

9. Babourova O.V., Frolov B.N., Kudlaev P.E., and Romanova E.V. // Gravitation, Astrophysics, and Cosmology: Proc. 12th Asia-Pacific Int. Conf. Moscow, 28 Jun – 5 July 2015. – 2016. – P. 191–195.
10. Babourova O.V., Frolov B.N., and Klimova T.A. // Class. Quantum Grav. – 1999. – V. 16. – P. 1–14 (gr-qc/9805005).
11. Синг Дж. Общая теория относительности. – М.: ИЛ, 1963. – 432 с.
12. Коганов А.В., Кречет В.Г. // Ярославский педагогический вестник. – 2012. – № 3. – Т. III (Естественные науки). – С. 65–71.

Московский педагогический государственный университет, г. Москва, Россия

Поступило в редакцию 13.04.16.

**Бабурова** Ольга Валерьевна, д.ф.-м.н., профессор, профессор, e-mail: baburova@orc.ru;  
**Кудлаев** Павел Эдуардович, аспирант, e-mail: pavelkudlaev@gmail.com;  
**Фролов** Борис Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор, e-mail: frolovbn@orc.ru.

УДК 536-36; 546.05

*И.А. ЖУКОВ, М.Х. ЗИАТДИНОВ, А.Б. ВОРОЖЦОВ, А.С. ЖУКОВ, С.А. ВОРОЖЦОВ, В.В. ПРОМАХОВ*

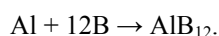
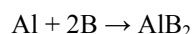
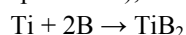
## САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ БОРИДОВ Al и Ti\*

**Ключевые слова:** бориды, алюминий, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиционный материал.

Бориды алюминия и титана обладают важными свойствами: высокой температурой плавления, износостойкостью, жаропрочностью, стойкостью к окислению и служат базовыми материалами для изготовления керамик и огнеупоров. Новой областью применения боридов может являться цветная металлургия и высокоэнергетические материалы. В качестве высокоэнергетических материалов используется высокая калорийность окисления боридов, а в металлургии – их высокий модифицирующий эффект [1, 2].

Распространенным способом получения боридов является печной синтез, однако такой способ влечет за собой использование громоздкого печного оборудования и высоких энергетических затрат. При этом реакции взаимодействия Ti и Al с бором экзотермичны, что является основой для протекания процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) боридов. При таком синтезе горением отпадает необходимость использования сложного печного оборудования, и, что наиболее важно, синтезированные материалы обладают более высокими эксплуатационными характеристиками за счет получения контролируемой дисперсности и требуемыми элементным и фазовым составами. Таким образом, исследование возможности синтеза горением боридов Al и Ti является актуальной задачей.

В настоящей работе для реализации синтеза горением боридов использовали стехиометрическую экзотермичную шихту из порошков алюминия (марки АСП), титана (марки ПТОМ) и аморфного бора:



Содержание основных элементов в исходных порошках превышало 99 %. Синтез боридов в режиме СВС осуществлялся в лабораторном реакторе объемом 2 л.

В проведенном эксперименте по получению TiB<sub>2</sub> максимальная скорость горения для стехиометрической смеси Ti+2B составила ~ 9 см/с. Измеренная температура горения при этом превышала 2500 °С при расчетной T<sub>ад</sub> = 3190 К. Синтез горением в сильно экзотермичной системе Ti–B реализуется в широком диапазоне изменения соотношения компонентов шихты. Пределы горения при этом слабо зависят от дисперсности порошка титана. При использовании порошка титана с размером частиц менее 40 мкм смесь Ti+α·B горит при 0.45 ≤ α ≤ 5.5 [3].

Для синтеза боридов алюминия применяли сопряженный СВС-процесс вследствие недостаточной экзотермичности исходной шихты. Недостаточное тепловыделение при образовании AlB<sub>2</sub> и AlB<sub>12</sub> компенсируется энергией «химической печи», в качестве такой использовали смесь Ti+α·B.

Рентгенофазовый анализ показал высокую степень выхода целевых боридов при СВ-синтезе: 88.04 % для AlB<sub>12</sub>, 93.18 % для AlB<sub>2</sub> и 98.43 % для TiB<sub>2</sub>. На рис. 1 приведена типичная рентгенограмма синтезированного диборида алюминия.

\* Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.», соглашение № 14.578.21.0034 (уникальный идентификатор RFMEFI57814X0034).

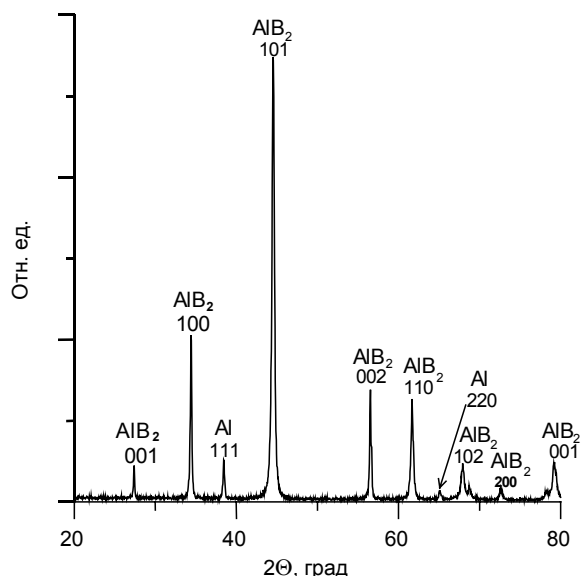
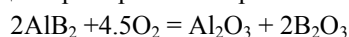


Рис. 1. Типичная рентгенограмма диборида алюминия, полученного в режиме СВС

Для оценки возможности применения синтезированных боридов в качестве компонентов высокоэнергетических материалов был проведен дифференциальный термический анализ (ДТА)  $\text{AlB}_2$ , средний размер частиц которого составлял 6.2 мкм. По данным ДТА масса образца увеличилась примерно в 2.17 раза, при расчетном увеличении массы по реакции примерно в 2.26 раза:



Таким образом, степень окисления диборида алюминия составила ~ 96 %.

Экспериментальное исследование возможности применения полученных боридов в качестве упрочняющей фазы в легких сплавах было проведено посредством введения в расплав алюминия (сплав АК7) 0.2 об. % частиц  $\text{TiB}_2$  (средний размер частиц 0.5 мкм). Введение частиц в металл осуществлялось согласно методике эксперимента [4]. Установлено, что предел прочности (при растяжении) полученного сплава увеличивается со 170 до 220 МПа при увеличении пластичности на 0.5 %. Данный факт объясняется следующим. При кристаллизации жидкого металла частицы диборида титана являются центрами зародышеобразования, что приводит к измельчению зерна сплава более чем в 2 раза по сравнению с исходным (без частиц) сплавом.

Таким образом, показана принципиальная возможность получения боридов Al и Ti как обычным СВС, так и с применением его сопряженного варианта. Установлено, что синтезированные горением бориды алюминия и титана перспективны для применения в качестве высокоэнергетических материалов и модификаторов алюминиевых сплавов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д. Высокотемпературные бориды. – М.; Челябинск: Металлургия, 1991. – 367 с.
2. Сакович Г.В., Ворожцов С.А., Ворожцов А.Б. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59. – №. 3. – С. 104–109.
3. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение. – Черногловка: ИСМАН, 2000. – 224 с.
4. Vorozhtsov S., Zhukov I., Vorozhtsov A., et al. // Adv. Mater. Sci. Eng. – 2015. – V. 2015. – P. 6.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

Поступило в редакцию 28.03.16.

**Жуков** Илья Александрович, к.т.н., ст. науч. сотр. лаб. нанотехнологий в металлургии, e-mail: gofra930@gmail.com;

**Зиятдинов** Мансур Хузиахметович, к.т.н., ст. науч. сотр. лаб. высокоэнергетических систем и новых технологий НИИ ПММ ТГУ, e-mail: ziatdinovm@mail.ru;

**Ворожцов** Александр Борисович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. высокоэнергетических и специальных материалов, e-mail: abv1953@mail.ru;

**Жуков** Александр Степанович, д.ф.-м.н., зав. лаб. высокоэнергетических систем и новых технологий НИИ ПММ ТГУ, e-mail: Zhuk\_77@mail.ru;

**Ворожцов** Сергей Александрович, к.т.н., зав. лаб. нанотехнологий в металлургии, e-mail: vorn1985@gmail.com;

**Промыхов** Владимир Васильевич, к.т.н., ст. науч. сотр. лаб. нанотехнологий в металлургии, e-mail: vvpromakhov@mail.ru.