

## О ГОРЕНИИ ЧАСТИЦ СУБДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ

М. Я. Ген, Ю. В. Фролов, В. Б. Сторожев

(Москва)

В последнее время наметилась тенденция к снижению размера частиц порошкообразных металлов, используемых в качестве высокоэнергетического горючего в гетерогенных конденсированных смесях и пиротехнических составах. Однако режим горения и воспламенения таких порошков (диаметр частиц  $d=10^{-7}$ — $10^{-6}$  м) в газофазных окислительных средах фактически не исследован.

В данной работе поставлена задача исследовать наличие связи между размером частиц алюминия субмикронной фракции и размером конденсированных продуктов их сгорания в среде аргон—кислород (давление атмосферное). Наличие такой связи (дополнительно к другим исследованиям) поможет ответить на вопрос об определяющем режиме горения аэрозольных частиц металлов в газовом потоке.

Аэрозольные частицы получались методом испарения и конденсации паров алюминия в среде аргона [1]. Размер образующихся частиц варьировался за счет изменения режимов испарения и конденсации. Необходимо подчеркнуть, что частицы могут быть покрыты окисной пленкой (если аргон содержит примесь кислорода), толщина которой во много раз меньше защитного окисного слоя, образующегося при хранении алюминия в обычных условиях ( $2000 \text{ \AA}$ ) [2].

В условиях эксперимента в несущий поток аргона с аэрозольными частицами алюминия равномерно, по окружности, в строго фиксированном сечении вдувался кислород комнатной температуры. Такой метод подачи кислорода способствовал перемешиванию газовой смеси и выравниванию концентрации частиц алюминия по сечению потока. Суммарный состав и температура газовой смеси в области смешения фиксировались ротаметрами и термопарой (термопара могла вводиться в двухфазный поток в любом сечении). Частицы алюминия (до смешения с кислородом) и продукты его горения (после подачи кислорода) отбирались с помощью предметных пластин и стекол, помещенных в газовый поток [2, 4]. Построение<sup>1</sup> кривых интегрального и дифференциального распределения частиц по размерам проведено на основе анализа пластин-отборников под электронным микроскопом с разрешением  $15 \text{ \AA}$ . Полнота сгорания алюминия контролировалась химическим методом.

По результатам наблюдений можно отметить следующее. Воспламенение частиц аэрозоля при суммарной концентрации кислорода в потоке 17—41% происходит в том случае, если температура потока с частицами в месте подачи кислорода по измерениям составляет ( $200 \div 300^\circ \text{C}$ )  $\pm 50$ . Это значительно ниже предельной температуры продуктов сгорания смесевых систем ( $1200^\circ \text{C}$ ), при которой еще наблюдается воспламенение частиц алюминия, вводимых в топливо [2]. Горение аэрозоля, если воспламенение произошло, завершается полным окислением алюминия до  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

На рис. 1 приведены кривые дифференциального распределения частиц алюминия (фракция со средним размером  $\bar{d}_1^{\text{Al}} = 2 \cdot 10^{-7}$  м,  $\bar{d}^{\text{Al}} = 1,4 \cdot 10^{-7}$  м) и конденсированных продуктов их сгорания в потоке аргона с концентрацией кислорода 17 и 41%. На рис. 2 для наглядности показана диаграмма средних размеров частиц, удовлетворяющих этим

<sup>1</sup> Статистическая ошибка при построении распределений не превышает 5%.

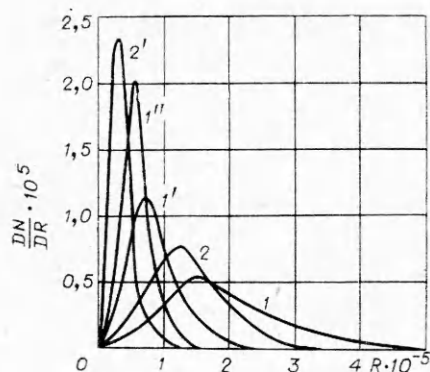


Рис. 1. Дифференциальные кривые распределения исходных частиц алюминия (1, 2) и продуктов их сгорания при концентрации кислорода в среде 17% (1', 2') и 41% (1'').

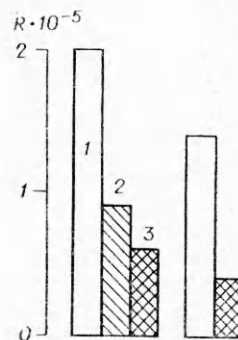


Рис. 2. Диаграмма средних размеров частиц алюминия (1) и продуктов их сгорания в среде с 17%  $O_2$  (2) и с 41%  $O_2$  (3).

распределениям. На рис. 3 приведено фото исходных частиц алюминия и конечных продуктов их сгорания.

Из рисунков следует, что а) размер конденсированных продуктов сгорания аэрозольного алюминия в кислородсодержащей среде меньше размера исходных частиц металла; б) средний размер частиц окиси алюминия зависит от размера частиц исходного алюминия и падает с уменьшением последнего ( $\bar{d}^{Al} = 2 \cdot 10^{-7}$  и  $1,4 \cdot 10^{-7}$  м и соответственно  $\bar{d}^{Al_2O_3} = 0,9 \cdot 10^{-7}$  и  $0,4 \cdot 10^{-7}$  м); в) размер частиц окиси алюминия убывает по мере роста активности среды (в исследованном диапазоне концентраций  $O_2$ ):

$$\text{при } \bar{d}^{Al} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м } \bar{d}^{Al_2O_3} = \begin{matrix} 0,9 \cdot 10^{-7} \text{ м (17\% } O_2) \\ 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ м (41\% } O_2). \end{matrix}$$

Из анализа представленных закономерностей и результатов визуальных наблюдений можно сделать вывод, что в условиях эксперимента определяющим режимом горения аэрозольного алюминия можно считать режим, характерная особенность которого состоит в наличии вокруг частиц зоны конденсации продуктов горения. Этот режим может быть описан моделью парофазного горения [2] или моделью, описанной в работе [3]. Но в том и другом случае характерно образование

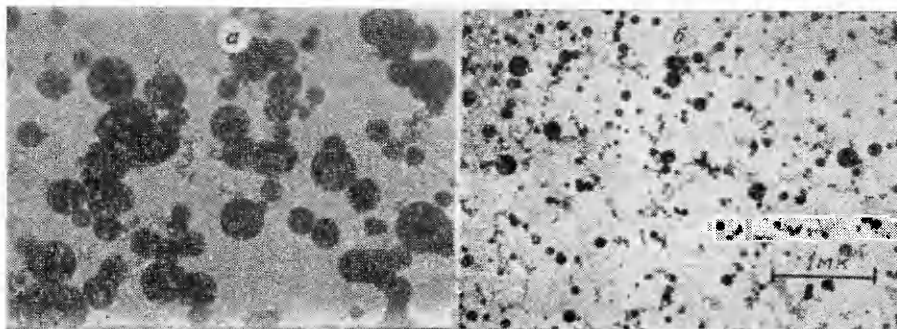


Рис. 3. Фото частиц субмикронного алюминия (а) и продуктов их сгорания (б) в среде с 17%  $O_2$ .

в результате горения относительно узкого спектра частиц окиси алюминия, средний размер которых меньше среднего размера исходных частиц алюминия. Это представляет определенный интерес с точки зрения уменьшения величины двухфазных потерь в ракетных двигателях, поскольку на режимы коагуляции и дробления частиц в двухфазном потоке должны оказывать влияние размеры частиц  $Al_2O_3$ , образующихся в зоне горения алюминия.

Низкий температурный предел воспламенения в первую очередь связан с активностью получаемого аэрозоля алюминия: с минимальной толщиной окисного слоя на частицах, не препятствующего развитию гетерогенной реакции и саморазогреву частиц при вдуве кислорода в поток.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что горение частиц субдисперсного алюминия в кислородсодержащем (15—40%  $O_2$ ) потоке ( $p=1$  атм) аналогично горению крупнодисперсного (50—100 мкм) алюминия [2] и сопровождается образованием мелкодисперсных конденсированных продуктов горения.

*Поступила в редакцию 13/VI 1977,  
после доработки — 27/X 1977*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Я. Ген, М. С. Зискин, Ю. И. Петров. Докл. АН СССР, 1959, 127, 366.
2. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
3. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1975, 113, 366.
4. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.

### МЕДЛЕННОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ВВ И УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ЕГО ВО ВЗРЫВ ПРИ ВИБРАЦИИ

*Н. П. Логинов, С. М. Муратов, Н. К. Назаров*

*(Куйбышев)*

Исследование химического разложения твердых ВВ при вибрационных воздействиях представляет несомненный интерес. Установление закономерностей превращения и определение кинетических констант, соответствующих процессам распада твердых ВВ при вибрации, особенно необходимо при изучении механизма возбуждения взрыва под действием периодических нагрузок. В настоящее время такие исследования крайне малочисленны, что объясняется большими методическими трудностями при проведении экспериментов.

Медленное разложение ВВ наиболее изучено при тепловых воздействиях в области температур от 100 до 250°С. Его особенности состоят в относительно небольшой скорости реакции, высоких значениях энергии активации порядка 50 ккал/моль, в различии скоростей реакции на разных стадиях разложения в зависимости от глубины превращения ВВ [1—4].