

**ВЗРЫВНОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА,  
АРМИРОВАННОГО ВЫСОКОПРОЧНЫМИ ВОЛОКНАМИ**

УДК 534.22.2+621.7.044.2

**М. П. Бондарь, Г. Е. Кузьмин, В. В. Пай, И. В. Яковлев**

**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
630090 Новосибирск**

*Исследован процесс компактирования порошкового алюминиевого сплава, армированного высокопрочными металлическими и керамическими волокнами, в плоском слое бегущей взрывной нагрузкой. Определены значения давления компактирования материала матрицы и разрушения керамических волокон. Исследована структура полученных компактов и характер их разрушения.*

Использование порошковых гомогенных и гетерогенных систем в качестве матричного материала при разработке и создании армированных композиционных материалов продиктовано тем, что методы порошковой металлургии позволяют получать сложные по составу и уникальные по своим свойствам порошки.

В работах [1, 2] показаны преимущества взрывного компактирования армированных композиционных материалов с порошковой матрицей перед другими методами с точки зрения сохранения исходных свойств компонентов, а также для обеспечения надлежащих термодинамических условий по контактным границам частиц матрицы и границам матрица — волокно.

Получение взрывным компактированием металлических композиционных материалов на основе порошковой матрицы, армированной высокопрочными волокнами, возможно при выполнении двух необходимых условий: во-первых, обеспечение физической связи между частицами матрицы в результате взрывного нагружения и, во-вторых, сохранение целостности волокон и образование прочного соединения по границе матрица — волокно. Эти условия несложно удовлетворить, если использовать для армирования высокопрочные металлические волокна. Если же в качестве армирующих элементов используются керамические волокна типа SiC с углеродным или вольфрамовым центральным стержнем, то отмеченные условия могут оказаться взаимно исключаящими. Суть проблемы состоит в следующем.

При взрывном компактировании металлических порошковых систем возможны два сильно различающихся режима [3], которые обычно называют квазистатическим и динамическим. Квазистатический режим компактирования характеризуется тем, что хотя в определенных условиях и может быть достигнута плотность компакта, близкая к плотности монолита, однако при этом практически отсутствует физическая связь между частицами матрицы. Для получения физической связи между частицами необходим динамический режим компактирования, который характеризуется интенсивными пластическими течениями по границам частиц и достигается при более высоких давлениях нагружения. В таких

условиях может оказаться, что режимы динамического компактирования лежат в области давлений, превосходящих предельные давления, при которых сохраняется целостность керамических волокон.

Проводимые исследования целесообразно разбить на следующие взаимосвязанные этапы. Во-первых, необходимо выбрать или разработать схемы нагружения образцов порошковых материалов, обеспечивающих получение (и сохранение) прочного компакта. Во-вторых, для этих конфигураций параметры нагружения следует подобрать так, чтобы реализовался динамический режим компактирования матрицы. И, в-третьих, должна быть исследована возможность сохранения волокон в найденных динамических режимах.

Схемы нагружения порошковых материалов в виде плоских или цилиндрических образцов скользящей ударной волной (УВ) наиболее часто применяются для исследовательских и прикладных целей. При этом имеющийся опыт показывает, что компактирование плоских образцов обладает рядом преимуществ перед цилиндрической схемой компактирования (если только применение последней не требуется какими-либо специальными условиями). Как в плоской, так и в цилиндрической схеме нагружения происходит нерегулярное отражение УВ с образованием плоской маховской УВ и контактного разрыва наряду с падающей и отраженной косыми УВ. В цилиндрических схемах нагружения зона маховской волны занимает значительную часть объема компактируемого материала, и величину этой части трудно регулировать. Поэтому получаемый компакт имеет сильно неоднородную структуру и, как правило, расслаивается по поверхности, соответствующей контактному разрыву трехударной конфигурации.

В случае компактирования плоского слоя скользящей УВ можно, изменяя толщину слоя, добиться практически произвольного соотношения размеров части образца, нагруженной маховской волной, и части, через которую прошли падающая и отраженная косые УВ. Важно, что та доля образца, которая подвергается воздействию маховской волны, может быть сделана достаточно малой.

Необходимо также отметить различие основных причин разрушения армирующих волокон в плоских и цилиндрических схемах нагружения. В цилиндрических схемах нагружения это, в основном, неоднородная деформация материала матрицы из-за наличия маховского отражения УВ. Трудно, если вообще возможно, установить однозначную связь между разрушением волокон и каким-либо параметром (или параметрами) нагружения. В отличие от этого, только слишком большое давление в падающей УВ является определяющим фактором разрушения армирующих волокон в плоской схеме нагружения при прочих равных условиях.

Экспериментальная методика определения давления в падающей косой УВ представлена в [4]. Отметим также, что характер разрушения изучаемых в данной работе волокон карбида кремния с вольфрамовым либо углеродным сердечником должен быть существенно различным в зависимости от материала сердечника. Объясняется это тем, что углеродное волокно независимо от способа его получения (см., например, [5]), имеет пористость 30–33 %.

При рассмотрении проблемы взрывного создания композиционных материалов на основе порошковых матриц, армированных высокопрочными волокнами, необходимо принимать в расчет два критических значения давления. Одно из них — это давление, выше которого имеет место динамический режим компактирования, а другое — давление, выше которого армирующие волокна разрушаются. Также очевидно, что невозможно получить хороший компакт с неразрушенными волокнами, если второе критическое давление мень-

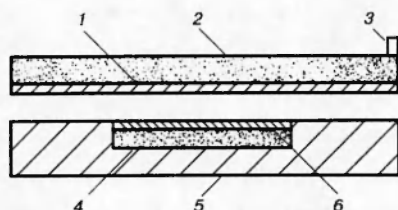


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — метаемая пластина, 2 — заряд взрывчатого вещества, 3 — детонатор, 4 — порошковый образец, 5 — контейнер, 6 — крышка

ше первого.

С целью установления параметров ударно-волнового нагружения, при котором происходит разрушение армирующих волокон и достигается динамический режим компактирования материала матрицы, были проведены эксперименты по схеме, представленной на рис. 1. В такой схеме после подрыва детонатора в заряде взрывчатого вещества возникает детонационная волна, скользящая вдоль поверхности пластины. Под действием давления продуктов детонации пластина метается на образец, и при соударении пластины со слоем порошка в нем возникает бегущая косая УВ. Параметры УВ в порошке определяются методом, представленным в [4].

Экспериментальные исследования проводили со следующими материалами: порошок 99,5 %-го алюминия с размером частиц до 60 мкм; порошок алюминиевого сплава Al2024 с размером частиц 36–63 мкм и твердостью 120 единиц по Виккерсу; волокна карбида кремния диаметром 140 и 100 мкм соответственно с углеродным сердечником прочностью 3450 МПа и вольфрамовым сердечником прочностью 3500 МПа, а также стальные волокна диаметром 100 мкм и прочностью 2900 МПа.

Выбор размеров частиц порошковой матрицы продиктован следующими соображениями. Известно [3], что давление перехода от квазистатического режима компактирования к динамическому пропорционально  $1/r_p^2$ , где  $r_p$  — размер частиц. Поэтому, например, для частиц Al2024 с размерами частиц 0–36 мкм давление перехода оказалось бы порядка 200–250 кбар. При таком давлении нет надежды на сохранение целостности волокон. С другой стороны, если диаметр волокон близок к диаметру частиц или меньше его, это также способствует разрушению волокон.

Сплав Al2024 обладает малым относительным удлинением. Поэтому даже достаточно небольшие растягивающие деформации могут приводить к образованию поперечных трещин и разрушению сформировавшегося компакта. В отличие от этого компактирование чистого алюминиевого порошка, благодаря его большей пластичности, при тех же условиях нагружения может происходить без последующего растрескивания. Необходимо также иметь в виду, что растягивающие напряжения при компактировании практически не допустимы для керамических волокон, так как известно [6], что относительное удлинение волокон карбида кремния не превосходит  $0,5 \div 1,5$  %.

Таким образом, с учетом исходных сложных свойств компонентов задача взрывного компактирования материала на основе Al2024, армированного керамическими волокнами, является многопараметрической. В идеале должен быть получен компакт с физической связью между частицами матрицы и по границе матрицы с волокном, причем волокна должны остаться целыми.

Критическое давление разрушения волокон в настоящее время можно установить только эмпирически. В то же время приближенное значение критического давления пе-

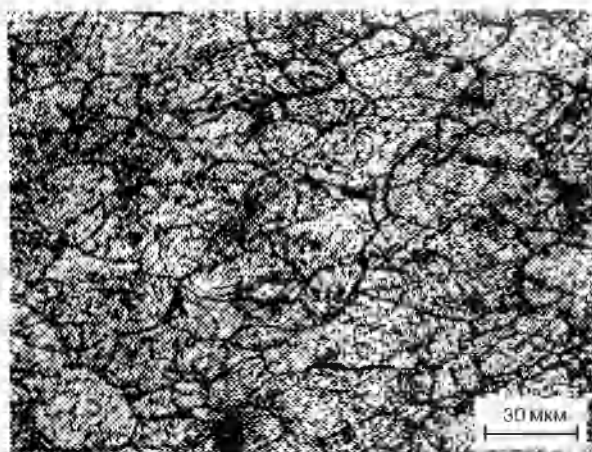


Рис. 2

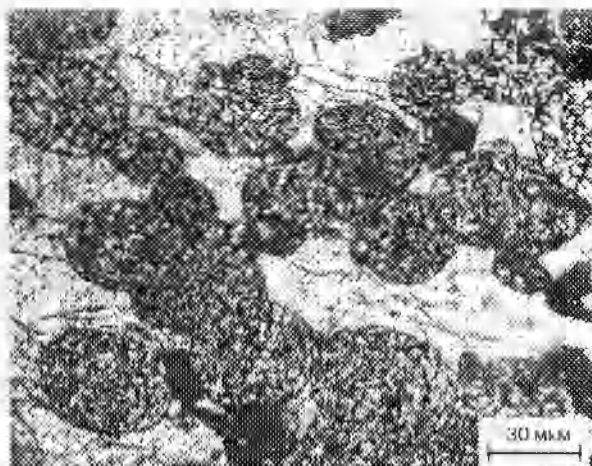


Рис. 3

Рис. 2. Микроструктура образца из чистого алюминия, полученного при динамическом режиме компактирования

Рис. 3. Микроструктура образца из смеси алюминия и сплава Al2024; динамический режим для алюминия и квазистатический для Al2024

рехода  $p^*$  от квазистатического режима компактирования к динамическому для порошков из разных материалов, но с одним и тем же размером частиц можно оценить снизу, пользуясь результатами работы [3]:  $p^* > 2H_V$ , где  $H_V$  — твердость материала по Виккерсу. Для чистого алюминия такая оценка дает  $p^* > 10$  кбар, а для Al2024 —  $p^* > 25$  кбар. Для большей уверенности в том, что достигается динамический режим компактирования, ударно-волновые давления выбирают с некоторым превышением.

На рис. 2 приведена фотография микроструктуры компакта из чистого алюминиевого порошка, полученного при давлении нагружения 18 кбар и исходной температуре 20 °С. Видно, что имеет место динамический режим компактирования, течение материала матрицы в целом можно оценить как чисто гидродинамическое. Отдельные частицы порошка сильно пластически деформированы. При этих условиях нагружения волокна карбида кремния с вольфрамовым сердечником практически не разрушаются.

На рис. 3 приведена фотография микроструктуры композита, полученного как результат компактирования смеси (50/50) чистого алюминия и сплава Al2024 при тех же, что и на рис. 2, значениях начальной температуры и давления в падающей УВ. Фотография свидетельствует о том, что данный режим является динамическим только для алюминиевой составляющей смеси, тогда как составляющая Al2024 компактируется квазистатически. Имеются частично разрушенные волокна карбида кремния с углеродным сердечником.

Известно [7, 8], что одним из возможных способов увеличения пластичности материала матрицы является предварительный нагрев образца перед взрывным компактированием. При этом правильно подобранный режим нагрева не должен вносить больших изменений в структуру или свойства материала. Было установлено, что для Al2024 подобным режимом является нагрев до 150 °С в течение 15 мин. Задача отыскания самого оптимального режима предварительного нагрева здесь не ставилась, но опыты показали, что при более длительном нагреве в компакте по границам частиц проявляются нежелательные струк-

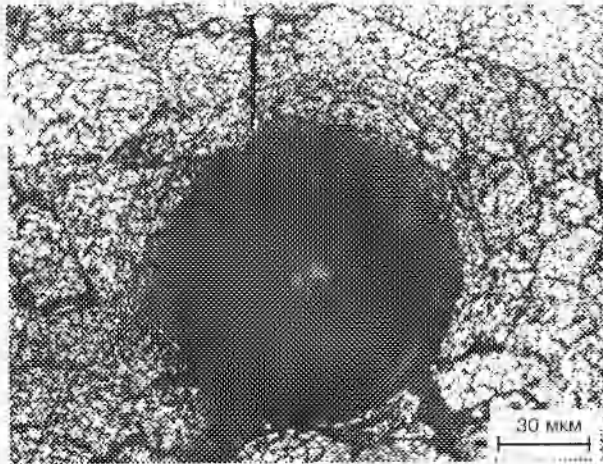


Рис. 4. Структура образца из сплава Al2024, полученного при динамическом режиме компактирования (волокно с вольфрамовым сердечником)

турные изменения. Компактирование порошка Al2024 при давлении 18 кбар даже после предварительного подогрева до 150 °С все-таки не приводит к пластическим деформациям частиц, что подтверждает для этого материала оценки критического значения давления перехода к динамическому режиму компактирования, полученные ранее.

Таким образом, для получения прочного компакта на основе матрицы из порошка Al2024 необходимо перейти к более высоким давлениям в падающей УВ. Оказалось, что переход к динамическому режиму компактирования происходит при давлении УВ ~ 35 кбар и предварительном нагреве до 150 °С. На рис. 4 приведена структура компакта, полученного при таком режиме нагружения. При этом стальные волокна сохраняют свою целостность, керамические волокна с углеродным сердечником разрушаются, а у волокон с вольфрамовым сердечником разрушается керамическая оболочка. Следовательно, критическое значение давления, при котором волокна карбида кремния в той или иной степени разрушаются, лежит в интервале от 18 до 35 кбар. Достижение динамического режима компактирования для порошка Al2024 обеспечивает условия консолидации частиц матрицы. Однако наличие волокон в материале матрицы вносит особенности в формирование структуры компакта в окрестности волокна.

Обсудим влияние отраженной УВ, особенностей течения материала матрицы в окрестности волокна и влияние волн разрежения на свойства получаемого компакта. Как показывают результаты измерения параметров падающей УВ при давлении ~ 35 кбар в порошковой матрице из Al2024 с размерами частиц 36–63 мкм, сразу за УВ плотность компакта составляет

$$\rho_c = \rho_0 D / (D - u) = (0,98 \pm 0,02) \rho_m,$$

Здесь  $\rho_0 \simeq 1,3 \text{ г/см}^3$  — насыпная плотность Al2024,  $D \simeq 2,2 \text{ км/с}$  — скорость УВ,  $u \simeq 1,18 \text{ км/с}$  — массовая скорость за УВ,  $\rho_m \simeq 2,79 \text{ г/см}^3$  — плотность монолита. Следовательно, отношение  $r_0^2/r^2 \sim 8 \div 10$ , где  $r_0$  — исходный размер пор,  $r$  — размер пор после прохождения падающей УВ. Давление в отраженной УВ даже при нормальном отражении от дна контейнера не превосходит давления нормального отражения от жесткой стенки:

$$p_r < p + \rho_m (a + bu_r) u_r,$$

где  $p$  и  $p_r$  — давления в падающей и отраженной УВ,  $u_r$  — массовая скорость за отражен-



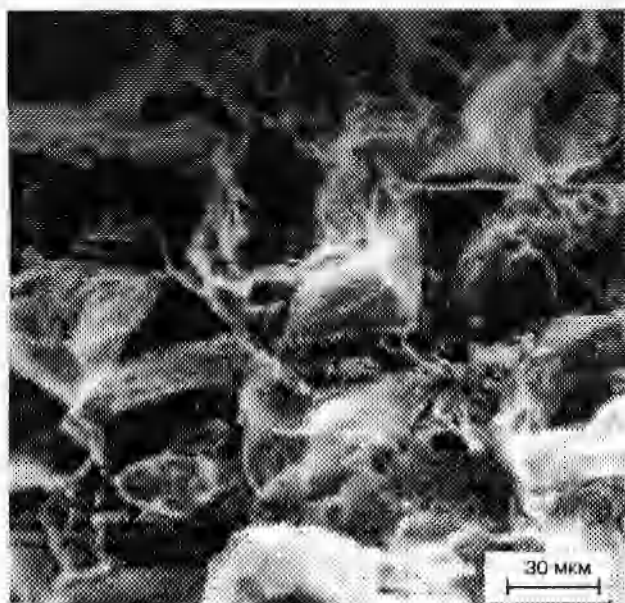


Рис. 5

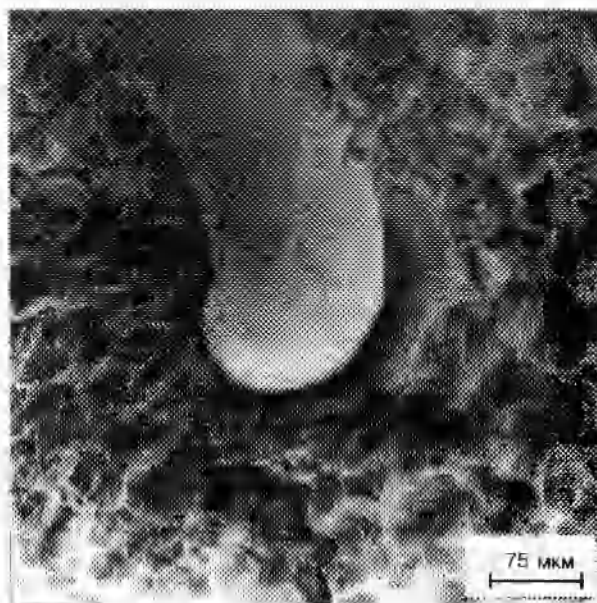


Рис. 6

Рис. 5. Фрактограмма скомпактированного образца из порошка Al2024, разрушенного при растяжении

Рис. 6. Фрактограмма разрушения композита на основе сплава Al2024, армированного стальными волокнами

ной УВ,  $a$  и  $b$  — параметры ударной адиабаты монолита Al2024. Пользуясь данными [9], получаем  $p_r < 130$  кбар. Это давление как минимум в полтора раза меньше критического в компакте, образовавшемся после воздействия падающей УВ. Следовательно, отраженная УВ практически не меняет плотности компакта. Очевидно, что предварительная статическая подпрессовка образца, уменьшая размер пор, приводит к тому же эффекту повышения критического давления перехода к динамическому режиму при взрывном нагружении.

Металлографическое исследование структуры течения материала матрицы в околоволоконном пространстве подтвердило наличие скоростной неравновесности за фронтом волны, присущей бинарным порошковым смесям [10]. Установлено, что при диаметре волокон 100–140 мкм и размерах частиц матрицы 36–63 мкм структура потока осложняется возникновением застойных зон в окрестности волокна. Внутри этих зон скорость течения в направлении распространения фронта волны много меньше скорости основного потока. Само же возникновение застойных зон обусловлено проявлением вязких свойств порошка матрицы в ударно-сжатом состоянии. Очевидно, что роль застойных зон в получении качественного компакта негативна. Во-первых, на стадии компактирования пластические деформации в застойной зоне существенно меньше, чем за ее пределами. Поэтому для достижения режима динамического компактирования в застойной зоне необходимо увеличивать давление во всем образце, что отрицательно сказывается на целостности армирующих волокон. Во-вторых, с приходом волн разрежения в уже образовавшийся компакт межчастичные трещины будут преимущественно распространяться из застойных зон, где слаба связь между частицами матрицы (см. рис. 4).

Полученные после взрывного компактирования образцы композиционных материалов

подвергались термической обработке и различным механическим испытаниям. Испытания показали, что разрушение сформировавшегося компакта — следствие макроскопических деформаций образца как целого. Распространение трещин при разрушении образца носит трансчастичный характер.

На рис. 5 и 6 приведены фрактограммы компакта из Al2024. Характер разрушения вязкий в приграничных областях частиц и хрупкий в самих частицах. Эта картина разрушения обусловлена структурой материала, созданной в процессе ударно-волнового нагружения и последующей термообработки.

В дальнейшем при исследовании проблемы создания композиционных материалов на основе металлической порошковой матрицы, армированной высокопрочными керамическими волокнами, необходимо точно определить критическое давление разрушения для каждого типа волокон. Затем следует подбирать условия предварительного нагрева матрицы, при которых давление динамического режима компактирования было бы меньше, чем критическое давление разрушения волокон. Ясно, что для некоторых комбинаций материалов матрица — волокно такие режимы могут вообще отсутствовать, поскольку предварительный нагрев не должен вносить нежелательных изменений в структуру и свойства как матрицы, так и армирующих волокон.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Загарин Ю. В., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Измерение давления и температуры при ударном нагружении пористых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 129–133.
2. Яковлев И. В. Взрывное компактирование армированных композиционных материалов // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 78–80.
3. Нестеренко В. Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск: Наука, 1992.
4. Пай В. В., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Приближенная оценка параметров нагружения в композиционных материалах для случая сильных ударных волн // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 134–138.
5. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. С. 18.
6. Bunk W., Schulte K. Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix // Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 1988. Bd 19. S. 391–401.
7. Roman O. V., Gorobtsov V. G. Hot explosive pressing of powders // Int. J. Powder Met. & Powder Techn. 1975. V. 11, N 1. P. 55–60.
8. Verfahren und Vorrichtung zum explosiven Verdichten von erhitztem Keramik- und Metall-material / Prümmer R. [Fraunhofer-Ges. zur Förderung der angewandten Forschung e.V.]. Заявка, ФРГ, МКИ В 22 F 3/08, С 04 В 35/76, N 2436951; Заявл. 31.07.74; Опубл. 12.02.76.
9. Костюков Н. А. Структура течения бинарных смесей твердых частиц в условиях двумерного ударно-волнового нагружения // ПМТФ. 1988. № 3. С. 54–58.
10. Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 326.

Поступила в редакцию 27/V 1996 г.