

соответствующие различным размерам стабилизатора пламени d . Полагая, что при данных условиях время задержки воспламенения определяется только температурой, его можно определить для заданного значения L_b по величине скорости, соответствующей на рисунке нулевому размеру стабилизатора. Тогда

$$K = \frac{\tau_a \cdot w - L_b}{30d}. \quad (7)$$

Обработка экспериментальных данных позволила по формуле (7) определить значения K для различных размеров стабилизатора, расстояний L_b и скоростей потока. Выяснилось, что K не зависит ни от размера стабилизатора, ни от скорости потока. Однако значение K довольно сильно увеличивается с ростом расстояния L_b в соответствии с аппроксимирующим выражением (точность аппроксимации $\pm 5\%$)

$$K = 0,047L_b^{1,2}.$$

С увеличением L_b от 0,14 до 1,0 м доля времени пребывания в зоне обратных токов за препятствием, используемая топливом для самовоспламенения, увеличивается примерно от 5 до 50% и не зависит от размера препятствия и скорости потока. Предположительно полученный характер зависимости $K=f(L_b)$ можно объяснить ростом степени испарения и равномерности распределения топлива по сечению потока перед стабилизатором. По-видимому, в случае равномерной подачи газообразного топлива все время пребывания в зоне обратных токов за препятствием будет использоваться топливом для самовоспламенения, и влияние постановки препятствия в поток на время задержки воспламенения будет гораздо сильнее.

Поступила в редакцию
28/II 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Трушин.— В сб.: Третье Всесоюзное совещание по теории горения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. Н. А. Панова, В. Н. Груздев, А. В. Талантов.— В сб.: Горение в потоке. Вып. 1. Казань, 1976.
3. Г. А. Бовина.— В сб.: Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени в однородных и двухфазных системах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
4. В. Н. Груздев, Н. А. Малишевская, А. В. Талантов. Изв. вузов. Авиационная техника, 1978, 3.

К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИТНЫХ СМЕСЕЙ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Г. В. Иванов, В. Г. Сурков, А. М. Викторенко,
А. А. Решетов, В. Г. Иванов

(Томск)

Аномальная зависимость скорости горения от давления наблюдается довольно часто при горении гетерогенных конденсированных систем [1—3]. Общие теории горения этому явлению объяснения не дают, мало попыток объяснения аномальной зависимости и для частных случаев [2, 4]. Очевидно, что существование такого нетипичного явления связано с протеканием процессов, которые в общей теории горения не учитываются. Выявление факторов, приводящих к снижению скорости горения с ростом давления, и есть цель настоящей работы.

Для исследования выбраны некоторые терmitные смеси, содержащие компоненты с различными свойствами. Компоненты подбирались на основе того, что они присутствовали в смесях, имеющих, по литературным данным, аномальную зависимость скорости горения w от давления p [1, 2]. В качестве горючих Mg, Zn и Zr выбраны по следующим причинам. Легокипящий Mg, согласно [1], в смеси с Cr_2O_3 горит с аномальной зависимостью $w(p)$, цинк тоже типичный представитель легокипящих металлов; цирконий же тугоплавок, не испаряется и горит с поверхности [4]. В качестве окислителей взяты окислы металлов: PbO_2 , BaO_2 , MnO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и MoO_3 .

Опыты проводились в бомбе постоянного давления в атмосфере азота при давлении 1–80 атм. Смеси запрессовывались в плексигласовые трубы с внутренним диаметром 7 мм до относительной плотности 0,6–0,8. Размер частиц компонентов следующий: PbO_2 – 5 мкм, Zn – 5–50 мкм, остальные компоненты менее 80 мкм. Скорость горения измерялась с помощью фоторегистратора. Из семи исследованных смесей на основе магния аномальная зависимость, кроме описанных в [1, 2], обнаружена только в случае с MoO_3 (рис. 1, 2).

Смеси цинка со всеми окислами, кроме PbO_2 , начинают гореть при давлениях больше 40 атм. Смесь же с PbO_2 горит устойчиво во всем исследованном интервале, причем начиная с 40 атм скорость горения снижается (рис. 1, 3). Горение циркония в смесях с различными окислителями (PbO_2 , BaO_2 , MnO_2 , V_2O_5) характеризуется очень высоким уровнем скорости горения, например для PbO_2 – Zn при 80 атм скорость горения выше 300 мм/с. Аномальная зависимость обнаружена при горении циркония с BaO_2 и V_2O_5 (рис. 1, 1).

При рассмотрении механизма горения термитных смесей следует учитывать их малую относительную плотность (0,6–0,8). Это обстоятельство связано с тем, что все окислы имеют весьма высокую твердость и развитую поверхность, прессование их даже с пластичными металлами (Mg , Zn) не приводит к заполнению пор между частицами окислов. Поэтому при горении термитных смесей, образующих газо- или парообразные компоненты, неизбежно будет иметь место проникновение паров и газов в поры, быстро возрастающее с увеличением внешнего давления, и, как следствие, кругой рост скорости горения с давлением, что и наблюдается в действительности для большинства термитных смесей (см., например, [1]).

Полученные аномальные зависимости скорости горения термитных смесей от давления можно попытаться объяснить на основе следующих соображений. Известно, что наличие на поверхности горения слоя расплава может приводить к заполнению им пор. При этом возможны два варианта:

- а) жидкость плохо смачивает стенки пор, поэтому легко выбрасывается потоком газа изнутри,
- б) жидкость хорошо смачивает стенки пор: ее выброс затруднен.

Поскольку скорость смачивания жидкими металлами вообще весьма велика (например, при 700°C скорость смачивания алюминием железа 40 см/с [5]), то заполнение пор жидкостью может оказывать значительное влияние на процесс горения. Исходя из этого, рассмотрим полученные результаты.

1. Нагревание смеси PbO_2 – Zn (расчетная температура горения близка к температуре кипения цинка ~900°C, температура разложения PbO_2 ~300°C, температура плавления цинка 419°C) при воспламенении и в волне горения вызывает отщепление кислорода от PbO_2 и испарение цинка. Горение идет в парах, о чем свидетельствует наличие крупного яркого факела (рис. 2, а).

В интервале 5–20 атм паровая фаза проникает в поры, скорость горения с давлением возрастает. Однако с повышением давления быстро подавляется испарение цинка; при 20 и 50 атм температура кипения цинка 1280 и 1510°C соответственно [6], т. е. значительно выше расчетной температуры горения. Поэтому факел при давлении более 20 атм исчезает, на фоторегистрограмме видна лишь узкая светящаяся зона, соответствующая, очевидно, расплавленному слою на поверхности горения. Взаимодействие расплавленного цинка с PbO_2 приводит к образованию расплавленного свинца и эвтектики цинк — свинец, последняя под действием окружающего давления внедряется в поры. Торможение процесса горения при этом может быть вызвано разбавлением компонентов инертным продуктом — свинцом.

2. Для смеси MoO_3 – Mg объяснение зависимости $u(p)$ аналогично. Отличие состоит в том, что MoO_3 при 795°C плавится без разложения, поэтому в данном случае реакция с магнием целиком протекает в жидкой фазе и в поры может продавливаться расплавленная смесь исходных компонентов. Подавление скорости горения будет определять компонент, который лучше смачивает стенки пор и, следовательно, испытывает меньшее сопротивление течению в порах [7].

3. Для смеси Cr_2O_3 – Mg характерна малая калорийность процесса (720 кал/г) [8], и температура горения недостаточна для расплавления конечных продуктов (обнаруживается остаток — смесь порошка хрома и MgO). Единственный плавкий компонент в системе — магний. Проникновение его в поры с ростом давления приводит к снижению скорости горения вследствие накопления и избытка горючего.

4. У смесей циркония с окислами аномальная зависимость $u(p)$ наблюдается только в случае плавких окислов, например BaO_2 и V_2O_5 (см. рис. 1). Их плавление

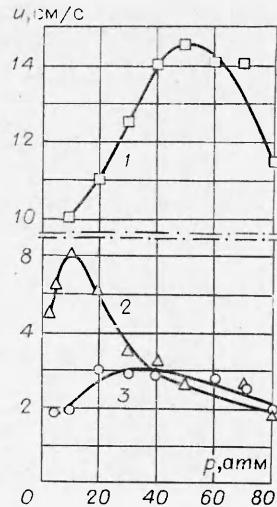


Рис. 1. Влияние давления на скорость горения термитных смесей.

1 – BaO_2 – Zn ; 2 – MoO_3 – Mg ;

3 – PbO_2 – Zn .

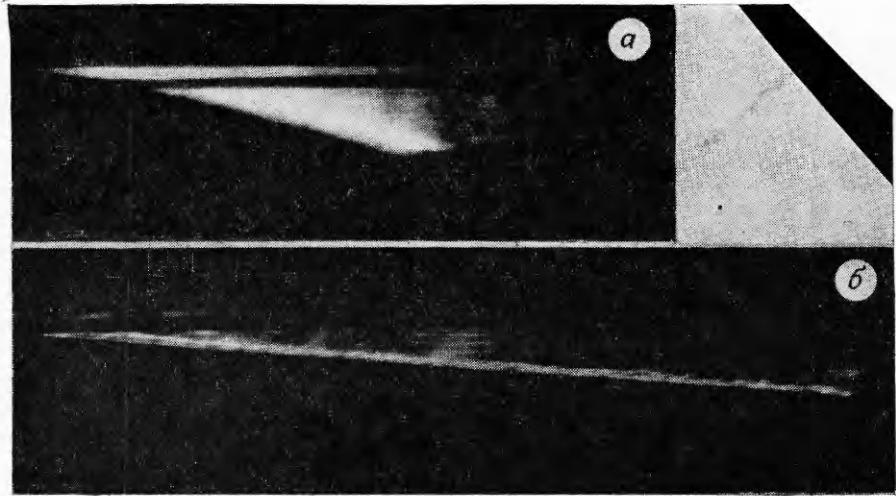


Рис. 2. Фоторегистограммы горения состава PbO_2-Zn при давлениях 1 (а) и 80 атм (б).

в зоне реакции до момента отщепления кислорода тоже приводит к затеканию расплава в поры и влияние на скорость горения аналогично отмеченному выше.

Неплавкие окислы не выделяют кислород под расплавленным слоем продуктов реакции. Низкая температура воспламенения циркония ($\sim 300^\circ\text{C}$ [9]) обеспечивает условие, при котором вдавливание шлаков в поры не может опередить процесса воспламенения, и скорость горения постоянно растет с давлением. Естественно предположить, что вид зависимости $u(p)$ термитных смесей при повышенных давлениях в значительной степени зависит от состава расплавленного слоя, образующегося при горении (это, как видно из приведенных примеров, могут быть исходные компоненты либо продукты реакции). Большую роль при этом играет температура процесса. Давление, при котором начинается проникновение расплавов в поры и падение скорости горения, зависит от размеров и формы пор и поверхностного натяжения компонентов расплава на границе с твердой фазой. При этом возможно и избирательное проникновение компонентов в поры и, как следствие, торможение процесса горения.

Поступила в редакцию
11/X 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
2. Л. Д. Ромоданова, П. Ф. Покил. ФГВ, 1969, 5, 2, 274.
3. Л. Д. Ромоданова, П. Ф. Покил. ФГВ, 1970, 6, 3, 285.
4. Н. Н. Бахман. ПМТФ, 1963, 6, 120.
5. Ю. С. Найгороденко, В. И. Итин. ФГВ, 1975, 11, 3, 343.
6. М. П. Славинский. Физико-химические свойства элементов. М., Металлургиздат, 1952.
7. Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. Физико-химические основы смачивания и растекания. М., «Химия», 1976.
8. Г. В. Самсонов, В. П. Перминов. Магнитермия. М., «Металлургия», 1971.
9. У. Б. Блюменталь. Химия циркония. М., ИЛ, 1963.