

С учетом (2) из (3) следует, что Δr может быть очень небольшим, даже когда скорость горения в несколько раз больше u_n . Видно также, что при $p_0 < p_{св}$ ($v_k < v_n + 0,5$) рост Δr отстает от p_0 , а при $p_0 > p_{св}$ опережает его.

Поскольку в конвективном режиме возможности фильтрации используются полностью, то увеличивать (как в случае возмущенного горения) интенсивность конвективного теплопереноса быстрее, чем позволяет рост Δr_0 за счет увеличения в нем доли Δr становится невозможным. Поэтому при $p_0 > p_*$ рост скорости горения замедляется, а показатель степени v_k в зависимости $u_k(p_0)$ стабилизируется.

Поступила в редакцию 27/V 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1946, 53, 237.
3. В. К. Боболев, А. И. Карпухин, С. В. Чуйко. НТПГВ, 1965, 1, 1, 44.
4. К. К. Андреев, С. В. Чуйко. ЖФХ, 1963, 37, 1304.
5. С. Я. Куракин, В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов. — В сб.: Кинетика физико-химических реакций. Черногоровка, 1977.
6. В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1979, 5, 2.
7. Л. В. Альтшулер, С. А. Новиков, И. И. Дивнов. Докл. АН СССР, 1966, 166, 67.
8. А. Д. Марголин, С. В. Чуйко. ФГВ, 1965, 1, 3.
9. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 498.
10. К. Куо, В. Vishnevetsky, M. Summerfield. AIAA J., 1973, 11, 4, 444.
11. В. Ф. Дубовицкий, В. Г. Коростелев и др. ФГВ, 1974, 10, 6, 841.
12. Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасанов и др. ФГВ, 1975, 11, 5, 720.
13. А. Э. Аверсон. — В сб.: Тепломассообмен в процессах горения. Черногоровка, 1979.
14. Кох, Даттон и др. Теплопередача, 1977, 99, 3.
15. Г. И. Баренблатт. Изв. АН СССР. ОТН, 1954, 6, 97.

УДК 662.581

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СПИНОВОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ТЕРМИТОВ

А. В. Дворянкин, А. Г. Струнина, А. Г. Мержанов
(Черногоровка)

Возможность перемещения фронта горения в виде очага реакции, движущегося по спирали, впервые обнаружена [1] при горении гетерогенных систем типа металл — газ. Это явление названо спиновым горением. Подробное экспериментальное исследование [2] выявило основные закономерности этого процесса. В [3—5] активно развивается теория спиновых режимов горения. Показана возможность существования таких режимов при горении безгазовых систем. Экспериментальное подтверждение этому получено в работе [6], проведенной на интерметаллических системах.

Ниже излагаются результаты изучения основных закономерностей спиновых режимов при горении термитных составов. Наибольшее внимание уделено тем вопросам, которые не рассматривались ранее.

С целью выбора объектов исследования изучено горение ряда термитных систем при различной степени разбавления исходных компонентов продуктами реакции. Визуальные наблюдения в процессе горения и анализ образцов после горения (на цилиндрической поверхности запрессованного образца остается след, характерный для каждого режима) показали, что для большинства исследованных систем предельный режим горения — автоколебательный (после горения — ряд параллельно расположенных кольцевых углублений). Спиновый режим (спи-

Т а б л и ц а 1

Состав	Добавка	<i>m</i> , %	Примечание
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	Al_2O_3	29 32—36 40	Растекание шлаков Стационарное горение Автоколебательный режим горения
$2\text{BaCrO}_4 + 2\text{Al}$	Al_2O_3	0—40 40—45	Стационарное горение Автоколебательный режим горения
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	Al_2O_3	0—15 20 20—30	Стационарное горение Автоколебательный режим горения Горение с множеством точек
$3\text{ZrO}_2 + 4\text{Al}$	Al_2O_3	0 3 5	Стационарное горение Горение с множеством точек Спиновое горение
$\text{TiO}_2 + 2\text{Mg}$	MgO	0—20 40	Стационарное горение Автоколебательный режим горения
$\text{SiO}_2 + 2\text{Mg}$	MgO	0—30 40	Стационарное горение Автоколебательный режим горения
$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{Zr}$	ZrO_2	0—20 40—50 60 70—74 76—77	Разлет продуктов реакции Стационарное горение Автоколебательный режим горения Горение с множеством точек Спиновое горение
$2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Zr}$	ZrO_2	0 55 57—67 69	Стационарное горение Автоколебательный режим горения Горение с множеством точек Спиновое горение

П р и м е ч а н и е. *m* — содержание добавки.

ралевидный след, опоясывающий поверхность цилиндрического образца) присущ лишь некоторым системам (табл. 1). В дальнейшем рассматривалось горение именно этих систем.

Проведение опытов и процесс подготовки к ним аналогичны методике [7]. Горение исходных образцов фиксировалось кинокамерой «Конвас». Скорость перемещения фронта горения по образцу определялась фоторегистратором ФР-11, температура горения — вольфрам-ренийевыми термомпарами, помещенными в образце.

Влияние внешних факторов

Табл. 2 дает представление о ширине области горения хромово-циркониевого и железциркониевого термитов (в различных средах), характеризующегося наличием светящихся очагов. Ширина области оценивалась диапазоном разбавления исходных компонентов продуктами реакции. При меньшем разбавлении наблюдается стационарный или автоколебательный режим горения, при больших — горение затухает. Режим горения с очагами легче всего реализуется в инертной среде (самая широкая область), однако верхний предел в атмосфере воздуха несколько выше, чем в инертной среде. По-видимому, кроме окислительно-восстановительной реакции, присущей самой системе, есть еще и побочная реакция взаимодействия с кислородом воздуха. Об этом же свидетельствует соотношение между скоростями горения на воздухе и в атмосфере аргона (табл. 3).

Т а б л и ц а 2

Система	Среда	Ширина области горения (m , %)
$2Cr_2O_3 + 3Zr + \beta \cdot ZrO_2$	Воздух	57—69
	Азот	30—35
	Аргон	22—35
$2Fe_2O_3 + 3Zr + \beta \cdot ZrO_2$	Воздух	70—77
	Азот	65—70
	Аргон	50—70

На ширину области спиновых режимов горения оказывает влияние и направление перемещения фронта горения (сверху вниз по цилиндрическому образцу либо наоборот). Опыты с железозиркониевым термитом ($Fe_2O_3 + Zr$) показали, что появление светящихся точек во фронте горения, перемещающемся снизу вверх, имеет место при большем разбавлении (на менее калорийных системах). Средние скорости горения тоже различны. У железозиркониевого термита ($m = 68\%$) при горении сверху вниз $v = 0,5$ мм/с, а снизу вверх — $v = 0,8$ мм/с. Это связано с тем, что при горении снизу вверх исходная система дополнительно прогревается конвективными потоками окружающего газа, нагретого от шлаков.

Влияние параметров системы

Изменение ширины области различных режимов горения хромово-циркониево-алюминиевого термитов с изменением дисперсности порошков алюминия представлено на рис. 1, *a* и *б* соответственно. В опытах использовались порошки алюминия марок АСД-1, АСД-3, АСД-4 (размеры частиц соответственно 14, 7 и 5 мкм). Как и выше, ширина области горения оценивалась диапазоном разбавления исходных компонентов продуктами реакции, при котором реализуется тот или иной режим горения. Область *I* соответствует стационарному режиму горения, *II* — автоколебательному, *III* — горению с множеством бегающих точек, *IV* — спиновому горению. С увеличением размера частиц алюминия области спинового режима горения и горения с множеством бегающих точек сокращаются.

Особенности горения в зависимости от калорийности состава исследованы для различных термитных систем при горении на воздухе и в атмосфере аргона. Оказалось, что с уменьшением калорийности состава режимы горения меняются от стационарного через автоколебательный, горение со множеством бегающих точек и спиновый к затуханию горения. Причем для некоторых систем (железоциркониевый, хромово-циркониевый, циркониево-алюминиевый термиты) горение затухает при спиновом режиме с одной точкой,двигающейся вдоль боковой поверхности образца по спирали. Горение хромово-алюминиевого термита затухает всегда при режиме со множеством бегающих точек (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 3

Система	Среда	Давление, атм	Скорость горения, мм/с
$2Cr_2O_3 + 3Zr + 1,41ZrO_2$	Воздух	1	1,4
	Аргон		0,8
$2Fe_2O_3 + 3Zr + 3,23ZrO_2$	Аргон	5	0,7
		10	0,6

Рис. 1. Влияние дисперсности алюминия на процесс горения систем.

На примере железоциркониевого термита изучался процесс горения систем в зависимости от плотности прессования. Опыты проводились в атмосфере аргона. Анализ экспериментальных результатов показал, что при фиксированной калорийности системы с увеличением плотности прессования уменьшается количество светящихся точек и частота спинового горения. Средняя скорость горения при этом тоже снижается. Результаты, полученные на термитных составах при изменении дисперсности компонентов, калорийности и плотности прессования, согласуются с данными других авторов для других систем [2].

Влияние геометрии образца на процесс горения исследовался на прессованных составных цилиндрических и полуцилиндрических образцах, пластинах различной толщины и образцах в виде трубы из хромово-алюминиевого и железоциркониевого термитов. Опыты проводились на воздухе и в атмосфере аргона.

Для исследования горения составных цилиндрических образцов выбран хромово-алюминиевый термит с различным содержанием инертной добавки. Термитная смесь запрессовывалась в форме составного цилиндра, контакт между полуцилиндрами осуществлялся по плоскости, проходящей через ось цилиндра; одна половина таблетки делалась более калорийной, чем другая. Результаты опытов представлены в табл. 4. Фронт горения сильно наклонен в сторону более калорийной части образца и по внешнему виду представляет собой эллипсоид. Если реализуется горение со множеством бегающих точек в обеих частях образца, то они, как правило, перемещаясь по полуцилиндрам, встречаются и дают яркую вспышку в месте их стыка. Высокая калорийность одной части образца приводит к тому, что вторая половина системы способна гореть выше предела по горению (предел по горению для выбранной системы $m = 33\%$).

На модели железоциркониевого термита изучался процесс горения образцов типа полуцилиндров. Оказалось, что при горении образцов такой формы возможны режимы, когда появляется множество бегающих

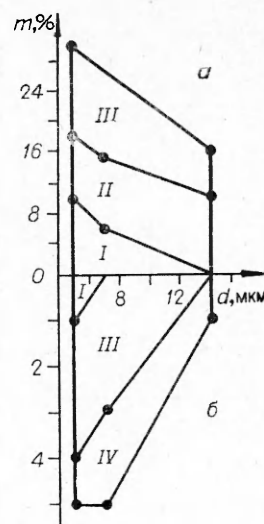


Таблица 4

$m, \%$		Особенности горения	
Л	П	Л	П
10	30—40	Пульсирующий фронт горения То же	Горение с множеством бегающих точек
15	30		Горение с множеством точек
20	30	Горение с множеством точек	Горение с множеством точек, количество которых меньше, чем в левой половине таблетки
25			
15	40	То же	Горение со значительно меньшим, чем в левой половине, количеством точек
20			
25	40	»	Спиновое горение с одной бегающей точкой

Примечание. Состав: $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + \beta\text{-Al}_2\text{O}_3$; Л — левая половина таблетки, П — правая половина таблетки.

Таблица 5

$m, \%$	Давление прессования, кгс/см ²	Плотность образца, г/см ³	$b, \text{мм}$	Особенности горения
60	50—100	3,60—3,90	5	Пульсирующий фронт горения Горение с множеством точек. Количество их уменьшается с ростом ρ
	50	3,60	2	
	100—150	3,90—4,00	1,5	
67	50—80	3,60—3,90	5	Пульсирующий фронт горения Горение с множеством точек Система не горит
	50—100	3,60—3,90	3	
	50—70	3,60—3,80	2	
69	50—100	3,60—3,90	8	Горение с множеством точек Система не горит
	50—70	3,67—3,80	5	
70	40—50	3,50—3,67	7÷8	Горение с множеством точек Система не горит
	50	3,67	5	
70	80—150	3,90—4,00	15	Спиновое горение с одной или двумя точками

Примечание. Состав: $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{Zr}$.

точек, которые перемещаясь по цилиндрической и плоской частям образца, встречаются и дают яркие вспышки в месте их стыка. Спиновые режимы горения с одной светящейся точкой,двигающейся по спирали, не реализуются.

Результаты исследования горения пластинчатых образцов сведены в табл. 5. При одном и том же составе системы и размерах пластины $30 \times 15 \times b$ мм с уменьшением толщины пластины (b) происходит смена режимов от автоколебательного к режиму с множеством бегающих точек. При $b < 15$ мм горение представляет собой беспорядочное движение мелких светящихся точек, которые по мере движения фронта горения исчезают и появляются снова. Спинового горения с одной или двумя точками,двигающимися по спирали, во всем исследованном диапазоне калорийностей и плотностей прессования получить не удалось. Лишь для образцов с размерами $30 \times 15 \times 15$ мм возможно существование спинового режима горения с одной точкой,огигающей по спирали боковую поверхность образца.

Большой интерес представляет собой горение полых цилиндров. Опыты проводились на образцах железоциркониевого термита, запрессованных в виде трубы ($D_1 = 10, d_1 = 4$ мм; $D_2 = 25, d_2 = 15$; 20 мм, где D и d — наружный и внутренний диаметр соответственно). При горении такой системы спиновые режимы также реализуются. Однако один и тот же термитный состав, запрессованный в виде сплошного либо полого цилиндра, сгорает по-разному. Если для сплошного цилиндра имеет место спиновый режим с одной светящейся точкой, то для полого — либо режим со множеством точек, либо автоколебательный. Аналогично сменяются режимы горения и при уменьшении толщины трубы. После сгорания трубы в спиновом режиме на ее внешней и внутренней поверхностях остается четкий спиралевидный след прохождения

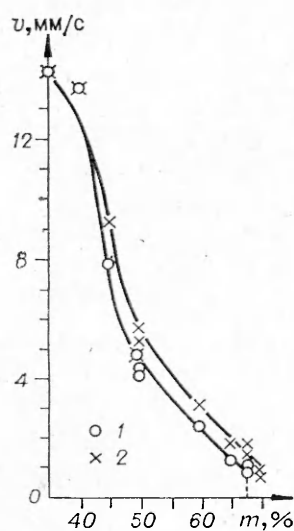


Рис. 2. Влияние калорийности реагирующей системы на скорость горения.

1 — сплошной цилиндр; 2 — труба.

«спина». На изломе виден также след прохождения «спина» в виде линий, направленных под углом к оси симметрии образца. Внутренние слои трубы определенного сечения сгорают раньше и, по-видимому, при большей температуре, так как по толщине стенки трубы просматривается изменение окраски от исходного состава в наружных слоях к окраске продуктов во внутренних. Соотношение между режимами горения сплошного и полого цилиндров противоположно предсказанному теоретически [5] в предположении, что фронт горения есть набор взаимосвязанных осцилляторов. Полый цилиндр сгорает быстрее (рис. 2), разница между скоростями горения полого и сплошного цилиндров исчезает с ростом калорийности системы (при малой степени разбавления). По-видимому, это связано с влиянием (дополнительно к кондуктивной теплопередаче по веществу) теплового потока от раскаленных шлаков. Доля дополнительного теплопереноса тем больше, чем больше внутренняя поверхность трубы и тем ощутимее, чем меньше скорость перемещения фронта горения.

Представляют интерес результаты опытов, выполненных при повышенном давлении инертного газа. Образцы из железозиркониевого термита ($m = 67\%$) сжигались в атмосфере аргона. Разница между скоростями горения сплошного и полого цилиндров сохраняется (рис. 3), но слабо убывает с увеличением давления газа. Кроме того, при повышенном давлении инертного газа для образцов различной формы существенна разница в пределах по горению: для сплошного цилиндра предельное давление инертного газа 10 атм, а для полого цилиндра — 15 атм. Эти результаты также легко объяснить наличием дополнительного теплопереноса, увеличивающего среднюю скорость горения полого цилиндра.

Распределение температур при спиновом режиме горения

Горение гибридных систем в спиновом режиме характеризуется наличием раскаленного поверхностного очага, перемещающегося по спирали [2]; по внутренним слоям образца стекает тепло. Для безгазовых систем при спиновом режиме горения реакция идет не только в приповерхностном боковом слое, но и по всему сечению цилиндра. Зона реакции представляет собой не точку, а луч, закручивающийся по спирали [6]. Вопрос о распределении температур по диаметру образца при спиновом режиме горения никем не исследовался.

Динамику процесса можно проанализировать с помощью термопарных измерений. В работе использовались дифференциальные вольфрам-рениевые термопары, один из спаев которых помещался в центре образца (T_c), а другой — у поверхности (T_1) либо на расстоянии 0,5 радиуса от центра (T_2). Временные изменения перепада температур ($\Delta T_1 = T_c - T_1$) по образцу железозиркониевого термита 67% разбавления представлены на рис. 4. Зависимость $T_c - T_2 = \Delta T_2$ от времени имеет аналогичный вид. При спиновом режиме горения термитных составов предварительно прогреваются внутренние слои образца, температура у поверхности начинает заметно отставать. В момент прохождения спина через спай термопары температуры (T_1, T_2) скачком возрастают (примерно на 600° за 0,4 с в первом случае и на 300° за 0,2 с во втором). Температуры в центре (1250°C) и у поверхности (1180°C) образца выравниваются с точностью до перепада температур (приблизительно 100°C в образце диаметром $d = 10$ мм и плотностью $\rho = 3,60$ г/см³), обусловленного теплопотерями с поверхности образца. Анализируя эти данные, можно заключить, что при спиновом режиме горения термитных систем процесс развивается по всему сечению образца. В пользу этого вывода говорят результаты экспериментов с полыми образцами (трубами), особенностями горения которых описаны выше.

В заключение сформулируем основные выводы.

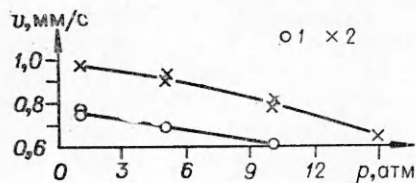


Рис. 3. Зависимость скорости горения от давления инертного газа. 1 — сплошной цилиндр; 2 — труба.

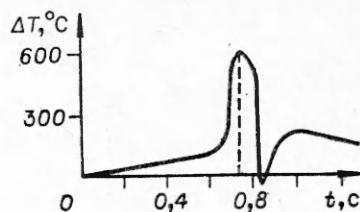


Рис. 4. Изменение перепада температур со временем при спиновом режиме горения.

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