

## Исследование условий формирования и характеристик гетерогенного потока реагирующих термитных смесей

*С.Ю. Ананьев<sup>1,2</sup>, С.Ю. Долгобородов<sup>1</sup>, Б.Д. Янковский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

В последнее время проводится активная разработка новых энергетических материалов на основе смесей реакционно-способных невзрывчатых компонентов с повышенными характеристиками энерговыделения при ударно-волновых воздействиях (Реакционные Материалы, РМ). Для увеличения энерговыделения в таких смесях прибегают к уменьшению размеров частиц исходных компонентов и предварительной механоактивации. В данной работе использованы энергетические материалы в виде прессованных таблеток из смеси механоактивированных порошков. Исследование материалов проведено в экспериментальных сборках, обеспечивающих ударно-волновое инициирование химической реакции и метание реагирующего материала в свободное пространство.

Образцы в виде таблеток весом 1 г и диаметром 8 мм изготавливались прессованием. Были исследованы следующие РМ:  $\text{Al}+\text{MoO}_3+(\text{C}_2\text{F}_4)_n$  - активированный состав в соотношении 31,5/65/3,5 на основе алюминиевой пудры ПАП-2, наноразмерного оксида молибдена с добавкой фторопласта, время активации 12 мин;  $\text{Al}+\text{MoO}_3$  - активированный состав в соотношении 35/65 на основе алюминиевой пудры ПАП-2 и наноразмерного оксида молибдена, время активации 12 мин;  $\text{Al}+\text{CuO}$  - активированный состав в соотношении 19,7/80,3 на основе алюминиевой пудры ПП-2л и оксида меди, время активации 15 мин;  $\text{Al}+\text{WO}_3$  - активированный состав в соотношении 25/75 на основе алюминиевой пудры ПП-2л и оксида вольфрама, время активации 15 мин;  $\text{Al}+\text{Bi}_2\text{O}_3$  - активированный состав в соотношении 15/85 на основе алюминиевой пудры ПП-2л и оксида висмута, время активации 15 мин;  $\text{Al}+\text{CuO}+\text{Hf}+(\text{C}_2\text{F}_4)_n$  - состав с соотношением компонентов 50AlCuO и 50HfC<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, а также 30AlCuO и 70HfC<sub>2</sub>F<sub>4</sub>;  $\text{Al}+\text{Ni}$  - активированный состав на основе алюминиевой пудры ПП-2 и Ni - ПНК-1 при весовом соотношении исходных компонентов Al/Ni 31,5/68,5, время активации - 7 мин; **наноAl+Ni** - активированный состав на основе наноразмерных частиц Al -100 нм и Ni - 60 нм в соотношении 31,5/68,5, время активации - 5 мин;  $\text{Hf}+\text{C}_2\text{F}_4$  - активированный состав в соотношении 80/20 на основе гафния ГФМ-1, время активации 15 мин;  $\text{Zr}+(\text{C}_2\text{F}_4)_n$  - активированный состав в соотношении 50/50, время активации 15 мин. В каждом случае пористость РМ находилась в пределах 7-23%.

Ударное сжатие РМ осуществляли зарядом ВВ внутри стальной оболочки, установленной на стальной пластине. Стальная оболочка содержала два цилиндрических элемента. Первый элемент играл роль поршня (сталь) и тепловой защиты второго элемента от горячих продуктов детонации. Второй элемент представлял собой прессованную таблетку из смеси РМ. Соотношение масс заряда ВВ, поршня и таблетки сохраняли постоянным: 1:1:1. Масса заряда ВВ во всех случаях составляла 1 г, плотность заряда 1,15 г/см<sup>3</sup>. В отдельных случаях поршень устранили. В этих случаях массу таблеток удваивали. Для реализации потока реагирующего материала в стальной пластине было сделано сопловое отверстие. Анализ динамики потока реагирующего материала осуществлялся его скоростным фотографированием в течение 2 мс.

Параметры падающей детонационной волны на поверхность стального поршневого элемента определялись типом ВВ и его плотностью. Параметры ударной волны в поршневом элементе определялись ударной адиабатой стали и изоэнтропой разгрузки продуктов детонации.

В более ранних работах авторами были исследованы скорость распространения центра области горячих продуктов химической реакции и размер области интенсивного химического превращения РМ [1]. Состав образцов РМ существенно влияют на перераспределение энергии и инициирование химического превращения в энергетическом материале. На базе экспериментальных данных и ряде предположений можно оценить значение энергии, диссипированной в зоне контакта компонентов при ударно-волновом нагружении. Обработка результатов динамических экспериментов с таблеткой из смеси  $\text{Al}+\text{CuO}+\text{Hf}+(\text{C}_2\text{F}_4)_n$  позволила оценить: работу смятия стального поршня ~ 25 Дж; работу прессования Al компонента от  $\rho=1,97$

г/см<sup>3</sup> до  $\rho=2,6$  г/см<sup>3</sup> ~ 12 Дж; работу динамической деформации стальной пластины через термитную таблетку ~ 60 Дж; энергию диссипации в таблетке ~25 Дж; температуру нагрева в очагах тепловыделения ~550÷850 К.

Для характеристики энергосодержания потока на его траектории в продольном и поперечном направлениях устанавливали тонкие металлические фольги с разной температурой плавления. Фотографии потока с экспозицией 50 нс свидетельствуют о гомогенности излучения потока в видимой области. Для более точного анализа структуры потока в области свечения на его траектории устанавливали проволочные электроды с заданной разностью потенциалов, которые позволяли фиксировать ток разряда конденсатора с известными временными параметрами. Форма импульсов на осциллограммах тока проводимости области свечения позволила сделать предположение о присутствии в потоке достаточно разреженной, но однородно распределенной плазмы продуктов реакции, обеспечивающей нитевидный характер протекания тока между электродами. Таким образом, в области свечения получены свидетельства гетерогенности потока реагирующих компонентов, окруженных облаком излучающей плазмы продуктов реакции. О яркостной температуре области излучения судили методом сравнения с табличным значением яркостной температуры воздушной ударной волны известной интенсивности, реализованной при срабатывании электродетонатора. Яркостная температура потока составляет ~4500 К. Скорость потока снижается за время ~1 мс от ~700 до ~500 м/с.

Литература.

1. Труды 58-й научной конференции МФТИ / под ред. Леонова А.Г., М.: МФТИ, 2015, 155с.