

ВВЕДЕНИЕ

Порошки алюминия, бора, магния и некоторых других металлов широко применяются в высокоэнергетических материалах (ВЭМ), например во взрывчатых веществах (ВВ), твердых ракетных топливах, пиротехнических составах для улучшения целевых свойств этих систем. До недавнего времени в этих композициях использовались порошки металлов микронного размера. Однако исследования подобных составов и их эксплуатация, в частности в ТРТ, показали, что имеется ряд серьезных недостатков, таких как неполное сгорание частиц алюминия в результате плавления и их слияния в крупные капли, двухфазные потери удельного импульса, образование крупных частиц продуктов сгорания и их эрозионное воздействие на сопло.

Проведенные в Советском Союзе в 1970–1980-е гг., а также в 1990–2000-е гг. исследования в РФ и других странах показали, что эффективность ВЭМ по их функциональному предназначению может быть повышена за счет уменьшения размеров частиц металлов, что приводит к увеличению химической активности металлических горючих, используемых в ВЭМ [1–7]. Однако тогда не были разработаны способы получения металлических порошков с частицами наноразмеров в количествах, позволяющих проводить широкие исследования.

Достижения современных технологий позволили получать порошки алюминия, бора, кремния, других металлов, их сплавов и их оксидов с частицами субмикронных размеров и сделать их коммерчески доступными, что вызвало всплеск исследований в России, Европе, США, Канаде, Индии и других странах по изучению возможности повышения характеристик ВЭМ за счет введения нанопорошков металлов.

Проведенные исследования показали, что введение нанопорошков (НП) алюминия (НПА) и других металлов, а также бора (НПБ), боридов алюминия (НПБА) и кремния в ракетные топлива, ВВ и пиротехнические композиции приводит к увеличению скорости их горения, повышает детонационные свойства ВВ и увеличивает степень превращения элементов и композиций [3, 8–10].

Рост скорости горения ракетных топлив или пиротехнических композиций при замене микронного порошка горючего на наноразмерный обуславливается следующими факторами: более высоким тесным контактом между частицами горючего и окислителя; повышением скорости диффузии реагентов; увеличением скорости энерговыделения за счет более короткого времени сгорания наночастиц.

За последние 20 лет опубликован ряд обзоров и монографий, посвященных методам получения, физическим и химическим свойствам наноразмерных порошков алюминия, бора, боридов алюминия и кремния, а также их применению в ВЭМ [7, 11–20].

Основная масса работ по исследованиям нанодисперсных порошков металлов (НПМ) и металлоидов в качестве компонентов ВЭМ посвящена порошкам алюминия. Преимущество алюминия определяется наряду с высокими энтальпией горения и температурой горения, присущими и некоторым другим элементам, также его коммерческой доступностью, относительно низкой стоимостью и безвредными для окружающей среды продуктами сгорания [20–22].

В научной литературе к наночастицам относят, как правило, частицы с размером до 10 нм и редко до 50 нм, т. е. когда с изменением размеров изменяются и некоторые физические константы, например температура плавления. Однако в связи с высокой химической активностью алюминия и других элементов, представляющих интерес для ВЭМ, их приходится защищать от воздействия кислорода и влаги защитной оболочкой толщиной от 2 до 6–10 нм, что существенно снижает содержание активного элемента в частице (как это будет показано ниже). Поэтому для ВЭМ используют, в основном, частицы со средним диаметром 100–200 нм, а также частицы с размером

до 400–500 нм, за которыми также закрепился термин «наночастицы».

За наночастицами алюминия и других элементов в литературе закрепились также термины «наноалюминий», «нанобор», «нанокремний» и т. д. В дальнейшем мы также будем их использовать.

Предлагаемый обзор посвящен методам получения наноразмерных порошков алюминия, бора, боридов алюминия и кремния, их физическим и химическим свойствам и исследованиям этих веществ в качестве компонентов ВЭМ. Обзор состоит из четырех глав.

Основная часть исследований относится к НПА как наиболее доступным в промышленном масштабе и по стоимости. О других горючих, таких как наноразмерные порошки бора, боридов алюминия, циркония, титана, кремния и фосфора, в литературе имеется сравнительно мало сообщений.