

ГОРЕНИЕ ТЕРМИТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВЕКТОРОВ ПЕРЕГРУЗКИ И СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

В. Н. Санин, С. Л. Силяков, В. И. Юхвид

Институт структурной макрокинетики РАН, 142432 Черноголовка

Изучены закономерности и механизм горения системы $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al} + \text{C}$ в поле центробежных сил при ортогональной ориентации векторов перегрузки и скорости горения. Показано, что центробежная сила оказывает сильное влияние на механизм и скорость горения. Обнаружено сильное влияние течения газообразных продуктов горения на зависимость скорости горения от величины перегрузки.

«Положительное» центробежное воздействие (рис. 1, *a*) оказывает сильное влияние на все стадии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в смесях термитного типа: горение и фазоразделение, формирование химического, фазового составов и микроструктуры продуктов синтеза [1–3]. Этот вариант процесса, в котором векторы перегрузки и скорости горения совпадают по направлению, хорошо изучен. Гораздо слабее исследованы закономерности и механизм синтеза для другого варианта, в котором векторы перегрузки и скорости горения взаимно перпендикулярны [2–5]. В работах [2–5] основное внимание было уделено формированию трубчатых изделий и их свойствам.

В данной работе впервые изучены закономерности горения при ортогональном центробежном воздействии (рис. 1, *б*) на примере высококалорийной системы $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al} + \text{C}$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали порошки

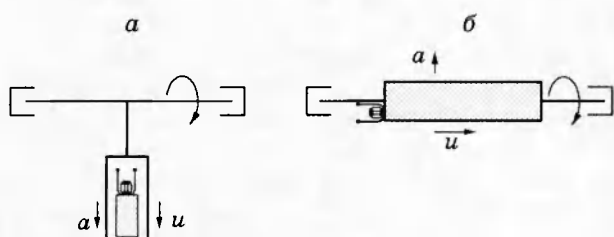


Рис. 1. Схема проведения синтеза при соосной (*a*) и ортогональной (*б*) ориентации скорости горения и перегрузки

Fe_2O_3 , Cr_2O_3 марки ч.д.а., алюминий АСД-1 и графит с размером частиц $90 \div 160$ мкм при следующем соотношении реагентов: $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{Al} : \text{C} = 0,609 : 0,117 : 0,247 : 0,027$. Смесь перемешивали в планетарном смесителе в течение 1 ч и помещали в кварцевые цилиндрические оболочки длиной 150 мм с внутренним диаметром 14 мм, один конец которых был открыт, а второй — заглушен.

Для проведения экспериментов была разработана «осевая» центробежная установка (рис. 2), которая позволяет создавать перегрузки от 1 до $150 a/g$ (a — центробежное ускорение, g — ускорение свободного падения), визуально наблюдать и проводить видеосъемку процесса, измерять скорость горения. Экзотермическую смесь инициировали с помощью электрической спирали (см. рис. 2). Кратко-

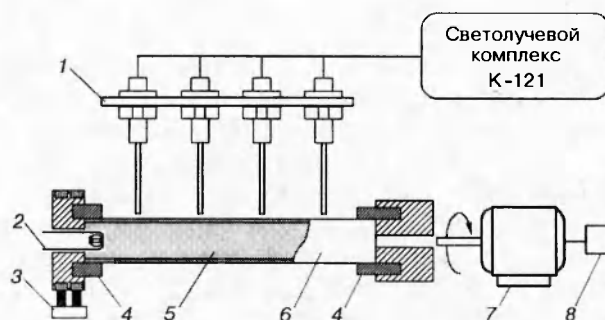


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — каскад фотодиодов, 2 — электрическая спираль, 3 — токовводы, 4 — крепежные элементы, 5 — экзотермическая смесь, 6 — кварцевая форма, 7 — электродвигатель, 8 — тахометр

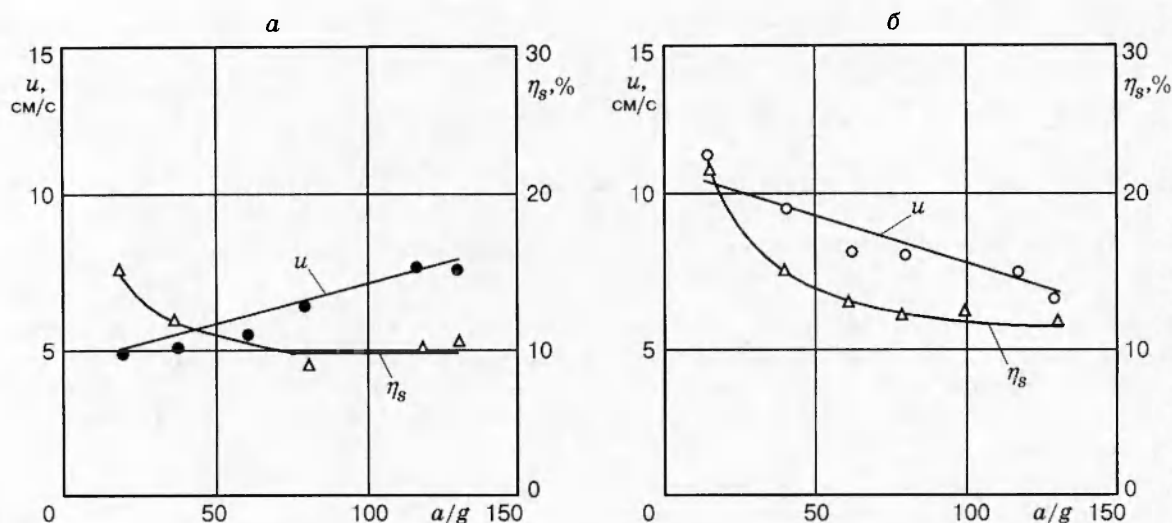


Рис. 3. Влияние центробежной силы на скорость горения и относительную потерю массы: а — иницирование с открытого конца формы, б — с закрытого конца

временный импульс на спираль подавался через тоководы с «бегущим» контактом.

Перемещение зоны горения (границы раздела исходной смеси и светящейся зоны продуктов синтеза) регистрировали с помощью каскада фотодиодов. В экспериментах на осциллографе К-121 регистрировали время горения t_c на базовых отрезках ($\Delta l = 20$ мм — расстояние между соседними фотодиодами), начальную M_0 и конечную M_k массу продуктов синтеза. По экспериментальным данным рассчитывали среднюю скорость горения u и относительную потерю массы η_s :

$$u = \Delta l / t_c, \quad \eta_s = [(M_0 - M_k) / M_0] \cdot 100 \%$$

Каждая точка на графиках является средней величиной, полученной по данным трех экспериментов.

Предварительные эксперименты показали, что под действием центробежной силы исходная смесь в кварцевой трубке уплотняется от 1 до $1,6 \text{ г/см}^3$ в интервале перегрузок от 1 до $150a/g$ (где a/g принята как средняя величина по толщине образца) и далее не меняется. При этом в центральной части трубки формируется сквозной канал. Диаметр канала при максимальном уплотнении $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$ составляет 5 мм. Эту же плотность можно создать без вращения, выдерживая снаряженную трубку на вибростоле (Thur-2) при времени воздействия вибрации более 10 с. В последнем случае смесь при вращении на центробежной установке не уплотняется в интервале перегрузок от 1

до $150a/g$ и канал в средней части трубки не формируется.

Исходя из этих результатов эксперименты проводили по трем методикам: со сквозным каналом с противоположным движением фронта и газообразных продуктов горения (иницирование с открытого конца формы); со сквозным каналом со спутным движением фронта и газообразных продуктов горения (иницирование с закрытого конца формы); без канала с противоположным направлением скорости горения u и скорости оттока газов v (иницирование с открытого конца формы). Во всех экспериментах $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Визуальные наблюдения и видеосъемка показали, что при горении по указанным выше схемам после воспламенения смеси формируется практически плоский фронт свечения, который перемещается по смеси с постоянной скоростью. Горение сопровождается оттоком раскаленных газообразных продуктов горения через открытый конец кварцевой формы. Измерения на базовых отрезках с помощью фотодиодов показали, что скорость горения не меняется по длине образца. Поэтому ее значение рассчитывали по формуле $u = l_0 / t_s$, где l_0 — длина трубки со смесью, t_s — время горения всего образца. Для всех схем эксперимента продукт горения имел вид литой трубки, состоящей из

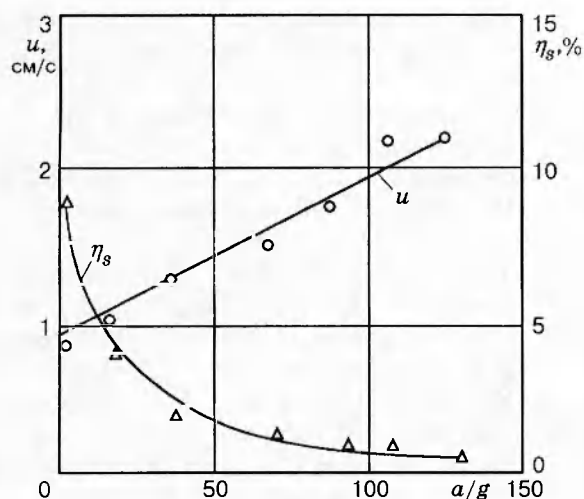


Рис. 4. Влияние центробежной силы на скорость горения и относительную потерю массы при горении в отсутствие полого канала в исходной системе

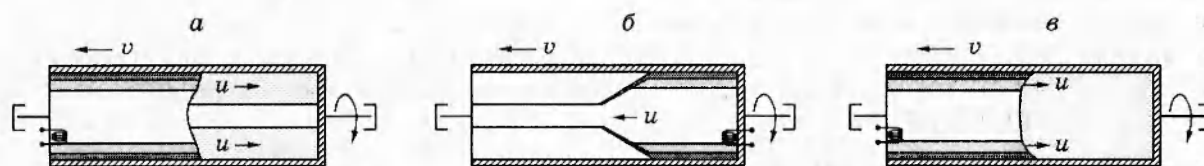


Рис. 5. Схема распространения фронта при горении с центральными каналами (а, б) и без канала (в)

металлической (Fe — Сг — С) и керамической (Al_2O_3) фаз.

Из рис. 3, 4 видно, что для разных схем экспериментов влияние перегрузки качественно и количественно отличается. Так, с ростом перегрузки скорость горения увеличивается; при этом наличие полости в смеси приводит к более высоким значениям u (см. рис. 3, а). Напротив, при оттоке газа через канал в направлении движения фронта с ростом перегрузки скорость горения уменьшается (см. рис. 3, б).

Во всех вариантах горения с ростом перегрузки потери вещества при горении снижаются.

Следует отметить, что полученные результаты по горению в центрифуге не укладываются в представления работы [5], согласно которой процесс протекает в два этапа: быстрое поверхностное горение по каналу в шихте и распространение фронта горения одновременно по всей поверхности вглубь шихты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа полученных результатов необходимо найти качественную связь процесса распространения волны горения с течением

«горячих» газообразных продуктов горения и диспергированием вещества при горении.

Ранее при исследовании горения термитных систем в длинном канале [6] было обнаружено, что при открытой поверхности процессом, лимитирующим скорость горения, является движение двухфазного потока (газ — конденсированная фаза) вдоль поверхности исходной смеси (движение «огненного» вала). В случае закрытой поверхности, когда формирование «огненного» вала невозможно, горение осуществляется за счет теплопередачи в донной части канала, где собирается слой расплава продуктов горения. В первом случае фронт горения наклонен в сторону движения фронта, во втором — в противоположном направлении.

Если перенести эти представления на горение в поле центробежных сил, то движение фронтов можно изобразить в виде трех схем (рис. 5). В схеме б скорость горения определяется скоростью перемещения «огненного» вала по каналу в исходной смеси и концентрацией ϵ конденсированной фазы в нем. Поскольку η_s и, следовательно, ϵ с ростом перегрузки уменьшаются, зажигание поверхностного слоя затрудняется, а скорость горения снижается.

В схеме *в* процессом, лимитирующим скорость горения, является теплопередача в пристеночном слое от жидких продуктов горения к исходной смеси. В этом случае с ростом перегрузки возрастает гидростатическое давление на расплав, увеличивается скорость его принудительной фильтрации в поры исходного вещества, что приводит в конечном итоге к росту скорости горения [1, 3].

В схеме *а* соединяются оба механизма влияния на скорость горения. Результатом такого взаимодействия является рост скорости горения при более высоком уровне значений *и*, чем в варианте *в*. В целом схемы *а* и *в* близки, поскольку явно выраженный проток газа через канал в исходной смеси в этих условиях невозможен.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-03-32629).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каратасков С. А., Юхвид В. И., Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения плавящихся гетерогенных систем в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 6. С. 41.
2. Merzhanov A. G., Yuxhvid V. I. Self-propagating high temperature synthesis in the field of centrifugal forces // Proc. First US-Japanese Workshop on Combustion Synthesis. Tokyo, Japan, 1990. P. 1-22.
3. Yuxhvid V. I., Kachin A. R., Zakharov G. V. Centrifugal SHS surfacing of the refractory inorganic materials // Intern. J. Self-Propagating High-Temp. Synthesis. 1994. V. 3, N 4. P. 321-332.
4. Kachin A. R., Yuxhvid N. I. SHS of cast composite materials and pipes in the field of centrifugal forces // Intern. J. Self-Propagating High-Temp. Synthesis. 1992. V. 1, N 1.
5. Odawara O. R&D technology for large composite pipes // Intern. J. Self-Propagating High-Temp. Synthesis. 1994. V. 3, N 1. P. 160.
6. Санин В. Н., Силяков С. Л., Юхвид В. И. Распространение фронта горения по длинномерному каналу // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 29.

*Поступила в редакцию 6/VIII 1996 г.,
в окончательном варианте — 17/X 1996 г.*