

12. Maiden D. E., Nutt G. L. A hot-spot model for calculating the threshold for initiation of pyrotechnic mixtures // Eleventh Int. Pyrotechnics Seminar.— Chicago, Illinois, 1986.— P. 813—826.
13. Khasainov B. A., Attetkov A. V., Borisov A. A. et al. Critical conditions for hot-spot evolution in porous explosives // Dynamics of Explosions: AIAA Progr. Astron. Aeron.— Washington, 1988.— V. 114.— P. 303—321.
14. Хасайнов Б. А., Борисов А. А., Ермолаев Б. С. Развитие очага реакции в пористых энергетических материалах // Хим. физика.— 1988.— 7, № 7.— С. 989—998.
15. Аттетков А. В., Лазарев В. В. Разогрев и воспламенение энергетического материала при сжатии газовой поры // Тр. МГТУ.— 1989.— № 530.— С. 3—19.

г. Москва

Поступила в редакцию 28/1 1992

УДК 621.7.044.2; 621.733

*И. В. Яковлев*

## ВЗРЫВНОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Использование при взрывном компактировании порошкообразной матрицы позволяет получать композиционные материалы, армированные в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Соотношение размеров армирующих волокон и частиц матричного материала определяющим образом влияет на физические процессы, происходящие при компактировании.

Возможности и перспективы использования энергии взрыва для получения металлических композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, представлены в работе [1]. Установлено, что следствием применения в качестве матрицы монолитных материалов в виде пластин и оболочек являются ограниченное (30 %) объемное содержание армирующих элементов и анизотропия свойств композита ввиду однонаправленности армирующих волокон.

Эти ограничения отсутствуют при создании армированных композиционных материалов с порошковой матрицей, и в [2] уже отмечалась предпочтительность получения композиционных материалов с порошкообразной матрицей с точки зрения обеспечения термодинамических условий на контактной границе матрица — волокно. Не менее принципиальна в такого типа композициях возможность армирования по меньшей мере в трех взаимно перпендикулярных направлениях, получая тем самым материал менее анизотропный, чем в случае однонаправленного армирования.

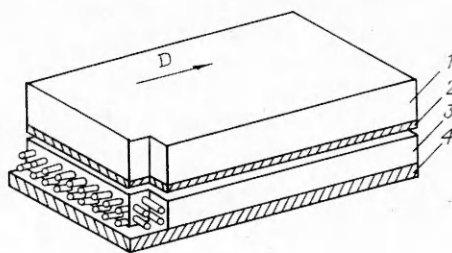
Настоящая работа посвящена исследованию возможности взрывного компактирования армированных композиционных материалов с порошкообразной матрицей.

На рис. 1 представлена схема взрывного компактирования, а на рис. 2 — схема размещения армирующих волокон. Нагружение осуществляется скользящей детонационной волной через металлическую пластину. Исходная плотность образца соответствует плотности свободной засыпки, конечная — близка к плотности монолита.

Известно, что при взрывном компактировании основная причина, препятствующая получению сплошного материала, — волны разгрузки, нарушающие образующиеся в процессе консолидации частицы связи. В такой ситуации следует ожидать, что армирующие элементы будут играть двойную роль. Во-первых, препятствовать разрушению образовавшихся связей по границам частиц матрицы и границам матрица — волокно под действием растягивающих напряжений в волнах разгрузки. И, во-вторых, выполнять в дальнейшем собственно функцию арматуры в получаемом композиционном материале. При разработке схем взрывного компактиро-

Рис. 1. Схема взрывного компактирования.

1 — заряд ВВ; 2 — металлическая пластина; 3 — компактируемый материал; 4 — жесткое основание.



вания следует учитывать тот факт, что создаваемые в композите термодинамические условия должны не только обеспечивать уплотнение частиц и волокон до плотности монолита, но и быть достаточными для образования связей по межчастичным и межфазным границам [3].

Исследование структуры полученных взрывом композиционных материалов свидетельствует о том, что связь по межчастичным и межфазным границам напрямую зависит от пластических деформаций по этим границам [4]. Из исследований [4], посвященных влиянию размера частиц порошка на процесс взрывного компактирования, следует вывод о том, что с уменьшением фракции пресуемого порошка снижается возможность получения плотного компакта, а увеличение параметров ударного нагружения не дает положительного эффекта. Следовательно, при взрывном компактировании порошков мелкой фракции необходимы воздействия на пресуемый материал, напрямую не связанные с параметрами нагружения и в то же время стимулирующие процессы образования межчастичных контактов.

Известен эффект скоростной неравновесности в бинарных порошковых смесях в условиях двумерного ударно-волнового нагружения [5]. Оказалось, что скоростная неравновесность приводит к новым физическим процессам, связанным с течением материала матрицы в макрообъеме [6]. При исследовании структуры спрессованного композиционного материала установлено, что характер течения частиц матрицы зависит от их размера и соотношения размеров частиц и волокон. Так для частиц, отличающихся по размеру от диаметра волокна на несколько порядков, течение материала матрицы носит гидродинамический характер. При энергии нагружения  $E \approx 10^3$  Дж/г в смеси медный порошок (10—20 мкм) — стальные волокна (диаметр 1,5—2 мм) отчетливо регистрируются следы, являющиеся следствием турбулентного обтекания материалом матрицы армирующих волокон. За волокном существует застойная зона с различной структурой, характеризующейся отсутствием развитого течения порошка матрицы. При этом в турбулентной области регистрируются расплавы матричного материала, что говорит о значительном пластическом течении материала матрицы.

Оценки показывают, что в подобных экспериментах длина турбулентного следа порядка диаметра волокна, а объем порошка матрицы, вовлеченный в вихревое течение, порядка объема волокна. Таким образом, без учета застойной зоны, при равных объемных содержаниях матрицы и армирующих волокон практически весь остающийся матричный материал вовлекается в турбулентное течение. Следовательно, при компактировании двухкомпонентной среды с существенно отличающимися размерами фракций могут быть созданы условия для локальных вихревых течений,

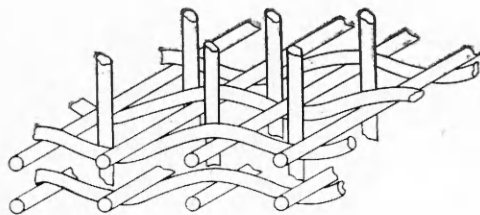


Рис. 2. Схема размещения армирующих волокон.

а объемное содержание армирующих элементов или крупных частиц должно быть таким, чтобы в гидродинамическое течение включался как можно больший объем основного матричного материала. В этом случае будут обеспечиваться и условия компактирования до плотности монолита и условия образования связи между частицами и по границам матрица — армирующие волокна.

При равных размерах частиц матрицы и армирующих волокон роль армирующих волокон значительно проще, и за ними остаются только функции упрочняющих элементов. Армирующие волокна обычно имеют более высокие прочностные характеристики, чем матрица, и в процессе взрывного компактирования они деформируются незначительно, а заполнение материалом матрицы всего объема между армирующими волокнами способствует сохранению их целостности.

Взрывным компактированием получены образцы композиционных материалов на основе порошкообразных металлических, керамических и металлокерамических матриц (порошки титана, меди, никеля, свинца, окиси алюминия и др. и их смесей с размером частиц 10—20 мкм и более), армированных непрерывными металлическими волокнами в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев И. В., Сиротенко Л. Д., Ханов А. М. Сварка взрывом армированных композиционных материалов.— Новосибирск: Наука, 1991.— 120 с.
2. Загарин Ю. В., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Измерение давления и температуры при ударном нагружении пористых композиционных материалов // ФГВ.— 1989.— 25, № 2.— С. 120.
3. Портной К. И., Заболоцкий А. А. и др. Классификация композиционных материалов // Порошковая металлургия.— 1977.— № 12(180).— С. 70.
4. Роман О. В., Нестеренко В. Ф., Пинкус И. М. Влияние размера частиц порошка на процесс взрывного прессования // ФГВ.— 1979.— 15, № 5.— С. 102.
5. Костюков Н. А. Структура течения бинарных смесей твердых частиц в условиях двумерного ударно-волнового нагружения // ПМТФ.— 1988.— № 3.— С. 54.
6. Костюков Н. А., Яковлев И. В. Течение порошковых материалов вблизи примесных включений в условиях ударного нагружения // ФГВ.— 1992.— 28, № 2.— С. 109.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 27/XI 1991,  
после доработки — 17/II 1992

УДК 532.593

*Д. С. Долгушин, В. Ф. Анисичкин*

### РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗА ФРОНТОМ УВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ

Показана возможность применения теории термодинамического подобия для прогнозирования свойств веществ при ударно-волновом нагружении и предложен метод расчета температуры конденсированных сред за фронтом УВ. Для ряда простых и сложных веществ расчеты сопоставлены с известными экспериментальными данными.

В настоящее время имеется большое количество экспериментальных данных по ударному сжатию различных веществ. В результате экспериментов обычно получают ударные адиабаты, скорость звука или другие кинематические параметры, измерение же температуры и интерпретация результатов вызывают трудности. Существующие методы теоретического расчета температуры не обладают необходимой универсальностью (отли-

© Д. С. Долгушин, В. Ф. Анисичкин, 1992.