Albuquerque, New Mexico, 1980.— N. Y.: Plenum Press, 1981.
4. Каунов А. М. Формирование металлургических слоев при высоких давлениях // Порошковая металлургия.— 1983.— № 9.
5. Ставер А. М., Костюков Н. А., Кузьмин Г. Е. Исследование течения за косой ударной волной при взрывном прессовании порошков // Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами: Матер. II Международ. симп., Марианские Лазне, 1973.— Пардубице, ЧССР, 1974.— Т. 2.
6. Костюков Н. А., Сагдиев Ф. А. Определение критических параметров отражения УВ в порошковых композиционных материалах // ФГВ.— 1989.— № 1.
7. Костюков Н. А. Особенности наклонного отражения от преграды ударных волн в порошках // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики.— 1977.— Вып. 29.
8. Костюков Н. А., Кузьмин Г. Е. О влиянии исходных характеристик среды на параметры отражения ударных волн // ПМТФ.— 1985.— № 1.
- [9. Костюков Н. А. Экспериментальное исследование расширения пористого тела после выхода маховской ударной конфигурации на его поверхность // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики.— 1980.— Вып. 48.
10. Костюков Н. А. Связь структуры течения с закономерностями уплотнения при импульсном прессовании пористых сред // Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами: Матер. VI Международ. симп., Готтвальдов, 1985.— Пардубице, ЧССР, 1985.
11. Костюков Н. А., Кузьмин Г. Е. Критерий возникновения макронеоднородностей типа «центральной зоны» при ударно-волновом воздействии на пористые среды // ФГВ.— 1986.— № 5.
12. Morris D. G. Bonding processes during the dynamic compaction of metallic powders // Mater. Sci. and Engng.— 1983.— V. 57.— P. 187.
13. Роман О. В., Горобцов В. Г., Пикус И. М. Особенности формирования порошковых материалов методами взрывного нагружения // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб.— Минск: Высшейш. шк., 1983.— Вып. 7.
14. Schwartz R. B., Kasiraj P., Vreeland T., Ahrens T. J. Theory for shock-wave consolidation of powder // Acta metallurg.— 1984.— V. 32, N 8.
15. Нестеренко В. Ф. Нелинейные явления при импульсном нагружении гетерогенных конденсированных сред: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук.— Новосибирск, 1988.
16. Gourdin W. H., Weinland S. L. Hugoniot measurements on unsintered metal powders // Shock waves in condensed matter: Proc. of the Amer. Phys. Soc. Top. Conf.— Santa Fe, New Mexico, 1983.
17. Mamalis A. G., Gioltsidis G. N., Szalay A. The shock wave compaction of copper powder rectangular thin plates in multistages // Mater. of X Intern. Conf. on High Energy Rate Fabrication.— Ljubljana, Yugoslavia, 1989.