

гласуется с опытными данными и поведение температуры свободной поверхности, характеризующееся во времени сначала слабым, а затем все возрастающим ее убыванием.

Поступила в редакцию 26/III 1984,
после доработки — 13/VIII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Мильков, Г. С. Сухов, Л. П. Ярин. ФГВ, 1985, 21, 1.
2. С. Н. Мильков, Г. С. Сухов, Л. П. Ярин. ФГВ, 1985, 21, 2.
3. С. Н. Мильков, Г. С. Сухов, Л. П. Ярин. ФГВ, 1985, 21, 3.
4. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975.
5. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Диффузионное горение жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ТЕРМИТНЫХ СИСТЕМ

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

Для распространения волны горения по способному к экзотермическому превращению веществу необходимо выполнение определенных условий. Как показано в работе [1], стационарная тепловая волна может иметь место лишь при

$$\Gamma = \gamma - \beta = cRT_0T_r/QE < 0,1, \quad (1)$$

где E — энергия активации; Q — тепловой эффект реакции; c — удельная теплоемкость вещества; T_0 — начальная температура; T_r — температура горения; R — универсальная газовая постоянная. С увеличением Γ происходит вырождение стационарной тепловой волны: выгорание вещества перед фронтом горения становится все более ощутимым, и при $\Gamma > 0,1$ скорость волны уже не может оставаться постоянной во времени из-за объемного протекания реакции в веществе.

Достаточные условия отвечают определенному тепловому балансу процесса: теплотери из зоны горения не должны превышать некоторое критическое значение. Так, для газовых сред [2] процесс затухает при снижении адиабатической температуры горения на один характеристический интервал $(RT_{ад}^2/E)$ и адиабатической скорости горения в \sqrt{e} раз.

При горении конденсированных систем необходимые условия сохраняются такими же, а достаточные несколько видоизменяются из-за специфических особенностей процесса. В конденсированных системах увеличение теплотери приводит к потере устойчивости — появлению автоколебаний [3] и других разновидностей нестационарного горения [4—6]. Критерий устойчивости горения [3], выраженный в параметрах γ и β , имеет вид

$$K = 9,1\gamma - 2,5\beta > K_{кр} = 1, \quad (2)$$

где $\beta = RT_r/E$; $\gamma = cRT_r^2/EQ$. При $K > K_{кр}$ горение устойчиво, а при $K < K_{кр}$ имеют место различные нестационарные эффекты процесса. Дальнейший рост уровня теплотери приводит к затуханию горения. На пределе горения конденсированных систем $v_{ад}/v_{кр} < \sqrt{e}$ [7].

Достаточные условия для распространения тепловой волны горения конденсированных систем в настоящее время практически всегда решаются экспериментально. Последовательность режимов горения этих систем от стационарного до потухания исследована в работах [6, 8—10] на термитных составах. Проанализирована смена режимов горения при изменении:

Система	n, %	T _г , К	v _г , мм/с	c, ккал/кг·град	$\Delta H \cdot 10^{-2}$, ккал/м ² ·с	$\frac{\Delta H}{v} \cdot 10^{-4}$, ккал/м ² ·с	E, ккал/моль	Режим горения
Fe ₂ O ₃ + 2Al + n·Al ₂ O ₃	22	2070	2,50		0,439	0,110		Стационарный
	24	1980	1,90	0,11	0,548	0,0795	41+4	
	26	1890	1,40		0,704	0,0554		
	28	1810	1,10		0,851	0,0413		
	30	1700	0,7	0,11	1,240	0,0244	41+4	Автоколебательный
2Fe ₂ O ₃ + 3Ti + n·TiO ₂	20	1720	1,00		1,221	0,046		Стационарный
	22	1690	0,90		1,328	0,040		
	24	1670	0,80	0,12	1,473	0,035	37+3	
	26	1630	0,70		1,634	0,030		
	28	1590	0,60		1,849	0,025		
	30	1540	0,50		2,133	0,020		
	32	1460	0,40	0,12	2,494	0,015	37+3	Автоколебательный
2Fe ₂ O ₃ + 3Zr + n·ZrO ₂	35	2293	14,2		0,084	1,019		Стационарный
	40	2173	11,0	0,10	0,102	0,742	39+3	
	50	1893	4,60		0,201	0,264		
	55	1713	2,40		0,350	0,122		
	60	1623	1,70	0,10	0,467	0,081	39+3	Автоколебательный
	70	1493	0,90	0,10	0,795	0,039	39+3	Очаговый
2Cr ₂ O ₃ + 3Zr + n·ZrO ₂	0	2370	13,0		0,113	0,558		Стационарный
	10	2160	7,60	0,07	0,174	0,293	43+4	
	20	1930	3,80		0,305	0,128		
	30	1770	2,00	0,07	0,520	0,061	43+4	Автоколебательный
	40	1660	1,30	0,07	0,740	0,037	43+4	Очаговый
	50	1530	0,70		1,250	0,018		
Cr ₂ O ₃ + 2Al + n·Al ₂ O ₃	0	2200	8,50		0,102	0,357		Стационарный
	10	2060	5,70	0,08	0,140	0,222	44+4	
	20	1980	4,40		0,174	0,163		
	25	1950	3,90	0,08	0,190	0,142	44+4	Автоколебательный
	30	1910	3,40		0,220	0,121		
	35	1820	2,40	0,08	0,290	0,081	44+4	Очаговый

Примечание. n — содержание добавки (в 100% смеси).

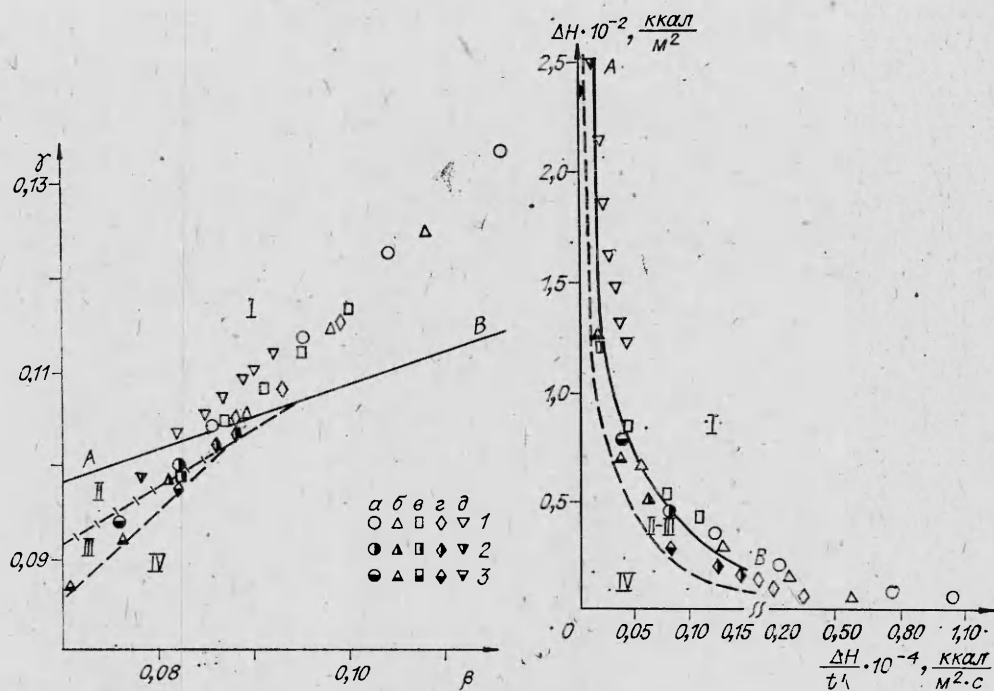


Рис. 1. Область значений определяющих параметров горения железотитанового (а), железотитанового (б), железотитанового (в), хромоциркониевого (г) и хромоалюминиевого (д) термитов.

Горение: 1 — устойчивое, 2 — автоколебательное, 3 — очаговое.

Рис. 2. Соотношение избытков энтальпий и тепловых потоков при различных режимах горения термитных систем (обозначения см. на рис. 1).

- 1) количества инертного разбавителя в исходном составе (снижение теплового эффекта процесса);
- 2) дисперсности компонентов и плотности запрессовки составов;
- 3) скорости обдува горящего образца газовым потоком (росте теплопотерь в окружающую среду);
- 4) начальной температуры образца и топологии его поверхности.

Ниже проводится некоторое обобщение результатов, полученных при горении термитных составов различной калорийности, с целью определения области устойчивого горения, смены режимов неустойчивого горения и условий затухания процесса.

Температуры горения T_r , определенные с помощью вольфрамрентгеновых термопар, скорости горения v_r , полученные фоторегистрацией процесса, удельные теплоемкости составов c — скоростным методом Волькенштейн [11] и особенности различных режимов горения, анализируемые по фоторегистрациям и наблюдаемые визуально по следам на сгоревших образцах [8], приведены в таблице. Температуры и скорости горения в области неустойчивых режимов являются некоторыми средними величинами, около которых колеблются мгновенные значения этих характеристик.

На рис. 1 представлено поле параметров γ и β , отвечающих за реализацию того или иного режима горения термитных систем. Необходимую для расчетов этих параметров эффективную энергию активации определяли по методу кинетического исследования [12].

Анализ полученных результатов показывает, что горение исследуемых составов далеко от границы вырождения [1] (максимальное значение $\Gamma = \gamma - \beta \leq 0,021$). Все поле параметров можно разделить на четыре области горения: I — стационарное, II — автоколебательное, III — очаговое, IV — отсутствие горения. Области I и II разделяет некоторая предельная прямая AB. С увеличением количества инертного

разбавителя в каждой из выбранных систем параметры γ и β уменьшаются. Ширина области неустойчивых режимов горения (II—III) различна, причем для составов, в которых затуханию процесса (переход в область IV) предшествует появление очаговых режимов [6], она значительно шире.

Представляет интерес сопоставить экспериментальные результаты с теоретическими по критерию устойчивости конденсированных систем (2). Целенаправленных опытов по проверке величины K известно мало, и они выполнены на газифицирующих составах с постоянной [13] и переменной [14, 15] температурой поверхности.

Расчет параметра K для термитных систем по результатам, представленным на рис. 1, показывает, что горение устойчиво при $K > 0,72$. При $K = 0,72$ реализуется переход в область неустойчивых режимов. Несколько заниженное экспериментальное значение $K_{кр}$ относительно теоретического (2) можно объяснить некоторым расширением области устойчивых режимов [16] для металлизированных систем, тепловая активность продуктов горения которых выше, чем у исходного состава [17]. Кроме того, в эксперименте вблизи границы устойчивости малые колебания нестационарной скорости не всегда удается выделить и горение воспринимается как стационарное.

Если аналогично [18, 19] процесс горения конденсированных систем охарактеризовать двумя величинами: избытком энтальпии ΔH (запасом тепла в прогревом слое при стационарном горении) и отношением избытка энтальпии ко времени сгорания прогреваемого слоя¹ $\Delta H/t'$ (тепловым потоком из фронта горения в сторону несгоревшей массы), то на координатной плоскости $\Delta H - \Delta H/t'$ различные режимы горения исследованных термитных составов укладываются в областях I (стационарное горение) и II—III (неустойчивое горение), разделенных между собой линией AB. Если параметры системы таковы, что значения ΔH и $\Delta H/t'$ отвечают области IV, горение не реализуется. Анализ результатов, представленных на координатной плоскости рис. 2, показывает, что область неустойчивых режимов горения сравнительно узка.

Поступила в редакцию 11/IV 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Алдушин, В. Д. Луговой, А. Г. Мержанов и др. Докл. АН СССР, 1978, 243, 6.
2. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ. 1941, 11, 1.
3. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4.
5. Ю. М. Максимов, А. Т. Пак, Г. В. Лавренчук и др. ФГВ, 1979, 15, 3.
6. А. В. Дворянкин, А. Г. Струнина, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1982, 18, 2.
7. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
8. А. Г. Струнина, А. В. Дворянкин. Докл. АН СССР, 1981, 260, 5.
9. А. Г. Мержанов, А. В. Дворянкин, А. Г. Струнина. Докл. АН СССР, 1982, 267, 3.
10. А. Г. Струнина, А. В. Дворянкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1983, 19, 2.
11. В. С. Волькенштейн. Скоростные методы определения теплофизических характеристик материалов. Л.: Энергия, 1971.
12. А. Г. Мержанов. ФГВ. 1973, 9, 1.
13. Б. Н. Кондриков. ФГВ. 1969, 5, 1.
14. А. А. Зенин, О. И. Нефедова. ФГВ, 1967, 3, 1.
15. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский, А. Д. Марголин и др. Докл. АН СССР, 1966, 169, 3.
16. А. П. Алдушин, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1975, 11, 1.
17. А. А. Зенин, Г. А. Нерсисян.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черногоровка, 1980.
18. А. Г. Струнина Т, М. Мартемьянова, В. В. Барзыкин и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
19. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, С. В. Костин и др. ФГВ, 1981, 17, 4.

¹ В приближении бесконечно узкой зоны химической реакции, согласно [3], $\Delta H = \frac{\lambda (T_r - T_0)}{v_r}$ и $\Delta H/t' = \rho (T_r - T_0) v_r$, где λ — коэффициент теплопроводности состава; ρ — плотность.