

ПОРОШКИ БОРА, ПОЛУЧЕННЫЕ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ: ОТ МОРФОЛОГИИ ДО ГОРЕНИЯ*

Д. Б. Мееров¹, К. А. Моногаров², Н. В. Муравьев³, Н. И. Шишов⁴, А. Н. Пивкина⁵,
Ю. В. Фролов⁶

Аннотация: Исследованы микроструктура, химический состав оксидного слоя и параметры окисления порошков бора, полученных различными методами. Детально изучено влияние обнаруженных в поверхностном слое частиц бора примесей на термическое поведение B_2O_3 , при этом особое внимание уделено процессу испарения. Установлено, что наличие примесей Al_2O_3 или MgO приводит к существенному повышению термической стабильности оксидной оболочки частиц бора. Показано, что скорость горения и размер конденсированных продуктов сгорания (КПС) в модельных составах В / перхлорат аммония (ПХА) / парафин практически не зависят от марки бора. Однако содержание активного бора в агломератах, вылетающих с поверхности горения, существенно выше для образцов аморфного и электролитического бора, что является преимуществом при их использовании в газогенераторах для ракетно-прямоточных двигателей (РПД).

Ключевые слова: частицы бора; оксид бора; термический анализ; горение борсодержащих составов; конденсированные продукты сгорания

DOI: 10.30826/CE20130111

Литература

1. *Van Devener, B., Perez J. P. L., Jankovich J., Anderson S. L.* Oxide-free, catalyst-coated, fuel-soluble, air-stable boron nanopowder as combined combustion catalyst and high energy density fuel // *Energ. Fuel.*, 2009. Vol. 23. No. 12. P. 6111–6120. doi:10.1021/ef900765h.
2. *Gany A., Netzer D. W.* Combustion studies of metalized fuels for solid-fuel ramjets // *J. Propul. Power*, 1986. Vol. 2. No. 5. P. 423–427.
3. *Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Прохоров А. Н., Яновский Л. С.* Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоёмких конденсированных составов в высокоэнтальпийном воздушном потоке // *Физика горения и взрыва*, 2017. № 3. С. 42–52.
4. *Foelsche R., Burton R., Krier H.* Boron particle ignition and combustion at 30–150 atm // *Combust. Flame*, 1999. Vol. 117. No. 1-2. P. 32–58.
5. *Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E. L.* Oxidation kinetics and combustion of boron particles with modified surface // *Combust. Flame*, 2016. Vol. 173. P. 288–295. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.08.027.
6. *Liu X., Gonzales J., Schoenitz M., Dreizin E. L.* Effect of purity and surface modification on stability and oxidation kinetics of boron powders // *Thermochim. Acta*, 2017. Vol. 652. P. 17–23. doi: 10.1016/j.tca.2017.03.007.
7. *Liang D., Liu J., Zhou Y., Zhou J.* Ignition and combustion characteristics of amorphous boron and coated boron particles in oxygen jet // *Combust. Flame*, 2017. Vol. 185. P. 292–300. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.07.030.
8. *Whittaker M. L., Cutler R. A., Anderson P. E.* Boride-based materials for energetic applications // *Mater. Res. Soc. Symp.*, 2012. Vol. 1. P. 1405. doi: 10.1557/opl.2012.64.
9. *Yeh C. L., Kuo K. K.* Ignition and combustion of boron particles // *Prog. Energ. Combust.*, 1996. Vol. 22. No. 6. P. 511–541. doi: 10.1016/S0360-1285(96)00012-3.
10. *Liu J., Xi J., Yang W., Hu Y., Zhang Y., Wang Y., Zhou J.* Effect of magnesium on the burning characteristics of boron particles // *Acta Astronaut.*, 2014. Vol. 96. No. 1. P. 89–96. doi: 10.1016/j.actaastro.2013.11.039.
11. *Sandall E., Kalman J., Quigley J. N., Munro S., Hedman T. D.* A study of solid ramjet fuel containing boron–magnesium mixtures // *Propulsion Power Research*, 2017. Vol. 6. No. 4. P. 243–252. doi: 10.1016/j.jprr.2017.11.004.
12. *Нечепуренко А. С., Шамриков В. М., Ласыченков Ю. Я., Самуль С. В., Кислицын В. И.* Бор, его бескислородные соединения и их применение в современной технике // *Труды УНИХИМ’а*, 2005. Т. 72. С. 1–6.

* Работа выполнена за счет субсидии на выполнение государственного задания по теме 0082-2018-0002, АААА-А18-118031490034-6.

¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, mmeerov@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kostyk3d@mail.ru

³ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук,

muagayuev.nikita@ya.ru

⁴ Федеральный центр двойных технологий «Союз», г. Дзержинский, Московская область, fedt@monnet.ru

⁵ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, alla_pivkina@mail.ru

⁶ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, a7777@chph.ras.ru

13. Bellott B.J., Noh W., Nuzzo R. G., Girolami G. S. Nanoenergetic materials: Boron nanoparticles from the pyrolysis of decaborane and their functionalisation // Chem. Commun., 2009. No. 22. P. 3214.
14. Jain A., Anthonysamy S., Ananthasivan K., Ranganathan R., Mittal V., Narsimhan S. V., Rao V. Characterization of electrodeposited elemental boron // Mater. Charact., 2008. Vol. 59. No. 7. P. 890–900.
15. Meerov D., Monogarov K., Bragin A., Frolov Yu., Nikiforova A. Boron particles agglomeration and slag formation during combustion of energetic condensed systems // Phys. Procedia, 2015. Vol. 72. P. 85–88.
16. Burke A. R., Brown C. R., Bowling W. C., Glaub J. E., Kapsch D., Love C. M., Whitaker R. B., Moddeman W. E. Ignition mechanism of the titanium–boron pyrotechnic mixture // Surf. Interface Anal., 1988. Vol. 11. No. 6-7. P. 353–358. doi: 10.1002/sia.740110614.
17. Rizzo H. F. Oxidation of boron at temperatures between 400 and 1300 °C in air // Boron Synthesis, Structure, and Properties Conference Proceedings / Eds. J. A. Kohn, W. F. Nye, G. K. Gaulé. — Boston, MA, USA: Springer US, 1960. P. 175–189. doi: 10.1007/978-1-4899-6572-1_21.
18. Tripp W. C., Graham H. C. Thermogravimetric study of the oxidation of ZrB₂ in the temperature range of 800° to 1500 °C // J. Electrochem. Soc., 1971. Vol. 118. No. 7. P. 1195–1199. doi: 10.1149/1.2408279.
19. Lavrenko V. A., Pomytkin A. P., Kislyj P. S., Grabchuk B. L. Kinetics of high-temperature oxidation of boron carbide in oxygen // Oxid. Met., 1976. Vol. 10. No. 2. P. 85–95. doi: 10.1007/BF00614238.
20. Термические константы веществ: Справочник / Под ред. В. П. Глушко. — М.: ВИНТИ, 1965–1982.
21. Ağaoğullari D., Balci Ö., Gökçe H., Duman İ., Öveçoğlu M. L. Synthesis of magnesium borates by mechanically activated annealing // Metall. Mater. Trans. A, 2012. Vol. 43. No. 7. P. 2520–2533. doi: 10.1007/s11661-012-1109-5.
22. Peil K., Marcelin G., Galya L. G. Acid and catalytic properties of nonstoichiometric aluminum borates // J. Catal., 1989. Vol. 115. No. 2. P. 441–451. doi: 10.1016/0021-9517(89)90048-1.
23. Giellisse P. J. M., Foster W. R. The system Al₂O₃–B₂O₃ // Nature, 1962. Vol. 195. P. 69–70. doi: 10.1038/195069a0.
24. Bale C. W., Bélisle E., Chartrand P., Decterov S. A. FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016 // Calphad., 2016. Vol. 54. P. 35–53. doi: 10.1016/j.calphad.2016.05.002.
25. Hildenbrand D. L., Theard L. P., Saul A. M. Transpiration and mass spectrometric studies of equilibria involving BOF(g) and (BOF)₃(g) // J. Chem. Phys., 1963. Vol. 39. P. 1973–1978. doi: 10.1063/1.1734569.
26. Mohammad Sharifi E., Karimzadeh F., Enayati M. H. A study on mechanochemical behavior of B₂O₃–Al system to produce alumina-based nanocomposite // J. Alloy. Compd., 2009. Vol. 482. No. 1. P. 110–113. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.04.051.

Поступила в редакцию 04.12.2019