

УДК 669.7.018; 620.186; 620.17

С.Н. КУЛЬКОВ,**, С.А. ВОРОЖЦОВ*,**, В.Ф. КОМАРОВ***, В.В. ПРОМАХОВ*,***

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ УДАРНО-ВОЛНОВОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ¹

Представлены результаты исследований структуры, рентгенофазового анализа и механических свойств материалов на основе алюминия, полученных методом ударно-волнового компактирования. Показано, что такой метод позволяет получать образцы с плотностью, близкой к теоретической, и высокими значениями механических свойств.

Ключевые слова: ударно-волновое компактирование, алюминий, углерод, оксид алюминия, механические свойства.

Введение

Известно, что на свойства материала принципиальное влияние оказывает его внутреннее строение – дефектность, размер структурных элементов, наличие упрочняющих микро- и наноструктур и др. Сформировать необходимую структуру при традиционных схемах получения материалов удается не всегда. В частности, при обычных процессах, используемых в порошковой металлургии, происходит рост зерна, отжиг дефектов, что требует дополнительной механической обработки материалов. В связи с этим особое внимание обращает на себя метод динамического ударно-волнового (УВ) компактирования порошковых материалов [1]. Такой метод позволяет получать практически плотный компакт (материал с плотностью, близкой к теоретической) с одновременным введением в формуемую смесь необходимого количества упрочняющих фаз, например наночастиц оксида алюминия, высокомодульных углеродных частиц в виде детонационных алмазов и др.

Среди конструкционных материалов сплавы на основе алюминия – одни из самых используемых в настоящее время, при этом актуальной является задача повышения их механических свойств (модуль упругости, прочность, твердость) посредством введения в них прочных нанокристаллических частиц.

Цель работы – изучить структуру, фазовый состав и механические свойства сплавов, синтезированных методом ударно-волнового компактирования алюминиевого порошка с наночастицами оксида алюминия и детонационных алмазов.

Материалы и методика исследования

В качестве материалов для исследований использованы нанопорошки алюминия (получены методом электрического взрыва проводника) [2], углерода (в виде детонационных алмазов) [3] и плазмохимического оксида алюминия [4]. Количество плазмохимического порошка оксида алюминия и углерода в смеси с алюминием составляло 10 вес. %. Сплавы получены методом ударно-волнового компактирования аналогично [5].

В качестве ВВ применено стандартное промышленное взрывчатое вещество «Угленит Э-6», уплотненное до $\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$, имеющее тротильный эквивалент 0,453, фугасность 130 см^3 и скорость детонации $D = 2100\text{--}2500 \text{ м/с}$ [6]. Расчетное давление в детонационной волне составило $P = 13\text{--}15 \text{ кбар}$.

Исследование фазового состава и структурных параметров исходных порошков и полученных на их основе материалов осуществлялось на дифрактометре с использованием фильтрованного $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Съёмка велась по точкам с шагом $0,02\text{--}0,1^\circ$ в интервале $20^\circ < 2\theta < 120^\circ$. Идентификацию фаз проводили, сопоставляя пики рентгенограммы с картотеккой ASTM. Размер кристаллитов по рентгеновским пикам определяли по уширению наиболее интенсивного отражения на малых углах дифракции, а расчет величины микродисторсии кристаллической решетки (ϵ) – по уширению рефлекса на дальних углах дифракции [7].

Структура композиционных материалов исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на сканирующем электронном микроскопе Philips SEM 515.

Твердость материалов измеряли на твердомере «Супервиккерс» с нагрузкой 1000 г, а испытания на сжатие проводили на универсальной испытательной машине Instron 1185.

Результаты и их обсуждение

По данным рентгеноструктурного анализа в порошке алюминия средний размер кристаллитов составил 90 нм, величина микродисторсии кристаллической решётки 10^{-3} . Рентгенофазовый анализ показал, что порошок углерода состоит из рентгено-аморфной фазы в количестве около 40 % и фазы алмаза – около 45 %. Средний размер кристаллитов в нанопорошке углерода равен 4 нм, величина микродисторсии кристаллической решётки $17 \cdot 10^{-3}$. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, размер кристаллитов в порошке оксида алюминия около 30 нм. Величина микродисторсии кристаллической решетки $5 \cdot 10^{-3}$.

Из полученных распределений зерен по размерам видно (рис. 1), что в исходном состоянии их средний размер равен 220 мкм, а после ударно-волновой обработки он уменьшился до 10 мкм, однако присутствуют зерна с размерами до 70 мкм.

Энергодисперсионный микроанализ, проведенный интегрально по всей поверхности сплава в растровом электронном микроскопе, показал, что помимо алюминия в материале присутствует кислород в количестве 15 ат. %, вследствие наличия окисной пленки.

На рис. 1, б представлено распределение зерен по размерам в материале, полученном ударно-волновой обработкой порошковой смеси Al-C. Металлографические исследования показали, что на поверхности имеются зерна с четкими гранями, средний размер которых составил 11 мкм, причем в материале присутствует кислород 13 ат. % и углерод в количестве 12 ат. %.

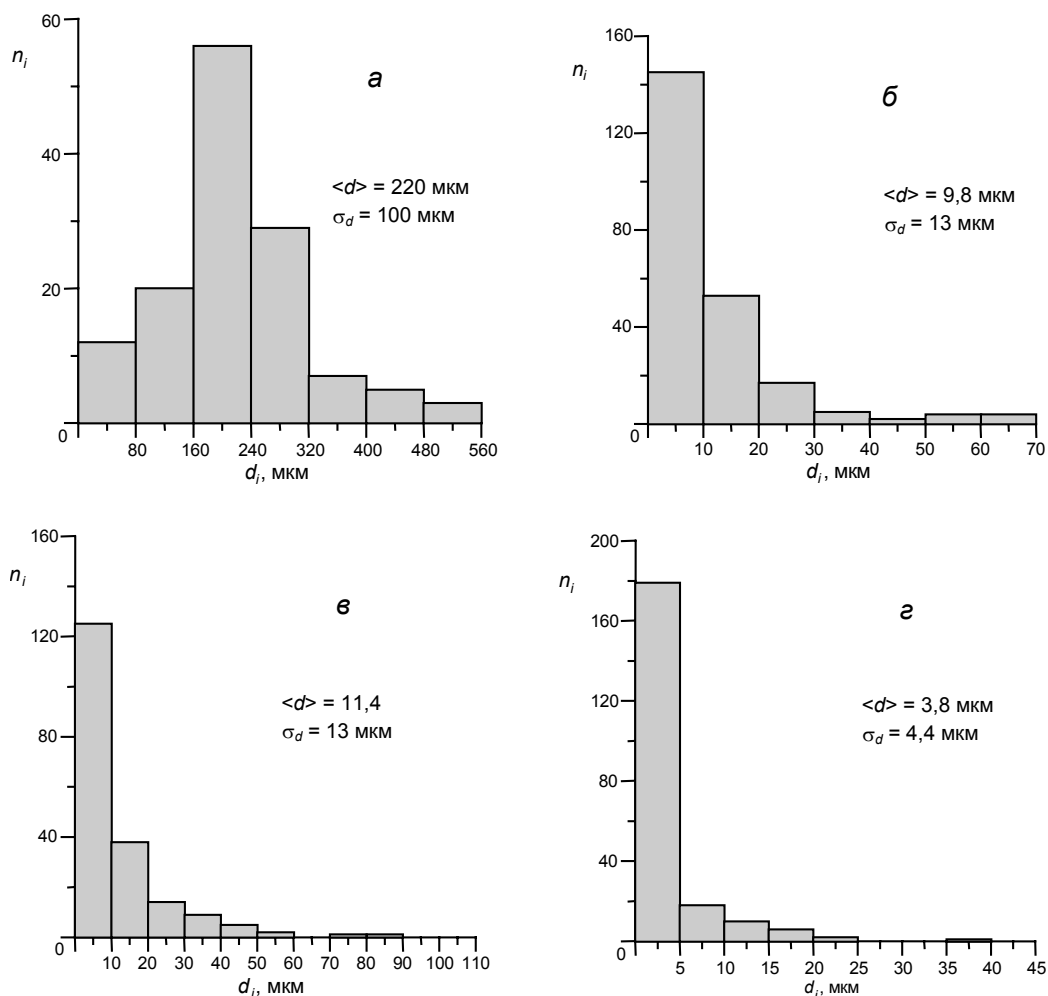


Рис. 1. Распределение зерен по размерам в технически чистом алюминии (а) и материалах, полученных ударно-волновой обработкой порошка алюминия (б), порошковых смесей Al-C (в) и Al-Al₂O₃ (г)

Из распределения зерен по размерам в материале Al-Al₂O₃ видно (рис. 1, г), что средний размер зерна уменьшился еще до 3,8 мкм, а количество кислорода возросло до 25 ат. %.

Таким образом, металлографические исследования показали, что ударно-волновая обработка смесей порошков позволяет получить практически беспористое состояние материала (рис. 2), при этом размер зерен полученных компактов составляет от 4 до 20 мкм в зависимости от вида смеси, что значительно выше размеров структурных элементов в порошке алюминия. Это, по-видимому, является следствием динамической рекристаллизации, произошедшей при ударно-волновом компактировании. При этом, если в компактах из алюминиевого порошка размер зерна (20 ± 10) мкм и есть зерна с размерами около 70 мкм, то введение упрочняющих частиц существенно его уменьшает – до 11 мкм в смесях с углеродом и до 4 мкм в смесях с оксидом алюминия.

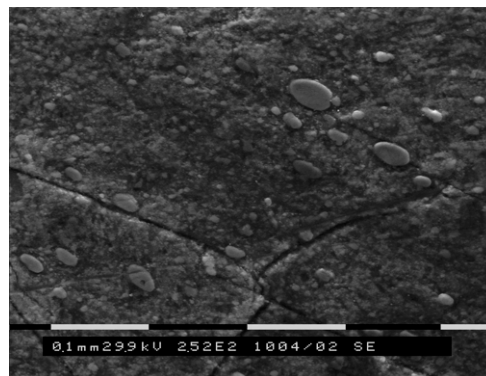


Рис. 2. Микроструктура сплава, полученного методом ударно-волнового компактирования порошка алюминия

На рис. 3 представлены фрагменты рентгеновских дифрактограмм, полученные от образцов после ударно-волновой обработки порошковых смесей. Изученные параметры тонкой кристаллической структуры показали, что размеры кристаллитов основной фазы алюминия во всех случаях около (80 ± 10) нм, это значение близко к размеру кристаллитов в порошке алюминия в исходном состоянии. По данным рентгеноструктурного анализа величина микродисторсии кристаллической решетки алюминия при введении оксида алюминия и углерода в формуемую смесь составила около $5,5 \cdot 10^{-3}$, а у материала без введения упрочняющих частиц $9,8 \cdot 10^{-3}$. Рентгенофазовый анализ образцов сплавов Al–Al₂O₃ показал, что Al₂O₃ находится в кубической γ -модификации.

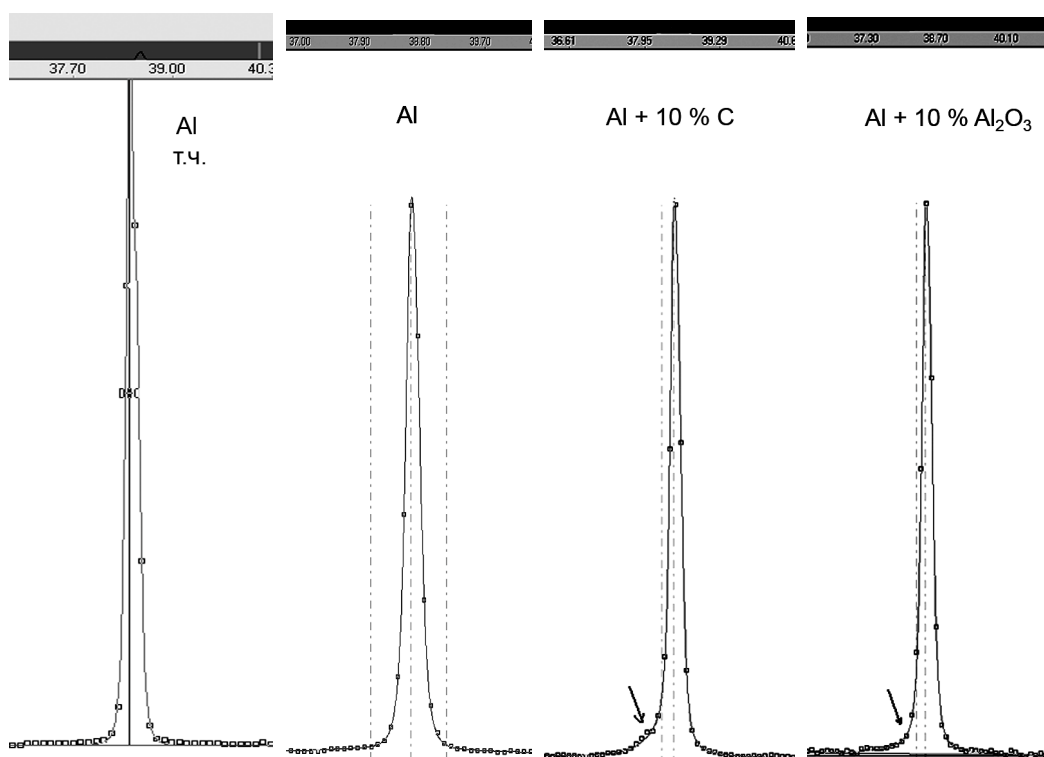


Рис. 3. Рентгеновские спектры образцов после УВ-обработки

Кроме этого, полученные рентгеновские данные свидетельствуют о том, что в образцах с добавлением углерода и оксида алюминия сформировано двухфазное состояние алюминия с заметно отличающимися параметрами структуры. У рентгеновского профиля с индексом (111), состоящего из нормальной линии алюминия, со стороны малых углов появилось слабое отражение (обозначено стрелкой). При разделении этих линий с помощью специального программного обеспечения было установлено, что ширина рефлекса составляет $1,1^\circ$, что позволило оценить размеры кристаллитов сформировавшейся фазы: с детонационными алмазами около (13 ± 5) нм, а при обработке с

нанопорошком оксида алюминия (8 ± 5) нм. При этом параметр решетки этой фазы увеличен на 0,5 %, что свидетельствует о ее неравновесном состоянии. Такое увеличение параметра может быть обусловлено сжимающими напряжениями, возникшими в результате ударно-волнового компактирования, при этом их оценка дает значение 350 МПа.

Наличие больших сжимающих напряжений должно сказаться на механических свойствах материалов, обработанных ударной волной. Действительно, измерения твердости показали практически десятикратное ее увеличение (по отношению к алюминию технической чистоты), причем максимальное для образцов, содержащих оксид алюминия, что может быть вызвано переходом части объема материала в наноструктурное состояние с характерным размером структурных элементов 10 нм. О том, что эти внутренние напряжения обусловлены ударно-волновой обработкой, свидетельствуют данные по твердости и прочностным характеристикам после отжига спрессованных образцов, они приведены в таблице в скобках. Видно, что происходит существенная релаксация напряжений, однако она меньше в образцах с детонационными алмазами.

Микроструктурные параметры исследованных образцов и их механические характеристики

	Размер кристаллитов алюминия/нанофазы, нм	Твердость, HV , МПа	Предел текучести, МПа	Упругая деформация до предела текучести σ_T
Al, технически чистый	155	190	30	0,0036
Al, после УВ-обработки	70	870 (35 после отжига)	-	-
Al+C после УВ-обработки	90/13	1025 (190 после отжига)	400 (240 после отжига)	0,023 (0,014 после отжига)
Al+Al ₂ O ₃ после УВ-обработки	70/8	1360 (140 после отжига)	500 (225 после отжига)	0,0205 (0,0105 после отжига)

Заключение

Показано, что ударно-волновое компактирование смесей порошков Al, Al-C и Al-Al₂O₃ в медных ампулах позволяет получать образцы с плотностью, близкой к теоретической, и существенно более высокими значениями механических характеристик – твердости, предела текучести. По-видимому, это обусловлено переходом части объема материала в наноструктурное состояние с характерным размером структурных элементов 10 нм и сжимающими напряжениями порядка 350 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прюмер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом: пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 128 с.
2. Лернер М.И., Шаманский В.В. // Журн. структ. химии. – 2004. – Т. 45. – С. 112–115.
3. Сакович Г.В., Комаров В.Ф., Петров Е.А. // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 3. – С. 3–23.
4. Григорьев М.В., Кульков С.Н. // Журнал СФУ. Техники и технологии. – 2009. – Т. 3. – № 2. – С. 294–300.
5. Nesterenko V.F., Kulkov S.N., et al. // High Pressure Research. – 1992. – V. 10. – P. 791–794.
6. Взрывчатое промышленное вещество Угленит марки Э-6. ГОСТ Р 52036-2003.
7. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1982.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.12.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

***Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия

E-mail: kulkov@ms.tsc.ru

Кульков Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. физики наноструктурных керамических материалов;
 Ворожцов Сергей Александрович, к.т.н., мл. науч. сотр. лаб. физики наноструктурных керамических материалов;
 Комаров Виталий Федорович, д.т.н., профессор, зав. лаб. физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем;

Промахов Владимир Васильевич, к.т.н., мл. науч. сотр. лаб. физики наноструктурных керамических материалов.