

4. Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом. — М.: Мир, 1990. — 124 с.
5. Нестеренко В. Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. — Новосибирск: Наука, 1992. — 198 с.
6. Lange F. F. Size effects associated with the thermodynamics of constrained transformations // J. Mater. Sci. — 1982. — 17. — P. 225.
7. Литягина Л. М., Кабалкина С. С., Пашкина Т. А. и др. Полиморфизм при высоком давлении // ФТТ. — 1978. — 20, № 11. — С. 3475.
8. Fong Jue J., Virkar A. V. Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties of polycrystalline t'-zirconia // J. Amer. Ceram. Soc. — 1990. — 73. — P. 3650.
9. Lively D. T., Murray P. Thermodynamics of monoclinic-tetragonal transition of zirconia // Ibid. — 1956. — 39. — P. 363.
10. Whitney E. D. Effect of pressure on monoclinic-tetragonal transition of zirconia. Thermodynamics // Ibid. — 1962. — 45. — P. 612.
11. Masaki T., Sinjo K. Mechanical properties of highly toughened  $ZrO_2 - Y_2O_3$  // Ceram. Int. — 1987. — 13. — P. 109.
12. Kipp M. E., Grady D. E. Elastic wave dispersion in high-strength ceramics // Shock compression of condensed matter. — 1991. — Elsevier Sci. Publ. B. V., 1992. — P. 459.
13. Нестеренко В. Ф., Тесленко Т. С., Симонов В. А. и др. Создание новых материалов из керамических порошков с нанокристаллитной структурой с применением высокоэнергетического воздействия // Отчет ИГИЛ, июнь 1993 г.
14. Дубок В. А., Кабанова М. И., Недилько С. А. и др. Влияние метода синтеза на свойства порошков частично стабилизированного диоксида циркония // Порошковая металлургия. — 1988. — № 8. — С. 56.

*гг. Новосибирск, Томск  
Институт гидродинамики  
им. М. А. Лаврентьева;  
Институт физики прочности  
и материаловедения*

*Поступила в редакцию 10/11 1993*

УДК 621.7.044

*А. А. Штерцер*

## ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ НА ИХ КОНСОЛИДАЦИЮ ПРИ ВЗРЫВНОМ КОМПАКТИРОВАНИИ ПОРОШКОВЫХ И ГРАНУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментально взрывным компактированием гранул сплавов на алюминиевой основе и порошковых смесей показано, что на величину давления, при котором происходит схватывание частиц за фронтом ударной волны, существенно влияет состояние поверхности частиц — толщина окисных (гидроокисных) и адсорбированных пленок. Нагружению подвергались как исходные гранулы и порошки, так и подвергнутые химической очистке. Выведены формулы для расчета ударно-волнового давления схватывания.

Проблема создания физических условий для получения прочного соединения материалов (схватывания на поверхности контакта) обработкой давлением, несмотря на обширный накопленный экспериментальный материал еще не получила окончательного научного разрешения [1—4]. Для порошковых материалов дело осложняется тем, что они имеют огромную поверхность на единицу массы вещества. Очевидно, что состояние этой поверхности, т. е. состав и толщина окисных (гидроокисных) и адсорбированных пленок, должно оказывать значительное влияние на прочность получаемых тем или иным способом компактов. Этот факт хорошо известен в практике квазистатических методов компактирования. В частности, на поверхностях частиц сплавов на алюминиевой основе присутствуют пластичные слои гидроокиси алюминия и адсорбированных газов. Вследствие этого получить прочные компакты из таких частиц можно, только применяя технологию, включающую вакуумный отжиг предварительно спрессованных брикетов при температурах порядка 500 °С и сильную деформацию брикетов на конечном этапе [5].

В [6] показано, что, в отличие от квазистатического, при ударно-волновом нагружении порошков (в так называемом динамическом режиме) поверхности частиц очищаются, и окислы концентрируются в отдельных карманах.

© А. А. Штерцер, 1993.

При этом разрушаются окисные пленки уже в передней части фронта ударной волны (УВ) и дальнейшая деформация происходит при частично очищенных поверхностях. Поверхности очищаются, очевидно, вследствие струйных течений на контактах частиц, экспериментально зафиксированных в [8] и ряде других рассмотренных в [6] работ.

В настоящее время во всех опубликованных работах, посвященных проблеме получения прочных компактов взрывом, отсутствует учет состояния поверхности частиц. Подробный обзор всех критериев изложен в [6], где автором обосновывается предположение о том, что появление прочной связи обусловлено качественной сменой кинематических режимов деформирования контактных областей гранул. На примере быстрозакаленных гранул приведена формула для оценки необходимого для схватывания давления УВ

$$p_c \approx 2H_V, \quad (1)$$

где  $H_V$  — микротвердость частиц. Критерий (1) выведен в [6] на базе энергетического подхода путем сравнения диссипируемой в окрестности поры удельной энергии с удельной энергией ударного сжатия. Физический смысл такого сравнения заключается в том, что к концу процесса компактирования остается столько же микрокинетической энергии, сколько пошло на вязкопластическое формоизменение частиц до этого момента. В этих условиях имеет место динамический режим компактирования, для которого характерно появление особенностей на контактах частиц в виде струй и расплавов.

Вообще говоря, квазистатический режим переходит в развитой динамический в диапазоне давлений от  $p = H_V$  до  $2H_V$ . Здесь используется, аналогично [6, 7], критерий (1), поскольку в этих работах он считается критерием достижения прочного компакта. В [9] на основе экспериментальных данных предложен критерий получения максимально плотного компакта в виде

$$D = 2 \sqrt{\frac{1,2H_V}{\rho_{ВВ}}},$$

где  $D$  — скорость детонации взрывчатого вещества (ВВ);  $\rho_{ВВ}$  — плотность ВВ. Учитывая, что давление детонации можно выразить в виде  $p_n \approx \rho_{ВВ} D^2 / 4$ , получим  $p_n = 1,2H_V$ . Согласно [10], в случае широко применяемой схемы нагружения скользящей детонационной волной давление генерируемой в порошке УВ составляет  $\sim 0,4p_n$ . Таким образом, можно записать критерий получения плотного компакта

$$p_d = 0,4p_n = 0,48H_V, \quad (2)$$

который носит чисто феноменологический характер, поскольку в [9] экспериментальные результаты получены для осесимметричного нагружения. При этом условие  $p_n \leq 1,2H_V$  означает, что на оси ампулы отсутствует нерегулярное отражение УВ, и компакт отличается однородной по объему плотностью. Представляется целесообразным упоминание в настоящей работе критерия (2), как определяющего положение одной из технологических точек на описанной ниже шкале давлений.

Опыты с гранулированными и порошковыми материалами на алюминиевой основе показали, что положение границы, разделяющей области плотного и прочного компактов, существенно зависит от толщины поверхностных пленок на частицах, поэтому критерии типа (1) не всегда дают адекватное реальности описание.

Для вывода соответствующих соотношений обратимся к результатам исследований в области сварки взрывом. Такой подход оправдан, поскольку при схлопывании пор во время прохождения УВ через порошок на сталкивающихся поверхностях частиц наблюдаются струйные, а иногда и волнообразные течения, характерные для сварки взрывом [8]. Важно отметить следующее обстоятельство. В [6, 7] сделана оценка выделяемой на соединяемых контактных поверхностях и приводящей к образованию связей мощности пластической деформации в случаях сварки взрывом и компактирования. Полученное там отличие завышено на два порядка. Это, по нашему мнению,

связано с тем, что авторы [7] при оценке мощности полагают  $f = 1$ , что фактически соответствует искусственному завышению диссипируемой энергии. Оценивая аналогично [7] порядок времени и взяв в качестве характерной величины кинетическую энергию метаемой пластины, можно убедиться, что упомянутые мощности — величины одного порядка. Таким образом, предположение об одной и той же природе, определяющей положение нижней границы сварки взрывом и границы получения прочного компакта, вполне обосновано.

В [11] приведены экспериментальные данные, позволяющие в известной формуле для описания нижней границы сварки

$$u_c = k \sqrt{H_V / \rho_T} \quad (3)$$

ввести зависимость  $k$  от толщины окисной пленки в виде  $k = 6,05\chi^{0,195}$ , где  $u_c$  — минимальная скорость соударения метаемой и неподвижной пластин, при которой наблюдается сварка;  $\chi$  — отношение толщин окисной пленки и пластины;  $\rho_T$  — плотность материала пластин. Можно показать, что при прохождении по порошку достаточно сильная УВ охватывает один за другим слои частиц. При этом на каждом слое имеет место выход УВ на свободную поверхность частицы (вследствие пористости), и поверхность приобретает некоторую скорость  $u$ .

В [12] показано, что величина  $u$  практически равна массовой скорости за фронтом УВ, так как вызванная упругими свойствами добавка значительно меньше массовой скорости. Таким образом, аналогом скорости метания пластины при сварке взрывом является массовая скорость за фронтом УВ в порошке, так как и та, и другая равны скорости соударения поверхностей. Разница заключается лишь в том, что в порошках углы соударения поверхностей при схлопывании пор в различных местах частичек разные, а при сварке взрывом в стационарной ситуации угол соударения постоянен на всей поверхности.

Дополнительно доказывают соответствие массовой скорости за фронтом УВ и скорости метания при сварке взрывом описанные в [6] эксперименты по нагружению порошков и слоев стекла и фторопласта. Измерения показали, что массовая скорость в порошке за фронтом УВ совпадает со скоростью слоя в разгруженном состоянии на этой же глубине.

Воспользуемся теперь выражением для массовой скорости за фронтом УВ  $u^2 = p(\rho - \rho_0) / (\rho_0 \rho)$ , где  $\rho_0$  — начальная плотность порошка;  $\rho$  — плотность за фронтом УВ, и приравняем эту скорость к  $u_c$  из (3). В результате получим систему для расчета критического давления (давления схватывания УВ) в виде

$$p_c = k^2 \left( \frac{\rho_0}{\rho_T} \right) \frac{H_V}{(1 - \rho_0 / \rho(p_c))}, \quad (4)$$

$$k^2 = 36,6\chi^{0,39}, \quad \chi = 2\delta_0 / d.$$

Здесь  $\delta_0$  — толщина окисной пленки на частицах;  $d$  — размер частиц. Система (4) позволяет найти  $p_c$ , если известна ударная адиабата данного пористого вещества. Для оценок же можно рекомендовать в области неполного сжатия [13] соотношение

$$\rho(p) = \rho_T \left( 1 - e^{-\frac{3p}{2\sigma_T}} \right), \quad (5)$$

где  $\sigma_T$  — напряжение текучести материала частиц. Если УВ достаточно сильна, так что  $p \gg \sigma_T$  и  $\rho(p) \approx \rho_T$ , то

$$p_c = \frac{k^2 H_V}{\left( \frac{\rho_T}{\rho_0} - 1 \right)}. \quad (6)$$

Таким образом, получена формула для расчета минимальных давлений, при которых схватываются частицы по поверхностям контакта при ударно-волновом нагружении. Формула учитывает прочность (твердость)

частиц, их размер, толщину окисных пленок и начальную пористость порошка.

В дополнение к изложенному отметим, что для каждого порошкового материала можно построить своеобразную шкалу давлений применительно к импульсным нагружениям. Эта шкала начинается с некоторого минимального давления, ниже которого невозможно существование пластической волны в пористом материале [13]:

$$p_{\min} = \frac{2}{3} \sigma_T \ln \left[ \frac{1}{(1 - \rho_0/\rho_T)} \right]. \quad (7)$$

Вторая точка на шкале — это давление максимального уплотнения пористого материала  $p_d$  по (2). При увеличении давления от  $p_{\min}$  до  $p_d$  ширина фронта УВ уменьшается до размеров, сравнимых с размерами частиц. Следующей точкой на шкале будет давление схватывания  $p_c$  по (1) или с учетом толщины поверхностных пленок по (4). Вообще говоря, как будет видно ниже, вычисления по (4) могут дать значения  $p_c$  меньшие, чем  $p_d$ . Это говорит о том, что для достаточно «чистых» частиц схватывание может наступать уже на стадии неполного уплотнения. Однако для надежности в этом случае следует брать  $p_c = p_d$ , поскольку при неполном уплотнении из-за размазанности фронта волны сжатия скорости схлапывания свободных поверхностей частиц могут быть недостаточно высоки. Последняя точка на шкале давлений — такое давление УВ, при котором равновесная температура материала достигает температуры плавления  $T_{пл}$ :

$$p_{\max} = \frac{2\rho_T c_T (T_{пл} - T_0)}{(\rho_T/\rho_0 - 1)}, \quad (8)$$

где  $T_0$  — начальная температура;  $c_T$  — удельная теплоемкость материала частиц. Выше этого давления подниматься нежелательно, так как в компактах при остывании после нагружения будут образовываться крупные поры и даже полости. При достаточно толстых окисных слоях расчетные значения  $p_{\max}$  могут оказаться ниже  $p_c$ . В таких случаях получить плотный и прочный компакт невозможно.

Эксперименты по взрывному нагружению проводились по схеме, показанной на рисунке. Для варьирования давления генерируемых УВ применялись различные типы и массы зарядов ВВ. Использовались также двухслойные заряды, позволяющие без изменения общей массы ВВ получать УВ различной интенсивности [10, 14]. Нагружались гранулы различных сплавов на основе алюминия, получаемые распылением в воду. Нагружалась также смесь порошков, по качественному составу соответствующая материалу гранул. В табл. 1 приведены параметры одного из типов гранулированных материалов и порошковой смеси. Там же даны расчетные значения точек на шкале давлений. В расчетах брали твердость частиц  $42H_V$  (измерялась на приборе ПМТ-3 на шлифах гранул и компактов). Соотношение между твердостью и прочностью частиц взято в виде  $H_V/\sigma_b = 2,58$  (получено экспериментально и совпадает с данными для алюминиевых сплавов по [15]). В оценках  $p_{\min}$  вместо  $\sigma_T$  брали  $\sigma_b = H_V/2,58 \approx 163$  МПа, что приводит к некоторому завышенному значению этого давления, но не вносит принципиальных изменений в приводившиеся выше рассуждения.

Схема получения плоских компактов.

- 1 — электродетонатор; 2 — откольные элементы; 3 — инертная прокладка; 4 — ВВ; 5 — стол взрывной камеры или грунт; 6 — подложка; 7 — контейнер с порошком.

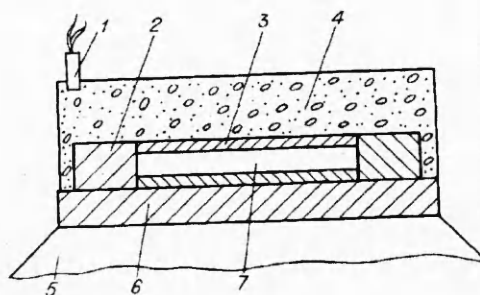


Таблица 1

Материал	$p_{\min}$	$p_d$	$p_c$ по (1)	Расчет $p_c$ по (4) при $\delta_0$				$p_{\max}$
				30 Å	400 Å	0,1 мкм	1 мкм	
Гранулы Al + 15Pb + 1Sn + + 1Cu ( $\rho_0 = 1,46 \text{ г/см}^3$ , $\rho_T =$ $= 3,11 \text{ г/см}^3$ , $d = 0,93 \text{ мм}$ )	0,068	0,20	0,84	0,164	0,365	0,512	1,243	2,68
Смесь порошков Al + 20Pb + + 2Sn + 1Cu ( $\rho_0 = 1,85 \text{ г/см}^3$ , $\rho_T = 3,26 \text{ г/см}^3$ , $d = 0,10 \text{ мм}$ )	0,089	0,20	0,84	0,466	1,252	1,785	4,389	3,94

Примечание. Расчеты  $p_{\min}$ ,  $p_d$  и  $p_{\max}$  производились по формулам (7), (2) и (8) соответственно; оценка  $p_{\max}$  велась на температуру плавления алюминия с учетом теплот плавления Pb и Sn; все давления в ГПа.

Толщины окисных слоев, для которых проводились расчеты, соответствуют для алюминия ситуациям: 30 Å — выдержка несколько недель в сухом воздухе; 0,1 мкм — достигается под действием сырости; 0,7—2,0 мкм образуется под действием кипящей воды или водяного пара [16]. Толщина окисной пленки  $\delta_0 > 400 \text{ Å}$  измерена на гранулах Al + 10,7Sn + 9,1Pb + 0,5Cu на вторичном ионном масс-спектрографе MS-7201 (рабочий вакуум  $10^{-6}$  Па, плотность первичного ионного тока ионов  $\text{Ag}^+$  20 мкА/см<sup>2</sup>). В сплавах системы Al — Pb — Sn величина  $\delta_0$  увеличивается с ростом содержания свинца. В частности, измерения на гранулах сплава A021 (13—14 % Sn, свинец отсутствует) дали результат  $\delta_0 \approx 60 \text{ Å}$ .

Из табл. 1 видно насколько существенное влияние на давление схватывания оказывают и толщины окисных пленок, и размер частиц, а именно — параметр  $\kappa = 2\delta_0/d$ . Это подтвердили эксперименты по компактированию гранул и порошков в исходном состоянии и после химической обработки поверхности частиц (табл. 2). Химическая обработка заключалась в обезжиривании и растворении окисной пленки и состояла из следующих операций: промывка в растворителе (уайт-спирит или ацетон); травление в ванне в водном растворе 45—50 г/л NaOH; промывка в горячей (60—70 °С) проточной, затем холодной воде; осветление в водном 30 %-м растворе  $\text{HNO}_3$ ; промывка проточной холодной, затем горячей (60—70 °С) водой; сушка тонким слоем в потоке горячего (80—90 °С) воздуха. После химической обработки гранулы сплавов, содержащих свинец, становятся значительно светлее.

Таблица 2

Материал	Состояние поверхности частиц	Режим нагружения							Результат
		ВВ	$\delta_{\text{ВВ}}$ , мм	$D$ , км/с	$r_1$	$r_2$	$p_H$ , кбар	$p_1$ , кбар	
Гранулы Al + 15Pb + 1Sn + 1Cu	После химической обработки	A	18	4,0	0,36	0,17	45,7	3,2	+
	Без химической обработки	A	18	4,0	0,36	0,17	45,7	3,2	—
	После химической обработки	Г/АС	4/13	6,2 — 3,2	0,33	0,22	28,0	11,8	+
Смесь порошков Al + 20Pb + 2Sn + 1Cu	После химической обработки	A	18	4,0	0,36	0,29	45,7	3,2	—
	После химической обработки	АГ	18	4,4	0,36	0,22	55,3	4,09	+

Примечание. А — аммонит, Г — гексоген, С — селитра аммиачная, АС — смесь аммонита и селитры 1/1 по массе, АГ — смесь аммонита и гексогена 3/1 по массе. В третьей строке заряд двухслойный с гексогеном сверху;  $p_H$  — давление детонации;  $p_1$  — давление за фронтом падающей УВ;  $r_1$  — отношение массы ВВ к инертной массе между ВВ и порошком (оболочка контейнера и различного рода прокладки);  $r_2$  — отношение массы порошка к упомянутой инертной массе;  $D$  — скорость детонации;  $\delta_{\text{ВВ}}$  — толщина слоя ВВ; + — схватывание есть; — — схватывания нет. В третьей строке контейнер был из алюминиевого сплава АМЦМ, в остальных опытах контейнеры стальные.

Отметим, что после химической обработки удалось получить настолько прочные плоские компакты, что их наносили в виде покрытия на стальную подложку сваркой взрывом. В то же время, при использовании тех же технологических режимов для исходных частиц прочные компакты не получены. Обычно, несмотря на хорошее уплотнение, гранулы легко отделялись друг от друга. Необходимо обратить внимание, что в настоящей работе, аналогично сварке взрывом, соединение частиц считалось прочным (наличие схватывания), если при испытаниях вырезанных из компактов образцов на растяжение разрушение происходило не по границам этих частиц, а по их объему.

Давления ударных волн для приведенных в табл. 2 экспериментов оценивали с использованием результатов, изложенных в [10, 17, 18].

Результаты экспериментов (см. табл. 1, 2) наглядно подтверждают влияние поверхностных пленок на величину ударно-волнового давления схватывания. Причем, на наш взгляд, эксперименты хорошо согласуются с расчетами. Для определения давления схватывания данного порошкового материала необходимо каким-либо способом оценить на частицах толщину поверхностных слоев, препятствующих процессу схватывания (окисные, гидрокисные слои, пленки адсорбированных газов, загрязнения и т. д.). Так как размер компактируемых частиц в практических случаях обычно гораздо меньше толщин пластин, свариваемых взрывом, то параметр  $\chi$  в задачах компактирования значительно больше, чем при сварке взрывом. Поэтому процесс полного самоочистения, ярко проявляющий себя в сварке взрывом, не всегда удается организовать при ударно-волновом нагружении порошков даже в динамическом режиме. Например, для смеси порошков  $Al + 20Pb + 2Sn + 1Cu$  при  $\delta_0 \approx 1$  мкм  $p_c > p_{max}$  (см. табл. 1), так что обеспечить схватывание частиц в твердом состоянии невозможно. В подобных случаях необходимо вначале химической обработкой (или другим возможным способом) уменьшить  $\delta_0$  так, чтобы обеспечить  $p_c < p_{max}$  на шкале давлений. После этого можно производить ударно-волновое нагружение.

Полученные соотношения (4) — (6) позволяют оценить необходимое для схватывания частиц давление первичной (падающей) УВ с использованием значений плотности и размера частиц, их прочности, твердости, толщины пленок на них, а также начальной плотности (пористости) материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов А. П. Схватывание металлов. — М.: Машгиз, 1958.
2. Кузнецов В. Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов: Избр. тр. — М.: Наука, 1977. — 310 с.
3. Красулин Ю. Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. — М.: Наука, 1970. — 119 с.
4. Гельман С. А. Основы сварки давлением. — М.: Машиностроение, 1970. — 312 с.
5. Davis H. A. Processing, properties and applications of advanced alloy powders // Proc. of the PM '90 World Conf. on Powder Metallurgy. — L., 1990. — V. 1. — P. 1—11.
6. Нестеренко В. Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. — Новосибирск: Наука, 1992. — 200 с.
7. Бондарь М. П., Нестеренко В. Ф. Деформации на контактах и критерии образования соединения при импульсных воздействиях // ФГВ. — 1991. — 27, N 3. — С. 103—117.
8. Дерibas А. А., Ставер А. М., Штерцер А. А. и др. Взрывное обжигание смеси из порошков стали и меди // Изв. СО АН СССР. Сер. тех. наук. — 1977. — Вып. 1, N 3. — С. 45—50.
9. Grumner R. Explosivverdichtung Pulvriger Substanzen. — Springer — Verlag, 1987.
10. Штерцер А. А. О передаче давления в пористые среды при взрывном нагружении // ФГВ. — 1988. — 24, N 5. — С. 113—119.
11. Захаренко И. Д., Киселев В. В. Влияние толщины оксидной пленки на положение нижней границы области сварки взрывом // Сварочное производство. — 1985. — N 9. — С. 4—5.
12. Павлов Ю. А., Ставер А. М., Штерцер А. А. Метание плоских пористых слоев скользящей детонационной волной // ФГВ. — 1984. — 20, N 6. — С. 142—145.
13. Carrrol M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. — 1972. — 43, N 4. — P. 1626—1636.
14. Адамец А., Злобин Б. С., Штерцер А. А. Отражение косых детонационных волн от металлических подложек // ФГВ. — 1991. — 27, N 3. — С. 126—128.
15. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1974. — Ч. 2.

16. *Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение)/Пер. с нем. под ред. М. Е. Дрица, Л. Х. Райтбарга. — М.: Металлургия, 1979.*
17. Deribas A. A., Staver A. M., Shtertser A. A. Some aspects of explosive compaction of porous layers // Proc. of the HERF '84 Int. Conf., 1984, USA, San-Antonio. — P. 109—111.
18. Штерцер А. А. Нагружение взрывом пористых тел в металлических оболочках.: Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Новосибирск, 1983.— 151 с.

630090, Новосибирск,  
Конструкторско-технологический  
институт гидроимпульсной  
техники СО РАН

Поступила в редакцию 30/III 1993

УДК 541.1.034:666.762.5

А. Г. Белошапко, А. А. Букаемский, Н. В. Губарева,  
И. Г. Кузьмин, А. М. Ставер

### ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПОРОШКОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Исследован процесс синтеза порошка диоксида циркония при ударно-волновом нагружении пористого металла и последующем разлете. Синтезированный порошок состоит из полых сферических оболочек и высокопористых конгломератов со средним размером 500 мкм. Удельная поверхность порошка не зависит от размера частиц и равна  $1,25 \pm 0,35 \text{ м}^2/\text{г}$ . При больших размерах преобладает тетрагональная, при малых — моноклинная модификации. Изучена возможность стабилизации окиси в высокотемпературной фазе.

Интерес к керамике из диоксида циркония обусловлен уникальными физико-технологическими свойствами материалов: высокой механической прочностью и вязкостью разрушения, огнеупорностью и коррозионной стойкостью. Вследствие этого керамику из оксида циркония применяют в качестве режущего и абразивного инструмента, как исходное сырье для изготовления деталей адиабатических и газотурбинных двигателей [1].

Качество изделий из керамики определяется физико-механическими характеристиками исходного сырья, которые зависят от метода получения порошков, поэтому разработка новых методов синтеза — актуальная научно-техническая задача.

В [2] описан динамический метод синтеза порошков оксида алюминия, который основан на явлении горения исходного порошка металла при взаимодействии с высокоскоростным потоком газа, содержащим кислород. Начальный нагрев и метание металла осуществляется за счет ударно-волновых процессов в слое исходного порошка, генерируемых от контактного заряда взрывчатого вещества.

В данной работе в качестве исходного вещества использовался порошок циркония марки ПЦрЧ с начальной плотностью  $1,76 \text{ г}/\text{см}^3$ . С целью изучения влияния параметров нагружения на характеристики синтезированного порошка в экспериментах изменялась величина  $r = m_{\text{ВВ}}/m_{\text{пор}}$  от 0,08 до 0,48. Эксперименты проводились в герметичной взрывной камере объемом  $0,4 \text{ м}^3$ . Начальное давление газа в камере 4 атм обеспечивало значительное превышение количества кислорода, необходимого для полного окисления металла. После подрыва и извлечения из камеры порошок исследовался методами рентгеноструктурного и термографического анализа, изучался на оптическом и растровом микроскопах, определялась удельная свободная поверхность  $S_{\text{уд}}$ .

Синтезированный продукт — это порошок желтого цвета с незначительным количеством черных включений. При изучении на оптическом и растровом микроскопах обнаружено, что он состоит из полых сферических оболочек и бесформенных конгломератов. Размер наиболее крупных частиц достигает 6 мм.

Более подробно изучались морфологические особенности строения синтезированных частиц. На рис. 1, а, приведен внешний вид крупной поллой оболочки, а на рис. 1, б — строение стенки. Видно, что полученные частицы