

жение x_2 (устойчивое стационарное состояние 2 на рис. 3), расплав пропитывает твердую фазу и кристаллизуется. Теплопроводность гарнисажа скачком увеличивается, так как теплопроводность закристаллизовавшегося слоя значительно выше теплопроводности порошкообразной шихты. Скачку теплопроводности отвечает резкое уменьшение значения V . В случае $V > V_*$ межфазная граница занимает новое стационарное положение $x_* < x < x_2$; при $V < V_*$ по диэлектрику от периферии к центру распространяется волна кристаллизации.

Авторы выражают благодарность А. П. Алдушину, В. В. Грачеву, И. А. Канаеву и В. А. Князику за полезные обсуждения настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В. И., Осико В. В., Прохоров А. М., Татаринцев В. М. Новый метод получения тугоплавких монокристаллов и плавящихся керамических материалов // Вести. АН СССР.— 1973.— № 12.
2. Александров В. И., Осико В. В., Прохоров А. М., Татаринцев В. М. Получение высокотемпературных материалов методом прямого высокочастотного плавления в холодном контейнере // Успехи химии.— 1978.— Т. 47, вып. 3.
3. Александров В. И., Иофис Н. А., Осико В. В. и др. Фианиты и перспективы их практического использования // Вести. АН СССР.— 1980.— № 6.
4. Мержанов А. Г., Радучев В. А., Руманов Э. Н. Тепловые волны плавления и кристаллизации диэлектрика // ДАН СССР.— 1980.— Т. 253, № 2.
5. Петров Ю. Б., Шкульков А. В., Неженцев В. В., Канаев И. А. Анализ электрических характеристик индукционных печей с холодным тиглем для плавки окисных материалов // Электротехника.— 1982.— № 8.
6. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов.— Л.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Смирнов Ю. Н., Шкульков А. В., Канаев И. А. Температура расплава оксида в стационарном режиме плавки в индукционных печах с холодным тиглем // Изв. вузов. Электромеханика.— 1984.— № 9.
8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.— М.: Наука, 1964.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука, 1982.
10. Баутин Н. Н., Леонтович Е. А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости.— М.: Наука, 1976.
11. Истратов А. Г., Либрович В. Б. Об устойчивости решений в стационарной теории теплового взрыва // ПММ.— 1963.— Т. 27, № 2.
12. Руманов Э. Н. Волна плавления пористого вещества.— Черноголовка, 1982.— (Препр./ОИХФ АН СССР).

г. Черноголовка

Поступила 25/III 1987 г.,

в окончательном варианте — 9/VIII 1988 г.

УДК 532.593

Н. А. Костюков

МЕХАНИЗМ РАССЛОЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Известно, что двумерное ударно-волновое нагружение порошковых композиционных материалов (ПКМ), представляющих собой механические смеси разнородных твердых частиц, нередко приводит к чрезвычайно неравномерному распределению (расслоению) компонентов после нагружения [1, 2]. Возможна, например, такая ситуация: в некотором объеме ударно-сжатого образца концентрация одного из компонентов становится в несколько раз выше, чем в прилегающих областях. Это неудобное с точки зрения практических приложений свойство ПКМ делает весьма актуальной задачу создания критерия расслоения. Вопрос, который предстоит решить, — какими должны быть ударно-волновые параметры, чтобы после нагружения материал оставался однородным.

Первый и необходимый шаг в этом направлении — создание физической модели, способной правильно отражать механизм процесса, приводящего к расслоению. В [1, 2] рассматриваются возможные подходы к модельному описанию результатов, полученных на смесях медь—нитрид бора и медь—графит. Ниже проведен анализ этих

© 1990 Костюков Н. А.

моделей, приводятся новые экспериментальные данные, которые не укладываются в рамки существующих представлений, и предлагается новая физическая модель, качественно описывающая все известные к настоящему времени результаты по расслоению ПКМ.

Анализ существующих моделей расслоения. В [1] при взрывном компактировании смеси порошков нитрида бора с медью в цилиндрических ампулах сохранения наблюдалось возникновение области повышенной концентрации меди в центральной части спрессованного образца. Область имела вид симметричного относительно оси ампулы кольцевого слоя. Для объяснения эффекта предложена модель, согласно которой расслоение происходит в тех случаях, когда в нагружаемой смеси реализуется нерегулярный (маховский) ударно-волновой режим течения. Предполагается, что расслоение обусловлено наличием значительного радиального градиента скорости течения смеси вблизи поверхности тангенциального разрыва, разделяющей области течений за фронтами маховской и отраженной ударных волн (УВ). Фактически все сводится к известному эффекту миграции взвешенных частиц по направлению к оси трубы при течении Пуазейля.

Для приближенных численных сопоставлений принималось, что в зоне существования максимального градиента скорости течения медь находится в расплавленном состоянии. На это указывали результаты исследования структуры сохраненных образцов. Оценки проводились на основе экспериментальных данных по определению силы, действующей на частицы диаметром 1,55—32 мм в пристеночной области течения Пуазейля [3]. Приняв вязкость жидкой меди в ударно-сжатом состоянии равной ее значению при атмосферном давлении, различие в скоростях потоков за маховской и отраженной волнами порядка скорости распространения фронта маховской волны, а время существования градиентного течения несколько микросекунд, авторы [1] получили удовлетворительное согласие расчетного и экспериментального значений ширины кольцевого слоя, в котором понижена концентрация твердого компонента (нитрида бора).

Однако эти оценки справедливы лишь для одиночных гладких сфер в установившемся ламинарном потоке, т. е. для условий, которые заведомо не выполняются при компактировании ПКМ в цилиндрических ампулах сохранения. В [4] экспериментально показано, что даже небольшие шероховатости сферической частицы приводят к существенному увеличению силы ее взаимодействия с обтекающим потоком. Для частиц ПКМ, имеющих сложную морфологию, предположение о сферичности может увести далеко в сторону от реальных условий обтекания. Кроме того, коэффициент вязкости зависит от параметров состояния вещества и скорости его нагружения [5, 6], поэтому использование значения вязкости при атмосферном давлении для описания процессов, протекающих за фронтом УВ, сомнительно, а результаты оценок, приведенных в [1], неубедительны.

Авторы [1] допускают существование других механизмов расслоения, поскольку в экспериментах наблюдалось разделение частиц в широком диапазоне изменения концентраций компонентов смеси, в том числе когда один из компонентов нельзя рассматривать как «взвешенный» в потоке другого.

В [2] зафиксировано расслоение медно-графитовой смеси. Постановка экспериментов аналогична [1], однако внешне эффект выглядит иначе: после нагружения частицы графита концентрировались вблизи оси прессовки, образуя ядро цилиндрической формы. Медь при этом вытеснялась к периферии. Для объяснения наблюдаемого эффекта автор [2] также привлекает предположения о нерегулярном ударно-волновом режиме в ампуле и плавлении меди за маховской волной, но механизм расслоения предлагает другой. Предполагается, что поток вещества за фронтом маховской УВ имеет сложную спиральную структуру, сочетающую перемещение вдоль оси ампулы с мощным вихревым течением вокруг оси. В результате медный расплав отбрасывается к периферийной области потока, а твердые частицы графита концентрируются у его оси.

Автор ограничивается качественным объяснением, не прибегая к численным оценкам. Однако несложный анализ сразу же демонстрирует принципиальный дефект предложенного механизма. Из соотношений, приведенных в [7], следует, что в рамках рассматриваемой модели для обеспечения конечной скорости радиального перемещения твердых частиц угловая скорость вращения потока за фронтом маховской УВ должна возрастать с уменьшением радиуса вращения как $r^{-1/2}$. Это требование находится в противоречии с результатом анализа причин закручивания потока [2], который показывает, что при стремлении радиуса вращения к нулю скорость вращения потока уменьшается вплоть до полной его остановки. Таким образом, вихревая модель расслоения внутренне противоречива.

Новые экспериментальные данные. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования эффекта расслоения на значительно более широком наборе ПКМ, чем в [1, 2]. При этом установлено, что возможны случаи расслоения, которые не могут быть объяснены описанными выше механизмами, поскольку происходят в условиях, не отвечающих принятым допущениям.

Эксперименты проводились на бинарных смесях, в состав которых входили порошки металлов, карбидов, нитридов, окислов и других материалов с широким спектром теплофизических и механических характеристик. Размеры частиц обоих компонентов были приблизительно одинаковы и не превышали 100 мкм. Исходная плотность композита составляла 40—80 % плотности монолитного состояния. Постановка экспериментов аналогична описанной в [1, 2]. Внутренние диаметры ампул сохранения изменялись от 3,7 до 15 мм, длина составляла 10—15 диаметров. Заряды взрывчатого вещества (ВВ) изготавливались из аммонита 6ЖВ, гексогена и их смесей. После ударного нагружения проводились металлографические исследования структуры сохраненных образцов. Для приготовления шлифов ампулы разрезались по плоскостям, перпендикулярным и параллельным оси.

Полученные результаты приведены в таблице. Они позволяют сделать следующие утверждения.

1. Вопреки существующим представлениям, расслоение ПКМ возможно без перехода одного из компонентов в жидкое состояние. Так, в экспериментах 5, 9, 15, 16 наблюдалось увеличение концентрации тяжелого компонента вблизи оси образца, хотя энергия УВ была значительно меньше энергии, необходимой для полного плавления наиболее легкоплавкого компонента.

В принципе даже слабое ударное воздействие может оплавить частицы с поверхности [8, 9]. Однако наличие «холодных» ядер и относительно небольших толщин жидкотекучего слоя означает неприменимость моделей расслоения [1, 2]. Для оценки максимально возможной толщины расплава воспользуемся идеализированной картиной ударного сжатия ПКМ, базирующейся на следующих допущениях: а) доля энергии, затрачиваемая на создание дефектов кристаллической структуры частиц и их хрупкое разрушение, много меньше полной энергии ударного сжатия; б) упругая энергия не запасается, вся энергия ударного сжатия расходуется на увеличение тепловой энергии вещества; в) тепловая энергия выделяется мгновенно и концентрируется на поверхности частиц; г) вся энергия ударного сжатия запасается лишь в одном (i -м) компоненте смеси.

Тогда для определения массовой доли расплава i -го компонента L_i приходим к соотношению

$$L_i = (D\Delta V)^2 / \{2V_0^2 [c_{pi}(T_{*i} - T_0) + H_i] \alpha_i \rho_i\},$$

где D — скорость распространения УВ; V_0 — удельный объем смеси в невозмущенном состоянии; ΔV — изменение удельного объема смеси в процессе ударного сжатия; T_0 — исходная температура; ρ_i , c_{pi} , T_{*i} , H_i и α_i — плотность, теплоемкость, температура плавления, скрытая теплота плавления и массовая доля i -го компонента. Толщина расплавленно-

Номер эксперимента	Состав ПКМ	Массовое соотношение компонентов	Относительная плотность, %	Диаметр ампулы, мм	ВВ	Характер расслоения	Источник
1	Нитрид бора — медь	1/37	50	—	Гексоген + двууглекислый натрий	ТК	[1]
2	Железо — медь	1/1	50	—	» » »	Нет	[1]
3	Графит — медь	—	—	6	Гексоген	ЛЦ	[2]
4	» »	—	—	6	Аммонит 6ЖВ	ЛЦ	[2]
5	Графит — титан	1/4	62	15	» 6ЖВ	ТК	Настоящая работа
6	» »	1/4	45	15	» 6ЖВ	ТЦ	»
7	» »	1/4	62	3,7	» 6ЖВ	Нет	»
8	Карбид титана — сталь Г13	1/1	80	10	» 6ЖВ	»	»
9	» » » Г13	1/1	80	15	Гексоген	ТЦ	»
10	Карбид титана — никелид титана	1/1	59	15	Аммонит 6ЖВ	Нет	»
11	» » » »	1/1	80	15	Гексоген	»	»
12	Магний — свинец	1/1	59	15	Аммонит 6ЖВ	ТЦ	»
13	Магний — вольфрам	1/2	64	15	» 6ЖВ	ТЦ	»
14	» »	1/2	64	6	» 6ЖВ	Нет	»
15	Нитрид бора — вольфрам	2/1	53	15	» 6ЖВ	ТК	»
16	Нитрид бора — нихром	3/17	41	15	» 6ЖВ	ТЦ	»
17	Титан — вольфрам	1/1	67	15	Гексоген	Нет	»
18	Окись алюминия — нитрид алюминия	1/1	53	15	»	»	»
19	Окись магния — медь	1/2	57	15	Гексоген + аммонит 6ЖВ (1/2)	»	»
20	Песок — вольфрам	1/2	42	15	» » »	»	»

87 *Примечание.* Повышена концентрация: ТЦ, ТК — тяжелого компонента в цилиндрическом ядре и кольцевом слое, ЛЦ, ЛК — легкого компонента в цилиндрическом ядре и кольцевом слое.

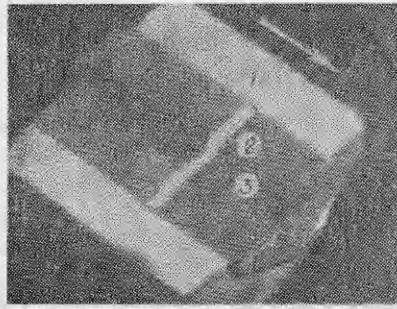


Рис. 1

го слоя $h \approx L_i d/6$ (d — диаметр частиц). Численные оценки показывают, что в рассмотренных экспериментах $h/d \ll 1$. Принимая во внимание, что каждое из вышеназванных допущений приводит к завышению массовой доли расплава, можно ожидать, что реальная толщина жидкотекучего слоя на поверхности частиц значительно меньше расчетной.

2. Наличие высокоскоростного потока за фронтом маховой УВ не является необходимым условием возникновения расслоения. В специальной серии экспериментов в исследуемой порошковой смеси размещались медные пластины толщиной 0,5—1,0 мм, ориентированные перпендикулярно оси ампулы. Пластины предназначались для отсечения высокоскоростного потока. Изучение сохраненных после нагружения образцов показало, что расслоение смеси имеет место по обе стороны пластин (рис. 1), что не согласуется с моделью, предложенной в [1]. На рис. 1 приведена фотография шлифа образца после ударного нагружения (эксперимент 13): 1 — стенка ампулы сохранения, 2 — медная пластина, 3 — область повышенной концентрации тяжелого компонента, стрелкой показано направление распространения детонационной волны.

3. Наряду с наблюдаемым в [2] увеличением концентрации легкого компонента вблизи оси образца в некоторых случаях возможен обратный эффект, характеризующийся увеличением концентрации тяжелого компонента вблизи оси (см. таблицу, эксперименты 6, 9, 12, 13, 16). Причем эффект наблюдается не только тогда, когда энергия маховой УВ заведомо превышает энергию плавления одного из компонентов, но и в тех случаях, когда $h/d \ll 1$.

Таким образом, изложенные в [1, 2] соображения о механизмах расслоения ПКМ в процессе ударного сжатия либо неверны, либо не являются единственно возможными. Отметим, что они получены с использованием ряда предположений и базируются на косвенных данных — результатах исследований структуры образцов, сохраненных после нагружения. Такие данные нередко допускают неоднозначную трактовку, так как наиболее ценная информация о поведении материала в момент нагружения оказывается утраченной.

Инерционная модель расслоения. Источник объективной информации для поиска иных механизмов расслоения — прямое наблюдение картины течения в динамике. При этом значительный интерес представляет экспериментальное исследование структуры течения бинарных смесей твердых частиц в условиях двумерного ударно-волнового нагружения [10], результаты которого отличаются ясностью и свободны от двусмысленности благодаря простоте и наглядности метода импульсного рентгенографирования, с помощью которого они получены.

Основываясь на указанных результатах, можно утверждать, что все многообразие имеющихся к настоящему времени данных по расслоению ПКМ вполне объясняется особенностями структуры течения материала в

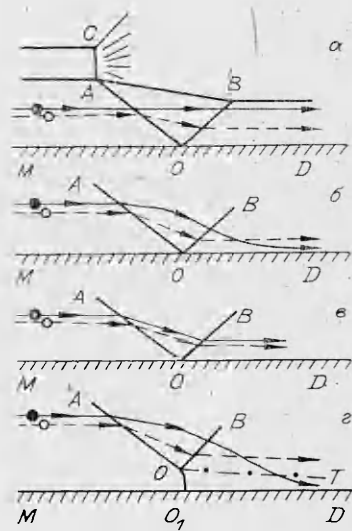


Рис. 2

момент ударного нагружения. Поясним эту мысль на конкретных примерах. На рис. 2 приведены некоторые из вариантов течения, зафиксированных в [10]. Темными и светлыми точками обозначены частицы тяжелого и легкого компонентов смеси, сплошными и штриховыми линиями — их траектории в подвижной системе координат, связанной с фронтом детонации $ВВ$, $АС$ — фронт детонационной волны, $АО$ — фронт падающей $УВ$, $ОВ$ — фронт отраженной $УВ$, $ОО_1$ — фронт маховской $УВ$, $ОТ$ — поверхность тангенциального разрыва, $МD$ — отражающая поверхность (в плоской постановке) или ось симметрии (в осесимметричной постановке). При переходе через фронт $УВ$ тяжелые частицы, обладая большим запасом кинетической энергии, тормозятся в меньшей степени, чем легкие, и в течение некоторого времени продолжают двигаться, плавно меняя направление под влиянием сил межчастичного взаимодействия. В общем случае окончательно выравнивание скоростей тяжелых и легких частиц происходит на некотором расстоянии от фронта. Рис. 2, *а* соответствует слабому силовому взаимодействию частиц тяжелого и легкого компонентов. Это обуславливает наличие значительной скоростной неравновесности в течение всего времени нагружения. В конечном итоге в нагружаемой смеси происходит накопление частиц тяжелого компонента вблизи границы раздела с $ВВ$. По нашему мнению, именно этот эффект определяет специфику расслоения медно-графитовой смеси, наблюдаемого в [2].

Размеры областей скоростной неравновесности за падающей и отраженной $УВ$ могут заметно отличаться. На рис. 2, *б* показана картина течения, при котором соотношение размеров указанных областей таково, что частицы тяжелого компонента окончательно теряют скорость, лишь достигнув отражающей поверхности $МD$. Очевидно, что в таких случаях происходит увеличение концентрации тяжелых частиц вблизи отражающей поверхности, т. е. характер расслоения прямо противоположен рассмотренному выше. Такая картина течения могла реализоваться в экспериментах 6, 9, 12, 13 и 16 (см. таблицу).

Заметим, что преимущественная концентрация одного из компонентов вблизи отражающей поверхности не всегда является постоянным свойством данного ПКМ. При других геометрических размерах экспериментальныхборок эффекта расслоения может и не быть (эксперименты 5, 7 и 13, 14).

На рис. 2, *в* представлена схема течения, при котором размеры областей скоростной неравновесности за падающей и отраженной $УВ$ меньше характерного размера частиц смеси. Такие течения возникают при незначительном отличии масс частиц обоих компонентов или при больших значениях сил межчастичного взаимодействия. Очевидно, что в данном случае эффект расслоения отсутствует и для описания ударно-волновых процессов применимы односкоростные модели ПКМ. Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что отсутствие расслоения наблюдается преимущественно на смесях, состоящих из высокопрочных или близких по плотности компонентов.

Особо отметим, что еще одним стабилизирующим фактором, препятствующим возникновению расслоения, является разветвленность поверхности частиц. Сравнение экспериментов 9 и 11 показывает, что при одинаковых условиях нагружения и приблизительно одинаковых соотношениях плотностей компонентов смесей результат нагружения может быть существенно разным. Мы связываем это с различной морфологией частиц никелида литана и стали Г13: первые были неправильной формы и имели разветвленную поверхность в отличие от вторых, форма которых близка к сферической. Это обеспечивало значительно большую величину сил межчастичного взаимодействия в эксперименте 11 по сравнению с 9.

В случае нерегулярных режимов отражения течения за падающей и отраженной волнами аналогичны рассмотренным выше. За маховской волной в тех областях, где натекающий поток неперпендикулярен поверхности фронта (например, вблизи точки ветвления $УВ$), также возможны эффекты расслоения, наблюдаемые за косыми $УВ$.

Особого внимания заслуживает структура течения, показанная на рис. 2, г, которая соответствует наличию фильтрации тяжелых частиц в области сжатую маховской УВ. При этом в сохранных образцах геометрия области повышенной концентрации тяжелых частиц определяется величиной сил межчастичного взаимодействия. Если эти силы настолько велики, что частицы не могут достичь отражающей поверхности, то зона их повышенной концентрации представляет собой полосу при плоском нагружении или кольцевой слой при осесимметричном, что и наблюдается в экспериментах 1, 5 и 15. В противном случае тяжелые частицы соберутся вблизи отражающей поверхности или оси образца. Отметим, что при слабом межчастичном взаимодействии зона повышенной концентрации тяжелых частиц будет такого же вида, как и при регулярном режиме отражения УВ (рис. 2, б). Поэтому для ответа на вопрос, какой из двух возможных режимов (регулярный или нерегулярный) имел место в экспериментах 5, 9, 12, 13 и 16, необходимо проведение специальных исследований.

Обсуждение результатов. В свете предлагаемой в данной работе инерционной модели расслоения ПКМ существуют три основных фактора, от которых зависит характер расслоения: соотношение масс частиц разнородных компонентов, величина силы межчастичного взаимодействия и длительность УВ, т. е. время, прошедшее с момента пересечения потоком фронта УВ до его взаимодействия с другим ударным фронтом (например, отраженной УВ) или волной разрежения.

При фиксированных параметрах ударного нагружения сила межчастичного взаимодействия определяется теплофизическими и прочностными характеристиками материалов частиц и их морфологией. Временной параметр зависит от геометрических размеров нагружаемого образца. Отсюда следует, что при изменении диаметра ампулы сохранения можно ожидать изменения характера расслоения. Это подтверждают результаты экспериментов 5, 7 и 13, 14.

Физическая модель сама по себе еще не дает количественной связи между величинами, характеризующими описываемый ею процесс. Для решения этого вопроса необходим следующий шаг — построение математической модели. Математическое описание эффекта расслоения ПКМ на основе инерционной модели встречает серьезные трудности. Прежде всего они обусловлены отсутствием каких-либо методов определения сил межчастичного взаимодействия за фронтом УВ, а также разумных подходов к решению краевой двумерной задачи о нагружении слоя ПКМ накладным зарядом ВВ с учетом влияния оболочки ампулы сохранения и скоростной неравновесности компонентов.

В некоторых частных случаях математическое моделирование возможно. Так, если объемная доля тяжелого компонента смеси невелика, а динамическая прочность превышает прочность материала легкого компонента, то, согласно [11], заполнение порового пространства во фронте УВ происходит преимущественно за счет частиц легкого компонента. Форма тяжелых частиц при этом меняется незначительно. Деформация частиц основного компонента в процессе ударного нагружения, как и любой адиабатический процесс, неизменно ведет к повышению температуры. При достаточно больших энергиях ударного воздействия и выполнении неравенства $d/u > d^2/\kappa$ (κ — коэффициент температуропроводности, u — массовая скорость) за фронтом УВ происходит тепловая потеря прочности материала частиц. Это означает, что сила межчастичного взаимодействия уже не зависит от исходных прочностных характеристик материала легкого компонента и определяется главным образом силами поверхностного трения.

Если форма частиц тяжелого компонента близка к сферической (например, гранулы быстрозакаленного материала), то становится возможным описание структуры УВ в рамках задачи обтекания недеформируемых гладких сфер вязкой жидкостью, что позволяет, в свою очередь, прогнозировать диапазон изменения параметров нагружения смеси, в котором величина расслоения компонентов во фронте не превышает заданно-

го значения. При этом эффективное значение коэффициента вязкости предполагается известным.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Р. И. Нигматулину и В. М. Фомину за обсуждение некоторых аспектов данной работы и А. С. Старостиной за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А. А., Нестеренко В. Ф., Ставер А. М. Сепарация компонент при взрывном прессовании многокомпонентных материалов // *Обработка металлов взрывом. Материалы III Междунар. симпоз.* — Марианске Лазне, 1976.
2. Соболев В. В. Возникновение спиральных вихрей в смесевых цилиндрических образцах при ударном сжатии // *Письма в ЖТФ.* — 1984. — Т. 10, вып. 8.
3. Eichhorn R., Small S. Experiments on the lift and drag of spheres suspended in a Poiseuille flow // *J. Fluid Mech.* — 1964. — V. 20, N 3.
4. Селберг Б. П., Николле Д. А. Коэффициент лобового сопротивления сферических частиц небольшого размера // *РГК.* — 1968. — Т. 6, № 3.
5. Степанов Г. В. Коэффициент вязкости металлических материалов при высокоскоростном деформировании в упругопластических волнах нагрузки // *Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах.* — Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1978.
6. Альшуглер Л. В., Доронин Г. С., Ким Г. А. Вязкость ударно-сжатых жидкостей // *ПМТФ.* — 1986. — № 6.
7. Соколов В. И. Современные промышленные центрифуги. — М.: Машгиз, 1961.
8. Нестеренко В. Ф. Ударное сжатие многокомпонентных материалов // *Динамика сплошной среды.* — Новосибирск: ИГ СО АН СССР. — 1977. — Вып. 29.
9. Schwarz R. B., Kasiraj P. et al. A theory for the shock-wave consolidation of powders // *Acta Metallurg.* — 1984. — V. 32, N 8.
10. Костюков Н. А. Структура течения двухкомпонентных смесей твердых частиц в условиях двумерного ударно-волнового нагружения // *ПМТФ.* — 1988. — № 3.
11. Ставер А. М., Кузьмин Г. Е., Нестеренко В. Ф. Экспериментальное исследование ударных волн в пористых средах // *II Совец. по обработке материалов взрывом.* — Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1981.

г. Новосибирск

Поступила 18/III 1988 г.,
в окончательном варианте — 24/VIII 1988 г.

УДК 534.213

А. Д. Зайкин

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ МОДУЛИ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД

Решение задачи деформирования гетерогенной среды часто основывается на гипотезе эффективной гомогенности [1], заключающейся в предположении о возможности замены гетерогенной среды гомогенным континуумом, обладающим некоторыми эффективными параметрами. Проблема состоит в определении эффективных свойств гетерогенной среды через свойства фаз и некоторые их геометрические характеристики. Нахождение эффективных упругих модулей песчаных нефтегазовых коллекторов и, в частности, скоростей продольных и поперечных волн, определение связи между скоростями и структурой порового пространства, свойствами флюида — весьма актуальная задача для сейсморазведки.

Остановимся на более простой ситуации пустого, т. е. не содержащего флюида, консолидированного зернистого скелета. Существует несколько подходов к решению поставленной задачи, но зернистый характер скелета учитывался до последнего времени лишь в решениях, основанных на задаче Герца о деформации двух шаров в точке контакта под действием приложенных сил [2]. Однако предположение о точечном контакте в начальный момент нагружения не отвечает условию консолидации породы и приводит к тому, что упругие волны в такой модели распространяются лишь при наличии внешнего давления. В ряде других решений [1] учитывается лишь доля объема, приходящегося на поровое пространство. На практике широко применяются полученные на основе статистического анализа большого количества лабораторных измерений уравнения связи скоростей упругих волн с некоторыми характеристиками структуры, прежде всего пористостью, а также средним размером зерна, проницаемостью и т. д. Таким образом, существует потребность в новых подходах к расчету эффективных упругих модулей зернистых сред.

В [3] для вычисления напряженного состояния отдельного зерна и эффективных упругих модулей пустого зернистого скелета предлагается использовать вариационный