

Расчет влияния роста давления среды на времена задержки воспламенения (см. рис. 2) с использованием константы из [3] показал, что воспламенение происходит только при низких давлениях. При использовании константы из [1] воспламенение имеет место во всем исследованном интервале давлений среды, а зависимость имеет оптимум. Сначала время задержки увеличивается с ростом давления (до 3 МПа), затем уменьшается. Увеличение связано с квазиравновесным режимом окисления частицы (толщина окисла определяется его испарением, а оно уменьшается с ростом давления среды). Уменьшение времени задержки воспламенения объясняется тем, что по мере роста давления (выше 3 МПа) происходит смена режима окисления на неравновесный (скорость окисления в этом режиме пропорциональна давлению окисляющей среды).

Расчет влияния роста давления среды на предельную температуру воспламенения указал, что с использованием константы окисления из [1] зависимость имеет оптимум, а с использованием константы из [3] — монотонно возрастает (см. рис. 3). Оптимум связан с переходом окисления из квазиравновесного в неравновесный режим, а монотонное возрастание — с отсутствием смены режимов. Следует подчеркнуть, что указанные связи  $\tau_b(p)$ ,  $T_\infty^*(p)$  качественно не отличаются для частиц с достаточно широким интервалом размеров (3—35 мкм).

Описанные выше зависимости характеристик воспламенения от давления среды получены расчетом; в зависимости от использованной константы окисления при повышенных давлениях (более 3 МПа) они существенно различаются. Расчетный анализ указывает на вероятность перехода от квазиравновесного режима к неравновесному в условиях роста давления среды.

Истинный характер этих связей может быть установлен экспериментально. Измерение  $\tau_b(p)$  и  $T_\infty^*(p)$  в условиях роста давления среды и сопоставление опытных данных с описанными выше позволит проверить предположение о смене режимов окисления при увеличении давления и сделать выбор константы окисления, необходимой для расчетных оценок при повышенных давлениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

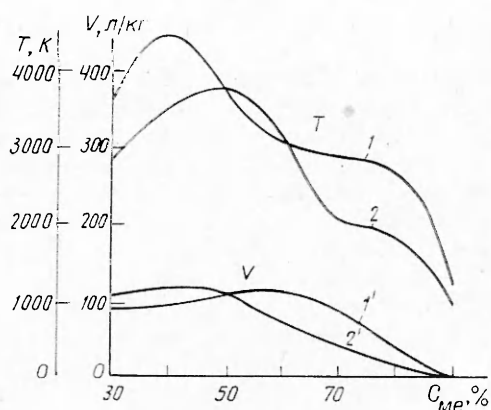
1. M. N. King. Comb. Sci. Tech., 1974, 8, 5—6.
2. В. Г. Шевчук, В. И. Полищук, А. П. Золотко и др.— В кн.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 10. Киев, КГУ, 1974.
3. Д. З. Сафанеев, Л. Я. Кашпоров, Ю. М. Григорьев. ФГВ, 1981, 17, 2.
4. Р. Рид, Т. Шервуд. Свойства газов и жидкостей. Ленинград: Химия, 1971.
5. Физико-химические свойства окислов. Справочник/Под ред. В. Г. Самсонова. М.: Металлургия, 1978.
6. A. Masek, J. M. Semple. Comb. Sci. Tech., 1969, 1, 3.
7. Ю. М. Григорьев, Д. З. Сафанеев, Л. Я. Кашпоров и др.— В кн.: Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черногоровка, 1980.
8. Ю. М. Григорьев, Д. З. Сафанеев. ФГВ, 1980, 16, 2.

УДК 541

#### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ

*Ю. В. Фролов, Б. Е. Никольский*  
(Москва)

Класс гетерогенных металлизированных смесей чрезвычайно широк как по композиционному составу, так и по техническим областям применения. Использование металлического горючего или соединений металлов в составах, способных к самоподдерживающемуся горению, обусловлено в первую очередь большим энерговыделением в волне горения при окислении (сгорании) металлов.



Изменение температуры горения и удельного объема газофазных продуктов горения с ростом концентрации алюминия (1, 1') и магния (2, 2') в смесях с нитратом натрия.

К числу энергоемких металлов относятся В, Al, Mg, Zr, Ti и т. п. [1—3]. Однако алюминию и магнию во многих случаях отдается предпочтение из-за их высокого энергосодержания, относительной безопасности в обращении, хорошей совместимости с другими компонентами, легкости вос-

пламенения и полноты химического реагирования в волне горения.

Окислителем в подобного рода смесях, как правило, являются перхлораты (перхлорат аммония, перхлорат калия) или нитраты (нитрат натрия, калия, рубидия и т. п.). Для стабилизации процесса сгорания, регулирования скорости и закона горения и физико-механических свойств в металлизированные смеси вводят технологические добавки — катализаторы, ингибиторы и горючее-связующее.

Цель настоящей работы — проанализировать изменения основных закономерностей горения простых композиций на основе алюминия и магния с неорганическим окислителем в зависимости от соотношения компонентов в широком диапазоне изменения [4—6].

**Температура горения.** Максимум температуры горения двойных смесей металлическое горючее — неорганический окислитель достигается при содержании 40% алюминия и 50% магния (см. рисунок). Различия по максимальной температуре горения составляют 600—700°C с уменьшением или увеличением концентрации металлического горючего. Причем в области концентраций  $C_{Me} \approx 55 \div 65\%$  на температурной кривой  $T(C_{Me})$  появляется небольшое плато, где  $T$  практически (с точностью 2—3%) не меняется. Затем падение  $T(C_{Me})$  возобновляется и при концентрации  $C_{Me} \approx 90\%$  максимальная температура горения, согласно расчетам, не превышает 1000—1100 К, что близко к температуре горения  $T_r$  простых окислителей ПХА и НН.

При  $40 \leq C_{Me} \leq 90\%$  температура  $T \sim C_{Me}^{-1,5 \pm 0,3}$ . Наличие в смесях связующего (до 5—6%) понижает температуру горения на 300—450°C. С изменением давления в пределах  $p = 15 \div 100$  атм температура горения меняется весьма слабо ( $T \sim p^{0,1}$ ).

**Газогенерация при горении.** Функция образования газофазных продуктов при горении рассматриваемых металлизированных составов, как и  $T(C_{Me})$ , имеет экстремальный характер. На алюминиевых смесях максимальный удельный объем (на 1 кг смеси) газообразных продуктов горения  $V(C_{Me})$  практически совпадает с  $T_{max}(C_{Me})$ .

При использовании в качестве горючего магния максимум  $V(C_{Me})$  сдвинут по отношению к максимуму  $T_r(C_{Me})$  на 10—15% вправо (избыток металла). При  $C_{Me} \geq 50—55\%$  можно функцию  $V(C_{Me})$  аппроксимировать выражением  $V \sim 1/C_{Me}^3$ . С ростом давления  $p$  величина  $V$  образующейся газовой фазы падает обратно пропорционально  $p$  и при  $p = 70 \div 100$  атм становится меньше 10 л/кг. Это означает, что рабочее тело, необходимое для диспергирования конденсированных продуктов (или продуктов неполного окисления) с поверхности горения образца, практически сведено к минимуму.

**Пределы горения по давлению и концентрации  $C_{Me}$ .** Пределы горения металлизированных систем (особенно простых двойных композиций) по давлению и концентрации металлического горючего взаимосвязаны. При малой концентрации алюминия или магния (особенно в присут-

ствии катализаторов горения) смеси на основе ПХА и нитрата натрия начинают гореть практически с 1 атм и вплоть до давления в сотни атмосфер. С повышением содержания алюминия и магния свыше 50% при горении появляется нижний предел горения по давлению.

Так, при концентрации алюминия в 70% (с медь-хроматной добавкой) составы начинают гореть с давления в 5 атм, при концентрации 85% таким давлением является 20 атм, при 90% Al — 40 атм. Следует отметить, что на пределы горения большое влияние оказывает дисперсность компонентов.

**Скорость нормального горения.** Скорость нормального горения металлизированных композиций может изменяться от нескольких до десятков миллиметров в секунду при рабочем давлении до 100 атм. Например, смесь на основе ПХА с 90% металлического горючего алюминий — цирконий в зависимости от соотношения алюминия и циркония имеет скорость горения от  $u \approx 90$  до  $\approx 2$  мм/с. Скорость горения исследованных составов на основе алюминия и магния при 20—30% Me имеет максимум, который в зависимости от дисперсности компонентов достигает значения 20—30 мм/с. С увеличением концентрации Me значение скорости монотонно падает и при 80—85% алюминия или магния величина  $u$  уже не превышает 2—4 мм/с ( $p = 40$  атм). Выше этого предела по  $C_{Me}$  составы перестают гореть.

**Агломерация и диспергирование.** Характерная особенность горения металлизированных составов — образование в волне горения конденсированной фазы окислов металла или непрореагировавших частиц алюминия и магния, которые могут взаимодействовать между собой, образуя агломераты, по дисперсности значительно превышающие исходный металл. При малых концентрациях алюминия и магния (до 3—7%) при дисперсности 50—100 мкм частицы металлического горючего в силу своей разьединенности практически не взаимодействуют друг с другом и диспергируются в факел пламени (до или одновременно с воспламенением) практически без искажения их размеров. С повышением  $C_{Me}$  частицы алюминия и магния начинают агломерировать на поверхности горения, образуя крупные и сложные по составу агломераты.

В интервале  $C_{Me} = 35 \div 40\%$  при горении составов на основе алюминия образуются крупные капли диаметром до нескольких миллиметров. Далее ( $C_{Me} = 50 \div 55\%$ ) в процессе горения начинает образовываться каркас, величина которого зависит от давления и типа окислителя. Диспергирование в этой области практически отсутствует. Эта область по газовыделению соответствует области интенсивного уменьшения газобразных продуктов сгорания. При концентрации алюминия свыше 65% наступает режим горения, в ходе которого алюминий практически не агломерирует и не воспламеняется — так называемый режим холодного горения. В этой области диспергирование в обычных условиях минимально, а конечные продукты горения остаются в виде исходных (но окисленных) частиц в объеме, где происходит сжигание.

Отличие горения составов с магнием состоит в том, что каркасообразование начинается при  $C_{Me} \sim 50\%$  и сохраняется вплоть до предела горения по концентрации  $C_{Me} = 85\%$  с нитратом натрия и 70—75% — с перхлоратом аммония. Указанные особенности процесса агломерации и диспергирования хорошо коррелируют с закономерностями изменения температуры, газовой выделению и скорости горения, которые имеют место при горении металлизированных составов в широком диапазоне изменения  $C_{Me}$ .

Увеличению степени агломерации способствуют повышение температуры волны горения, снижение газовой выделению, рост концентрации металлического горючего и снижение температуры горения. Величина диспергирования определяется размером частиц, образовавшихся на поверхности горения (агломератов), и количества газофазных продуктов горения ( $\rho u$ ). От соотношения этих параметров в конечном итоге зависит

полнота химического реагирования металлического горючего и, следовательно, тепловыделения при горении металлизированных смесей.

Анализ показывает, что рассматриваемые смеси в зависимости от концентрации в них металлического горючего можно условно подразделить на три взаимосвязанные категории:

1) смеси, в которых концентрация алюминия и магния не превышает 15—25%, характеризуются высокой скоростью и температурой горения, хорошим газовыделением, умеренной агломерацией и полным диспергированием конденсированных продуктов горения;

2) для смесей, содержащих 40—60% металлического горючего, характерны сильная зависимость  $T_r$  и  $u_r$  от концентрации металлического горючего, повышение степени агломерации, что ведет к образованию крупных монолитных капель расплавленного металла или плотного каркаса, и диспергирование, меняющееся в пределах от 30—40% до нуля;

3) смеси с содержанием металлического горючего свыше 60% после сгорания оставляют толстый слой шлака или каркас, напоминающий по форме исходный образец. Диспергирование практически отсутствует. Величина газообразных продуктов горения минимальна. Температура горения может достигать величины, при которой возможен режим горения без воспламенения и взаимодействия (агломерации) частиц в зоне горения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
2. А. Шидловский. Основы пиротехники. М., 1943.
3. Ю. В. Фролов, И. В. Обезьяев, В. Н. Емельянов. Горение частиц бора. Препринт. Черноголовка, 1977.
4. Л. Я. Кашпоров, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1975, 11, 4, 38.
5. В. Д. Гладун, Ю. В. Фролов, Л. Я. Кашпоров. Природа агломерации при горении высокометаллизированных конденсированных систем. Препринт. Черноголовка, 1977.
6. В. Д. Гладун, Ю. В. Фролов, Л. Я. Кашпоров. ФГВ, 1977, 13, 6, 705.

УДК 662.61

### СКОРОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ ВЫГОРАНИЯ ПРИ ФОРКАМЕРНО-ФАКЕЛЬНОМ ЗАЖИГАНИИ В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Л. А. Гусак, В. П. Карпов, В. Г. Слуцкий, А. И. Спасский*  
(Москва)

Известно [1], что применение форкамерно-факельного зажигания улучшает характеристики горения в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), в частности уменьшает время горения и увеличивает стабильность выгорания топливного заряда. В то же время для указанного способа зажигания в литературе отсутствуют данные по динамике выгорания заряда — важной характеристике процесса как в практическом, так и в научном аспекте.

Цель работы заключается в экспериментальном и теоретическом исследовании закономерностей выгорания в рабочем объеме ДВС при форкамерно-факельном зажигании.

Эксперименты проводили на одноцилиндровом двигателе с рабочим объемом  $V_h = 600 \text{ см}^3$ , степень сжатия  $\epsilon = 7,1$  при числе оборотов  $n = 1000 \text{ об/мин}$  и различных составах рабочей смеси  $\alpha = 1,0 \div 1,6$ , где  $\alpha$  — коэффициент избытка окислителя. Форкамера объемом  $V_\phi = 2 \text{ см}^3$  (2% от объема камеры сгорания  $V_c = V_h/(\epsilon - 1)$ ) имела два расположенных под углом  $60^\circ$  друг к другу выпускных канала диаметром  $d_\phi = 2 \text{ мм}$ ,