

**БЫСТРОГОРЯЩИЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ Ti – B – Al**

Я.А. Дубкова, В.В. Промахов, И.А. Жуков

Научный руководитель: профессор, д.ф.м.н. А.С. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [y.a.dubkova@niipmm.tsu.ru](mailto:y.a.dubkova@niipmm.tsu.ru)

**FAST-BURNING MIXTURE ON THE BASIS OF POWDER COMPOSITIONS OF Ti – B – Al**

Y.A. Dubkova, V.V. Promakhov, I.A. Zhukov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.S. Zhukov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: [y.a.dubkova@niipmm.tsu.ru](mailto:y.a.dubkova@niipmm.tsu.ru)

***Abstract.** Results of the experimental research of burning rate of high-energy materials are presented. It is shown that burning rate of the received exemplars of combustion cells for system of 69% Ti – 31% of B makes 70–80 mm/s. It is shown that addition 2,5 mass.% the aluminum powder with average particle size ~ 100 microns to system of 69% Ti – 31 % B, burning rate of system makes ~ 120 mm / with at external pressure to 6 MPas. Strength characteristics of the experimental exemplars are received.*

**Введение.** Создание перспективных ракетных комплексов различного назначения требует повышения внутрибаллистических и эксплуатационных характеристик применяемых двигательных установок. Что, в свою очередь, ведет к необходимости повышения уровня энергетических и эксплуатационных свойств применяемых твердотопливных зарядов. Скорость горения наряду с теплотой сгорания, теплоемкостью и теплопроводностью является важнейшей характеристикой топлив. Скорость горения зависит от многих факторов, в том числе, от внешних условий – давления, начальной температуры топливного элемента, перегрузок, напряженно-деформированного состояния и др.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований скорости горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) на основе боросодержащих порошковых смесей в зависимости от внешних условий. Изучены прочностные характеристики разработанной порошковой системы (Ti+B+Al) с учетом влияния выбора горючего связующего и режимов изготовления образцов.

**Материалы и методы исследования.** Исследования проводились на образцах ВЭМ цилиндрической формы, изготовленных путем прессования порошковых смесей в стальной пресс-форме. Для исследований были выбраны смесевые композиции, состоящие из порошков аморфного бора, титана и алюминия в различном массовом соотношении. Изображения исходных порошков, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-изображения), приведены на рис. 1. Состав порошковой смеси был выбран исходя из результатов исследований, проведенных ранее [1–2].

Прессование порошковой смеси без введения связующего неэффективно, поскольку полученные образцы обладают недостаточной прочностью и не сохраняют форму. Поэтому был осуществлен подбор горючего связующего (ГСВ) для обеспечения достаточной прочности, позволяющей спрессованной порошковой смеси сохранять форму в процессе эксплуатации. В качестве ГСВ был выбран

сверхвысокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ в гранулах размером от 40 до 80 мкм, а также 3-х и 6-ти % водный раствор поливинилового спирта (ПВС) ( $C_2H_4O$ )<sub>x</sub>.

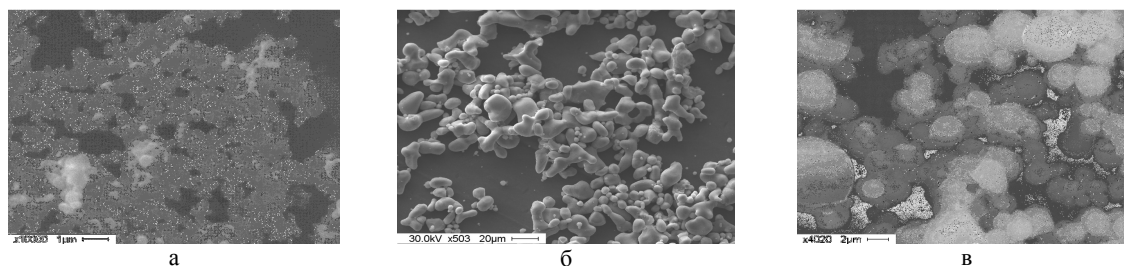


Рис. 1. РЭМ-изображения исходных порошков: аморфный бор (а); титан марки ПТОМ (б); алюминий марки АСД (в)

Было изготовлено две группы образцов с указанным далее набором компонентов: базовая смесь – (69 масс. %Ti+31 масс. % В)+2,5 масс. % Al; ГСВ – СВМПЭ от 0 до 10 масс. %; связующее – 3% водный раствор ПВС для первой группы образцов и 6% водный раствор ПВС для второй группы образцов.

Термообработка полученных прессовок осуществлялась при режиме, подобранном с учетом анализа данных литературы [3–4]. Нагрев проводили в муфельной печи в воздушной среде до температуры 180 °С с изотермической выдержкой в течение 2 ч. При указанной температуре, согласно данным [4], происходит плавление СВМПЭ и полимеризация ПВС. При этом указанной выдержки было достаточно для полного испарения водной группы.

Механические испытания полученных образцов на сжатие осуществлялось на испытательной машине Instron 3369.

Скорость горения определялась экспериментально при различных внешних условиях: при атмосферном давлении в воздушной среде, а также в среде инертного газа (аргон/азот) в диапазонах изменения давления (0,1 ÷ 6) МПа. Процесс горения фиксировался с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры Citius Centurio C100 High Speed Camera. Съемка производилась при следующих параметрах: время экспозиции  $1,5 \cdot 10^{-3}$  с; разрешение 448×442 пикс; скорость съемки 424 1/с; диафрагма 16 (короткофокусный объектив); светофильтр УФС-6. После чего полученные видеофайлы обрабатывались с применением специальных программ для обработки видеофайлов с разбивкой в покадровом режиме «TimeLapse» (рис. 2).

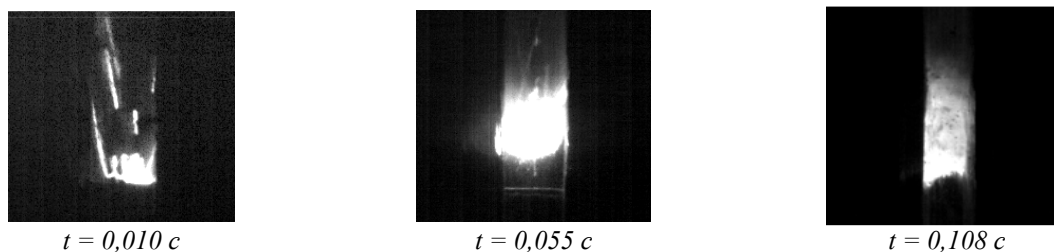


Рис. 2. Типичные кадры видеосъемки процесса горения образца (система (69 масс. % Ti + 31 масс. % В) + 2,5 масс. % Al)

**Результаты.** Экспериментально установлено, что для обеспечения скорости горения образцов (100 ÷ 120) мм/с в диапазоне давления (0,1÷6) МПа минимально необходимое количество добавленного мелкодисперсного порошка алюминия составляет 2,5 масс. % сверх массы стехиометрической смеси

Ti+V. Типичные полученные диаграммы нагружения вида «деформация-напряжение» представлены на рис. 3.

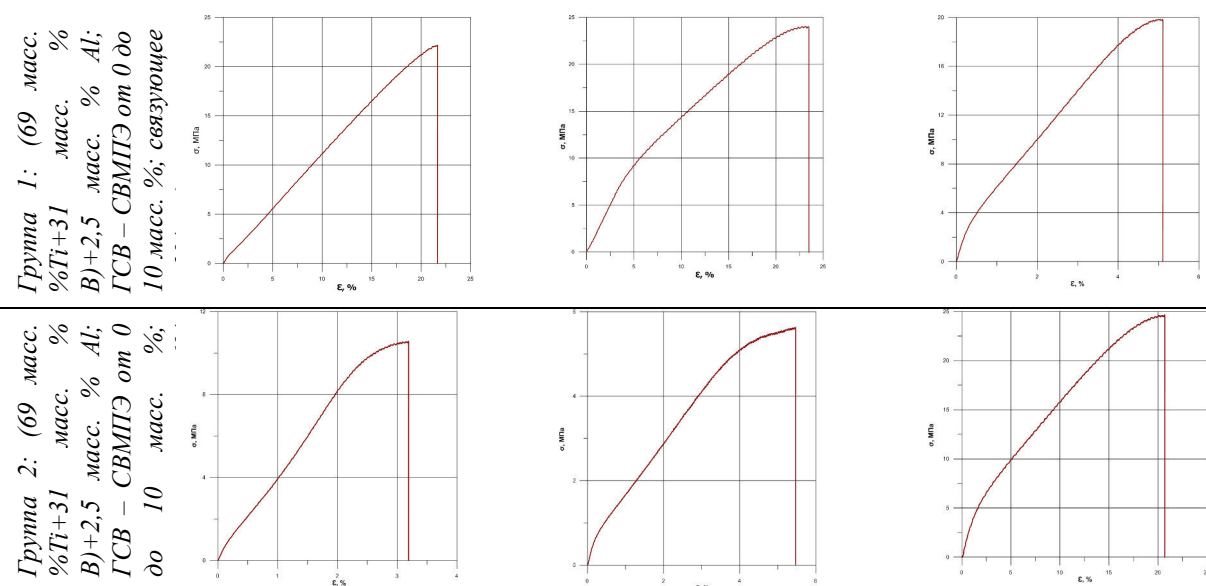


Рис. 3. Типичные диаграммы нагружения экспериментальных образцов

**Закключение.** Установлено, что большей прочностью на сжатие обладают образцы, содержащие в качестве связующего 4 масс. % СВМПЭ и 1 масс. % ПВС. Прочность образцов составила ~ 38 МПа. Обнаружено, что прочность образцов, полученных из порошковой смеси (69 % Ti + 31 % B) + 2,5 масс. % Al с добавлением 1 об. % связующего ПВС составляет ~ 40 МПа. По-видимому, это связано с наличием пористости в образцах, содержащих большое количество связующих (СВМПЭ и ПВС). Анализ результатов измерений скорости горения образцов показал следующее. Скорость горения образцов в рассматриваемом диапазоне давлений (0,1 ÷ 6) МПа не зависит от давления. Скорость горения образцов составляла (100 ÷ 120) мм/с.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60028 мол\_а\_дк и при финансовой поддержке гранта Президента МК-837.2017.8 договор № 14.Y30.17.837-МК.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I.Zhukov, V.Promakhov, M. Ziatdinov, A. Zhukov, Y. Dubkova. Development of powder HEM compositions with high burning rate. // High energy materials: demilitarization, antiterrorism and civil application» XII International Workshop HEMs-2016. September 7–9, 2016. – Tomsk. – P. 141.
2. Новиков Н.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Зависимость состава продуктов и скорости горения в системах металл-бор от соотношения реагентов // ФГВ. – 1974. – №2. – С. 201–206.
3. Распопов Л.Н., Белов Г.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Синтез и свойства // Пластические массы. – 2008. – №. 5. – С. 13–19.
4. Скороход В.В., Олевский Е.А., Штерн М.Б. Континуальная теория спекания. Феноменологическая модель. Анализ влияния внешних силовых воздействий на кинетику спекания // Порошковая металлургия. – 1993. – №. 1. – С. 22–27.