

Рис. 3. Зависимость скорости горения от давления инертного газа. 1 — сплошной цилиндр; 2 — труба.

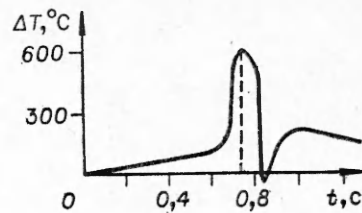


Рис. 4. Изменение перепада температур со временем при спиновом режиме горения.

1. Автоколебательные режимы горения (синхронные пульсации скорости горения всех точек фронта) и спиновые режимы (перемещение светящегося очага по спирали) разделены своеобразным режимом горения в виде множества неупорядоченно перемещающихся по фронту горения светящихся точек.

2. Низкокалорийный спиновый режим оказывается чувствительным к смещению в ту или иную сторону общего теплового баланса в процессе горения. Дополнительный прогрев исходной системы конвективными потоками окружающего газа приводит к существенной зависимости средней скорости горения от направления перемещения фронта, а дополнительный прогрев внутренней поверхности полого цилиндра от раскаленных шлаков — к превышению скорости горения полого цилиндрического образца над скоростью горения сплошного цилиндра.

3. При спиновом режиме на процесс горения существенное влияние оказывает топология поверхности горящего образца. Реализация одноголового спинового режима возможна при наличии симметричной формы.

Поступила в редакцию 29/IV 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, П. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4, 892.
2. А. К. Филоненко, В. И. Вершинников. ФГВ, 1975, 11, 3, 353.
3. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. Т. П. Излева, А. Г. Мержанов, К. Г. Шкадинский. Докл. АН СССР, 1978, 239, 5, 1086.
5. А. П. Алдушин, Я. Б. Зельдович, А. Б. Маломед. Феноменология неустойчивого горения при малых и больших числах Льюиса. Препринт ИКИ АН СССР. М., 1980.
6. Ю. М. Максимов, А. Т. Пак и др. ФГВ, 1979, 15, 3, 456.
7. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1976, 12, 2, 211.

УДК 541.126

ДИСПЕРСНОСТЬ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ КАПЛИ АЛЮМИНИЯ

В. А. Архипов, В. А. Ермаков, А. А. Раздобреев
(Томск)

Одним из важных в теории гетерогенного горения и для практических приложений является вопрос о дисперсном составе конденсированных продуктов сгорания порошков легких металлов. Как показывают экспериментальные данные [1], продукты сгорания капель алюминия представляют собой микронные (в основном) и субмикронные частицы, состоящие из окиси алюминия. Частицы могут быть сплошными [2], полыми [3—6] или иметь более сложную структуру [3]. При изучении

горения мелкодисперсного алюминия в многокомпонентных газовых смесях показано [7], что вокруг горячей капли существует устойчивое облако конденсата с резко очерченной внешней границей. Это облако начинается на некотором удалении от поверхности горячей капли и состоит из частиц конденсированной окиси алюминия, монотонно укрупняющихся к периферии; за внешней границей облака обнаружены отдельные крупные частицы. В работах [5—10], посвященных теоретическому исследованию образования конденсированных продуктов сгорания алюминия, предприняты попытки аналитического определения размеров частиц окиси алюминия на основе предложенных авторами моделей горения мелких капель металла.

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования характеристик конденсированных продуктов, образующихся при горении индивидуальных капель алюминия, воспламененных лазерным излучением. При проведении экспериментов использовался метод [11], в основу которого положен нагрев неподвижных частиц до температуры воспламенения сфокусированным излучением лазера непрерывного действия на CO_2 с длиной волны 10,6 мкм. Плотность потока излучения, инициирующего воспламенение частиц, составляла 10^7 Вт/м². Опыты проводились на воздухе при атмосферном давлении. В качестве объектов исследования использовались сферические частицы алюминия диаметром 250, 500 и 900 мкм. Частица подвешивалась на кварцевой игле при помощи капли спирта. В момент воспламенения расплавленная частица алюминия отделялась от иглы и свободно падала до встречи с предметной пластиной, на которой также оседали и «замораживались» конденсированные продукты сгорания. Расстояние до пластины выбиралось таким образом, чтобы за время падения капли успела сформироваться устойчивая трехзонная картина ее горения.

Исследование распределения по кольцевым зонам (с центром в месте падения погашенной капли алюминия) «замороженных» продуктов и их дисперсный анализ проводились под микроскопом МИМ-7 (разрешение 0,5 мкм). Счет частиц осуществлялся в двух взаимно перпендикулярных направлениях по квадратным зонам со стороной 1 мм. Для проверки симметрии распределения количества и размеров частиц конденсата проводились контрольные измерения по произвольно выбранному направлению. Установлено, что принятый способ обработки достаточно корректен, так как продукты распределены на предметной пластине симметрично (за исключением крупных частиц диаметром более 20 мкм). Для капель алюминия всех указанных выше размеров находилось распределение конденсированных продуктов сгорания по размерам, а для капель диаметром 900 мкм находилось радиальное распределение количества частиц окиси диаметром 1 мкм, осевших на предметной пластине.

Осредненные по результатам 4—5 опытов данные представлены в таблице и на рисунке. В таблице приведены данные по дисперсному составу продуктов для трех исходных размеров капель алюминия d_0 (N_i — количество частиц диаметром d_i в пробе). Спектр размеров частиц довольно широк и зависит от диаметра исходной капли алюминия, однако для всех исследованных d_0 количественный максимум принадлежит частицам диаметром ~ 1 мкм. Как видно из таблицы, с уменьшением d_0 количество мелких частиц ($d_i = 1 \div 2$ мкм) изменяется незначительно, в то же время количество частиц диаметром более 5 мкм заметно уменьшается. Кроме того, обнаружено, что с ростом d_0 увеличивается максимальный размер частиц окиси в пробе. Так, если для $d_0 = 250$ мкм размер частиц окиси не превышает 55 мкм, то для $d_0 = 900$ мкм обнаружены частицы диаметром 140 мкм.

Радиальное распределение количества частиц диаметром ~ 1 мкм на предметной пластине представлено на рисунке. Здесь r — расстояние

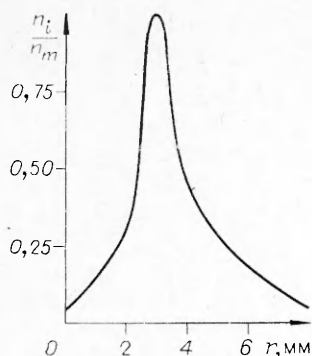
от погашенной на пластине капли алюминия; n_i — количество частиц в кольцевой зоне r ; n_m — количество частиц в кольцевой зоне r_m с максимальной населенностью частицами. Как видно из рисунка, распределение продуктов сгорания представляет три отчетливо различающиеся концентрические зоны. Первая из них примыкает непосредственно к исходной капле и составляет примерно половину ее диаметра. Следующая зона имеет максимальную населенность и находится на расстоянии $(2,5-3)d_0$ от поверхности частицы. Третья зона с наименьшей концентрацией продуктов простирается до $7d_0$.

При обработке данных отбора обнаружено, что суммарная масса конденсированных продуктов, рассчитанная по измеренным диаметрам частиц, намного превосходит массу исходной капли алюминия. Это указывает на то, что большинство крупных частиц окиси алюминия представляют собой полые сферы.

Для анализа полученных результатов воспользуемся выводами [11] экспериментального исследования механизма горения капель алюминия. При воспламенении капли вместе с распространяющимся факелом пламени по ее поверхности с последней срывается окисная пленка, разрушающаяся впоследствии на несколько осколков. В процессе последующего расширения факела по нормали к поверхности капли и формирования устойчивой трехзонной картины горения из осколков окисной пленки образуются шарики. Эти шарики при горении капли алюминия, постоянно находясь в движении, могут сливаться между собой. Кроме того, процесс устойчивого горения сопровождается выбросом в зону пламени (или за ее пределы) шариков диаметром 20—80 мкм, которые, вероятно, образуются из накопившихся на поверхности островков окиси алюминия.

Представленное на рисунке распределение конденсированных продуктов может быть качественно объяснено на основе полученных в [11] выводов о механизме горения капли. Подавляющее большинство частиц окиси алюминия образуется в высокотемпературной зоне реагирования металлического пара с газообразным окислителем, расположенной на расстоянии $\sim 3d_0$ от поверхности горячей капли. Небольшое количество частиц окиси в «темной» зоне, прилегающей к капле, можно объяснить, исходя из представлений о том, что в этой зоне основным компонентом является парообразный металл. Несмотря на то, что вероятность попадания газообразного окислителя к поверхности капли сохраняется [5], она, по-видимому, мала, поэтому лишь сравнительно небольшое число молекул металла и окислителя, вступая во взаимодействие, образуют в этой области конденсированные частицы окисла. Дополнительное число таких частиц в указанной зоне может появляться за счет осаждения продуктов при погашении капли в момент ее соприкосновения с предметной пластиной (если капля гаснет мгновенно), а также за счет стягивания зон горения (если гашение капли происходит постепенно). Вклад этих процессов зависит как от диаметра горящих капель, так и от скорости их столкновения с пластиной и ее свойств. Из проведенного анализа следует, что полученные экспериментальные результаты подтверждают выводы, следующие из предложенного в [11] трехзонного механизма горения капли алюминия.

Необходимо сделать следующее замечание. В условиях проведенных экспериментов зона горения капли алюминия сферически симметрична. Для количественной интерпретации результатов необходимо решать интегральное уравнение Абея, что относится к числу некорректных задач математической физики. Оценка погрешностей измерения радиального распределения частиц на предметной пластине показала, что известные приближенные методы решения уравнения Абея не обеспечивают достоверного определения пространственного распределения населенности частиц вокруг горячей капли. Поэтому проведенный выше анализ носит качественный характер.



Таким образом, исследование дисперсности и радиального распределения конденсированных продуктов сгорания, образующихся при горении капель алюминия под действием лазерного излучения, позволяет сделать следующие выводы.

1. Спектр размеров продуктов достаточно широкий — от субмикронных частиц до отдельных частиц с $d_i \sim 140$ мкм. В исследованных пробах обнаружено максимальное количество частиц диаметром 1—2 мкм (частицы меньших размеров выходят за пределы разрешения МИМ-7). При увеличении d_0 от 250 до 900 мкм количество микронных частиц практически не изменяется, а частиц с $d_i = 5$ мкм — возрастает. С ростом d_0 увеличивается максимальный размер частиц в пробе.

2. Основная масса конденсированных продуктов представляет собой полые сферы из окиси алюминия.

3. Радиальное распределение осажденных на предметной пластине продуктов характеризуется наличием кольцевой зоны радиусом $\sim 3d_0$ с максимальной концентрацией частиц.

4. Полученные результаты подтверждают предложенный в [11] трехзонный механизм горения капли.

В заключение авторы выражают благодарность А. И. Скорикку за полезные обсуждения затронутых выше вопросов и стимулирующие дискуссии, Ю. В. Фролову за постоянный интерес к работе, А. И. Шамину за помощь в обработке результатов экспериментов.

Поступила в редакцию 15/IV 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Мачек. ВРТ, 1968, 12, 137.
2. Т. Бржустовский, П. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
3. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
4. Ч. Дрю, А. Гордон, Р. Кнайп.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
5. В. М. Гремячкин, А. П. Петратов, О. П. Лейпуцкий. ПМТФ, 1974, 4, 70.
6. В. М. Гремячкин, А. П. Петратов, О. П. Лейпуцкий.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
7. А. С. Борешко, А. В. Иващенко, Г. Г. Шелухин.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
8. М. А. Гуревич, Г. Е. Озерова, А. М. Степанов.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
9. A. Darris. Comb. Flame, 1963, 7, 4.
10. X. Л. Фейн. РТК, 1966, 4, 1, 15.
11. А. А. Раздобреев, А. П. Скорик, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1976, 12, 2, 203.
12. М. М. Скотников. Тепевые количественные методы в газовой динамике. М.: Наука, 1976.