

**АКТИВНОСТЬ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, БОРА И МАГНИЯ**И.В. Сорокин

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.Г. Коротких  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, 634050  
E-mail: [ivs9@tpu.ru](mailto:ivs9@tpu.ru)

**ACTIVITY OF METAL POWDERS BASED ON ALUMINUM, BORON AND MAGNESIUM**I.V. Sorokin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.G. Korotkikh  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin prosp., 30, 634050  
E-mail: [ivs9@tpu.ru](mailto:ivs9@tpu.ru)

***Abstract.** This study investigates the metal powders activity based on aluminum, boron and magnesium, used in composite solid propellant as fuel additives. The paper presents data of metal powders activity: the onset temperature of oxidation and the intense oxidation temperature, the weight gain in the temperature range of 400 – 1200 °C and the maximum oxidation rate of the metal powders.*

**Введение.** Бор и его компоненты являются одним из наиболее перспективных металлических горючих для применения в твердом ракетном топливе, высвобождаемая при его окислении удельная энергия является одной из наибольших в пересчете на единицу массы и максимальной из возможных при пересчете на единицу объема [1]. Для улучшения параметров горения смесевых топлив используются добавки металлических порошков и их оксидов: магний, алюминий, титан, цирконий, церий, железо, медь [1-3].

В представленной работе приведены результаты исследования активности порошков металлов на основе алюминия, бора и магния, которые могут быть использованы в смесевых высокоэнергетических материалах в качестве добавок.

**Исследуемые образцы.** В исследовании основных параметров активности порошков использовались: ультрадисперсный порошок (УДП) алюминия марки Alex, полученный методом электрического взрыва проводников (ЭВП), порошок аморфного бора В, диборид алюминия  $AlB_2$ , сплав Al-Mg, механосмесь на основе Al и В. Массовое соотношение компонентов в смеси варьировалось.

**Результаты и обсуждение.** Проведены серии ТГ-ДСК измерений при нагреве исследуемых порошков металлов. Исследование процесса термического окисления порошков осуществлялось с использованием совмещенного анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в аргоне при скорости нагрева 10 °C/мин. Для ТГ-ДСК анализа использовались образцы массой ~10 мг, которые помещались в тигель и затем устанавливались в нагревательную печь. Для исследуемых образцов, содержащие различные металлические горючие, получены данные ТГ и ДСК, линии которых представлены на рис. 1.

Окисление УДП Alex начинается при температуре ~570 °C с максимальным выделением тепла при 600 °C (рис. 1, а). При температуре ~660 °C происходит эндотермическое плавление алюминия с резким увеличением массы образца Alex за счет образования оксида алюминия  $Al_2O_3$ . При температуре ~720 °C наблюдается вторая стадия окисления образца Alex с менее резким увеличением массы и максимальным

значением тепловыделения при температуре  $\sim 800$  °С. Дальнейшее окисление образца до температуры 1200 °С происходит с плавным увеличением массы образца Alex ( $\sim 13\%$ ).

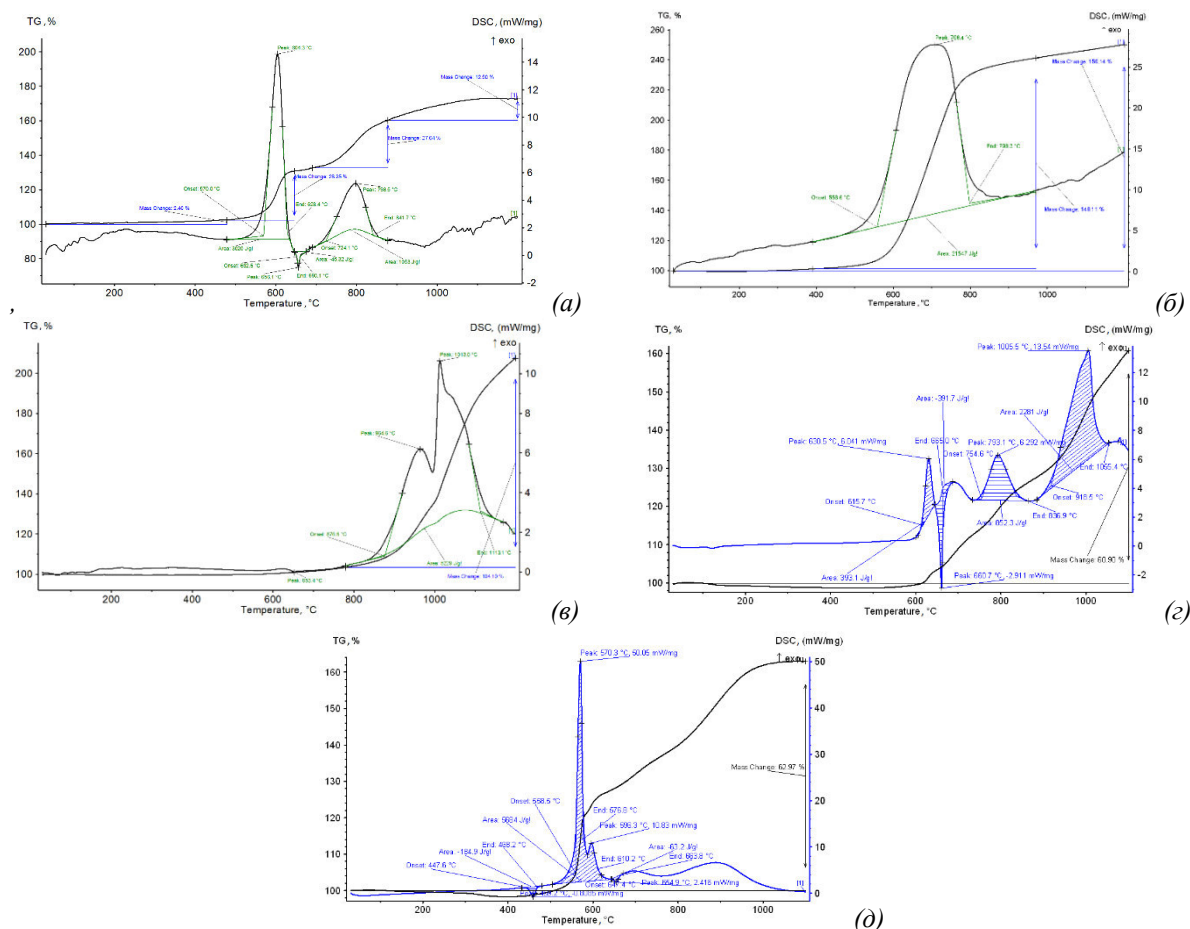


Рис. 1. Данные ТГ-ДСК анализа порошков (а) Alex, (б) бор, (в)  $AlB_2$ , (з)  $Al/B$  и (д)  $Al/Mg$

Для порошка аморфного бора окисление начинается при температуре  $\sim 560$  °С и сопровождается интенсивным тепловыделением при температуре 710 °С. При нагреве до 800 °С наблюдается увеличение массы образца. Окисление диборида алюминия  $AlB_2$  начинается при температуре  $\sim 880$ °С, происходит с увеличением массы образца и интенсивными тепловыделениями при температурах 960 и 1010 °С (рис. 1, в).

Окисление механосмеси  $Al/B$  начинается при температуре  $\sim 616$  °С и протекает с резким увеличением массы образца. Окисление сопровождается несколькими экзотермическими пиками с максимальным выделением тепла при температурах 630, 793 и 1006 °С. Анализируя данные термограмм видно, что пики тепловыделения при 630 и 793 °С соответствуют окислению порошка алюминия (рис. 1, а и з), а пики тепловыделения при 1006 °С (рис. 1, з) соответствует окислению порошка диборида алюминия (рис. 1, в). Для  $Al/Mg$ -сплава окисление начинается при температуре  $\sim 560$  °С. Максимальное выделение тепла происходит при температуре 570 °С, которое сопровождается резким увеличением массы образца ( $\sim 20\%$ ). Дальнейшее окисление смеси  $Al/Mg$  с 600 до 1100 °С протекает с менее резким увеличением массы образца. Следует отметить, что для образцов  $AlB_2$  и смесях  $Al/B$  и  $Al/Mg$  (см. рис. 1, в, з, д) при температуре  $\sim 640$ – $660$  °С наблюдаются экзотермические пики, переходящий в

эндотермический, который соответствует температура плавления алюминия. Наличие эндотермического пика для диборида алюминия может свидетельствовать о наличии свободных частиц алюминия [3].

Параметры активности используемых порошков представлены в табл. 1. По данным табл. 1 видно, что наибольшие скорости окисления наблюдаются у порошков аморфного бора ( $v_{\text{ок}} = 0,00958$  мг/с) и Al/Mg-сплава ( $v_{\text{ок}} = 0,0101$  мг/с), наименьшее значение скорости окисления ( $v_{\text{ок}} = 0.00159$  мг/с) наблюдается у УДП Alex.

Таблица 1

Температуры начала и интенсивного окисления, изменение массы и скорость окисления металлов

Образец	$T_{\text{он}},$ °C	$T_{\text{инт}},$ °C	Увеличение массы $\Delta m$ , %			Максимальная скорость окисления $v_{\text{ок}}$ , мг/с (диапазон температур, °C)
			400 – 660°C	660 – 1200°C	400 – 1200°C	
Alex	570	604	29.5	41.5	71.0	0.00159 (590 – 610)
	724	799				
B	559	708	47.8	101.0	148.7	0.00958 (655 – 735)
AlB <sub>2</sub>	877	965	1.3	106.6	107.9	0.00544 (1010 – 1060)
Al/B	616	970	5.5	56.9	62.4	0.00454 (965 – 1010)
Al/Mg	559	570	32.0	33.0	65.0	0.0101 (559 – 578)

**Заключение.** В работе проведено исследование химической активности порошков алюминия, бора, диборида алюминия, Al/Mg и Al/B. Получены данные процесса термического окисления исследуемых порошков металлов при нагреве в печи с использованием совмещенного анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter. Установлены значения температуры начала окисления и интенсивного окисления, изменения массы исследуемых образцов в диапазоне температур 400 – 1200 °C. Определена максимальная скорость окисления исследуемых порошков: наибольшим значением обладает Al/Mg-сплав (0.0101 мг/с), наименьшим – УДП алюминия Alex (0.00159 мг/с).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-33-90015.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gany A., Timnat Y. M. Advantages and drawbacks of boron-fueled propulsion // Acta Astronautica. – 1993. – V. 29., № 3. – P. 181-187.
2. Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E.L. Boron doped with iron: Preparation and combustion in air // Combustion and Flame. – 2019. – V. 200. – P. 286–295.
3. Гусейнов Ш.Л., Федоров С.Г., Тузов А.Ю., Малашин С.И., Драчев А.И., Киселев М.Р., Певченко Б.В., Воронько О.В. Нанодисперсные бориды алюминия, полученные плазменной перекомденсацией микронных порошков алюминия и бора // Российские нанотехнологии. – 2015. – Т. 10., № 5-6. – С. 79–85.