

ВЛИЯНИЕ БОРА И АЛЮМИНИЯ НА ГОРЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПХА/СКДМ

А.Г. Коротких¹, И.В. Сорокин², Д.В. Теплов³

Томский политехнический университет^{1,3}

ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова^{1,3}, группа А2-11³

Институт химической кинетики и горения СО РАН²

Микро- и ультрадисперсные металлы являются высокоэнергетическими компонентами жидких и смесевых твердых топлив, существенно повышающие их стабильность горения, удельную теплоту сгорания и температуру в камере, скорость истечения газообразных продуктов в сопле и удельный импульс двигательных установок [1–2]. Горение металлосодержащих топливных композиций включает ряд физико-химических процессов, состоящих из экзотермических процессов фазового перехода и окисления газообразных продуктов, воспламенения и гетерогенного горения конденсированных частиц металла, формирования оксидных частиц в газовой фазе и частиц-агломератов на поверхности топлива, двухфазного истечения продуктов сгорания [3], что усложняет полное сжигание и расширение продуктов сгорания.

Для повышения удельной теплоты и полноты сгорания металлов в камере сгорания могут быть рассмотрены борсодержащие металлические горючие, в которых влияние оксидного покрытия частиц мало. Анализ результатов проводимых исследований [2, 4] показал, что разрабатываются новые методы получения и изучаются характеристики воспламенения и горения дисперсных энергоемких систем, состоящих из частиц бора покрытых слоем Al, Ni или Mg, механосмесей Al-B, Ti-B или Mg-B, боридов AlB_n , TiB_n или MgB_n , как в окислительных средах, так и при горении топливных композиций. В связи с этим, возникает интерес к изучению особенностей и характеристик горения, указанных борметаллических систем в высокоэнергетических материалах (ВЭМ), содержащих окислитель и горючесвязующее вещество (ГСВ), установлению их влияния на зависимость скорости горения от давления, температуру горения в газовой фазе, содержание конденсированных продуктов сгорания и т. д.

Стационарная скорость горения ВЭМ является важной характеристикой топлив, оказывающая влияние на скорость потока газообразных продуктов сгорания из сопла и удельный импульс двигателя. Горение ВЭМ, содержащих алюминий и борметаллические дисперсные горючие, осуществлялось в бомбе постоянного давления (БПД) при избыточных давлениях среды с применением общепринятой методики измерения скорости горения топлива.

Целью данной работы является установление влияния содержания борсодержащих горючих (аморфного бора, AlB_2 и AlB_{12}) на характеристики горения ВЭМ, содержащего окислитель и полимерное горючесвязующее вещество, при варьировании давления в камере от 0,7 до 4 МПа.

В изучении характеристик горения ВЭМ использовалась базовая смесевая композиция, состоящая из перхлората аммония (ПХА) двух фракций с размером частиц менее 50 мкм (60 %) и 160–315 мкм (40 %), ГСВ – бутадиенового каучука марки СКДМ-80 и динитрилоксидного отвердителя ТОН-2.

В качестве металлического горючего выбраны микроразмерные порошки (МП) алюминия μAl (среднемассовый диаметр $d_{43} = 10,6$ мкм), боридов алюминия AlB_2 ($d_{43} = 6,2$ мкм) и AlB_{12} ($d_{43} = 2,3$ мкм), а также ультрадисперсные порошки (УДП) алюминия Alex (среднесчетный диаметр $d_{10} = 0,1$ мкм) и аморфного бора ($d_{10} = 0,2$ мкм).

Порошки боридов алюминия AlB_2 и AlB_{12} изготавливались СВС-методом с последующим измельчением спеченных образцов в шаровой барабанной мельнице, поэтому все частицы имели форму многогранников. Реакционная способность к окислению и характеристики воспламенения используемых дисперсных металлических горючих детально изучены в работе [5].

Измерение скорости горения u топлива осуществлялось при избыточных давлениях p в камере БПД. На каждую экспериментальную точку проводилось по 3–4 опыта и рассчитывалось среднее значение скорости горения топлива. В эксперименте относительная погрешность измерения скорости горения не превышала 10 %. Аппроксимация опытных данных осуществлялась с применением степенного закона скорости горения в виде:

$$u = B \cdot p^{\nu},$$

где u – скорость горения топлива, мм/с; p – давление, МПа; B и ν – константы аппроксимации.

На основе проведенного экспериментального исследования и термодинамического расчета горения ВЭМ на основе ПХА/СКДМ-80, содержащего дисперсные добавки алюминия, аморфного бора и боридов алюминия, определены степенные зависимости скорости горения от давления, влияние дисперсности алюминия и природы металлического горючего (массовой концентрации бора) на характеристики горения топлива.

Максимальная скорость горения ВЭМ зафиксирована при использовании УДП Alex, значение которой находится в диапазоне 6,1–23,7 мм/с при давлениях от 0,7 до 4,0 МПа. Высокая реакционная способность Alex и каталитическое взаимодействие оксидного покрытия Al_2O_3 наноразмерных частиц с кристаллами ПХА способствуют повышению выделению тепла при его окислении, температуры на поверхности реакционного слоя и скорости горения топлива.

Применение порошка аморфного бора в ВЭМ повышает скорость горения топлива на 51–109 % в зависимости от давления, относительно базового ВЭМ с μAl , благодаря быстрому воспламенению мелких частиц бора и дополнительному тепловыделению на поверхности горения топлива.

При использовании AlB_2 или AlB_{12} в ВЭМ влияние образующегося при нагреве оксидного покрытия (состоящего из B_2O_3 и Al_2O_3) на металлических частицах снижается, что приводит к повышению выделения тепла и температуры на поверхности топлива, а также увеличению скорости горения до 2 раз в зависимости от давления.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sundaram D., Yang V., Yetter R. Metal-based nanoenergetic materials: Synthesis, properties, and applications // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2017. – V. 61. – P. 293–365.
2. Pang W.-Q., Yetter R. A., DeLuca L. T., Zarko V. E., Gany A., Zhang X.-H. Boron-based composite energetic materials (B-CEMs): Preparation, combustion and applications // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2022. – V. 93. – Article N 101038.
3. McClain M. S., Gunduz I. E., Son S. F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2019. – V. 37, N 3. – P. 3135–3142.
4. DeLuca L. T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion // *Defence Technology*. – 2018. – V. 14. – P. 357–365.
5. Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А. Лазерное зажигание порошковых систем на основе Al и B // *Физика горения и взрыва*. – 2022. – Т. 58, № 4. – P. 32–40.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.Г. Коротких, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.