

СПЕКТРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ТИТАНА С УГЛЕРОДОМ

Т. С. Азатян, В. М. Мальцев,
А. Г. Мержанов, В. А. Селезнев

В работах СВС-процессам [1—3] исследовался механизм горения в системах металл — неметалл. Рассматривалась зависимость скорости горения от различных параметров (размера частиц, стехиометрического коэффициента α , содержания инертного разбавителя и т. д.), а также анализировался состав продуктов горения.

В [4, 5] была экспериментально показана возможность измерения профиля температуры самораспространяющейся волны синтеза спектрально-оптическими методами. В данной работе эта методика применялась для исследования механизма горения смесей титана с углеродом исходного размера ≤ 1 мкм.

Смесь сжигалась в бомбе постоянного давления в инертной атмосфере аргона ($p=10$ атм). Плотность цилиндрических образцов составляла $2,5$ г/см³. Определение скорости горения исследуемых образцов проводилось фотографическим методом [6]. Для исследования процесса догорания в волне синтеза образцы подвергались закалке в жидком аргоне по методике, описанной в [1], а также сжигались в вакууме (10^{-3} атм).

Продукты горения подвергались химическому анализу на содержание свободного и связанного углерода. Химический состав продуктов, как и в [1], характеризовался процентом недогорания $\epsilon = C_c/C_{\text{общ}}$ (C_c — количество углерода, не вступившего в реакцию; $C_{\text{общ}}$ — общее содержание в образце).

В табл. 1 представлены расчетные адиабатические $T_{\text{ад}}$ (расчет проводился по методике [7]) и измеренные максимальные T_{max} значения температур волны синтеза. Данные в таблице показывают, что максимальная температура, развиваемая в волне синтеза, падает с увеличением r — размера частиц титана.

На рис. 1 и 2 приведены распределения температуры T по высоте x волны синтеза смеси титан — углерод в зависимости от исходного размера частиц титана и стехиометрического коэффициента α (направление движения волны справа налево). С увеличением размера частиц титана наблюдается резкое изменение распределения температуры в волне синтеза, область максимальных значений температуры сглаживается и расширяется, в то время как при горении мелких частиц титана (≤ 45 мкм) она резко выражена. В случае горения полидисперсного титана с разными значениями α профили температур подобны и характеризуются выраженной высокотемпературной зоной. Из-за теплопотерь в окружающую среду при горении наблюдалось изменение температуры по сечению образца. В зоне максимальных температур разность

Таблица 1

Размер частиц титана, мкм	α	$T_{\text{ад}}, \text{ К}$	$T_{\text{max}} \pm 80^\circ, \text{ К}$ (эксперимент)	$u, \text{ см/с}$
≤ 45	1,0	3200	3070	3,6
125—160	1,0	—	2800	2,2
250—280	1,0	—	2660	1,3
Полидисперсный	0,6	2500	2480	1,1
»	1,0	3200	2950	3,0
»	1,2	3200	2880	2,6

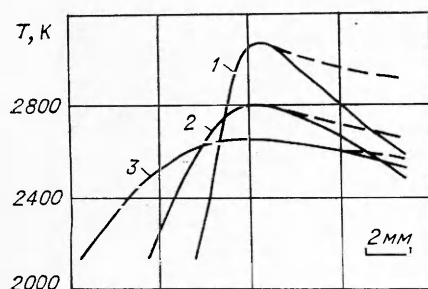


Рис. 1. Распределение температуры по волне синтеза стехиометрической смеси титан-углерод.
Размер частиц титана, мкм: 1 — ≤ 45 , 2 — 125—160, 3 — 250—280.

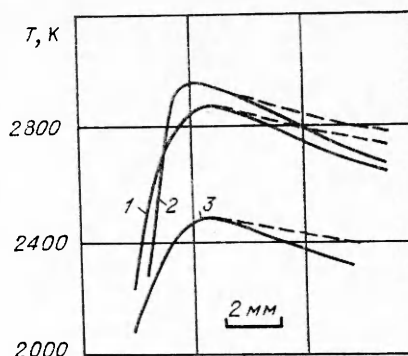


Рис. 2. Распределение температуры по волне синтеза смеси полидисперсного титана (≤ 280 мкм) и углерода.
1 — $\alpha=1,2$; 2 — $\alpha=1,0$; 3 — $\alpha=0,6$.

температуры на поверхности и в глубине (3 мм) таблетки несущественна, а в зоне догорания она может достигать 300° . Штрихом на рис. 1 и 2 показано распределение температуры на глубине 3 мм по сечению образца.

В работе исследовалось влияние разбавления конечным продуктом (карбидом титана) на температуру горения. С увеличением содержания разбавителя в смеси падает значение максимальной температуры горения (табл. 2).

Данные химического анализа продуктов, полученных при сжигании исследуемых образцов в трех различных условиях (ϵ_1 при $p=10$ атм без закалывания образцов; ϵ_2 при $p=10$ атм с закалкой; ϵ_3 — сжигание в вакууме) представлены в табл. 3. Данные для частиц титана ≤ 45 мкм из [1].

Результаты химического анализа показывают, что с увеличением размера частиц титана ($\alpha=1$) наблюдается увеличение содержания непрореагированного углерода, а также рост разности процентов недогорания в закаленных и незакаленных ($p=10$ атм) образцах. Эти результаты свидетельствуют о том, что при горении мелких частиц титана (≤ 45 мкм) основная часть вещества успевает прореагировать в сравнительно узкой высокотемпературной области волны синтеза. Догорание в этом случае незначительно (разность процента недогорания в закаленных и незакаленных образцах составляет 0,55%). При горении крупных частиц титана ($250 \leq r \leq 280$ мкм) роль догорания существенна (разность процента недогорания в закаленных и незакаленных образцах составляет 4,7%), скорость реакции распределена более равномерно по фронту горения. Рост величины недогорания с увеличением размера частиц титана ($\alpha=1$) приводит к уменьшению абсолютных значений температур в волне синтеза (см. табл. 1). Результаты химического анализа для различных α (полидисперсный титан) показывают, что основная часть вещества успевает прореагировать в высокотемпературной зоне волны синтеза. В случае $\alpha=0,6$ ($\epsilon_1=0$; $\epsilon_2=0$) измеренная максимальная температура близка к расчетной адиабатической.

При горении в вакууме таблетки разрушались, за исключением образцов, спрессованных из крупных частиц титана. Величина недогорания в этих случаях значительно воз-

Т а б л и ц а 2

Содержание разбавителя, %	$T_{\max} \pm 80^\circ, K$ (эксперимент)	$T_{ад}, K$ [2]	$u, \text{см/с}$ [2]
10	2860	3200	2,3
15	2740	3200	1,9
20	2700	3050	1,5
25	2600	2900	1,2

Таблица 3

Размер частиц титана, мкм	α	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$
≤ 45	1	0,65	1,2	—
125—160	1	4,2	7	8,4
250—280	1	6,4	11,1	14,2
Полидисперсный	0,6	0	0	—
»	1	0,95	3	—
»	1,2	17	17,9	—

растает (см. табл. 3). Это можно объяснить тем, что образцы увеличивались по размерам, что приводило к уменьшению контакта между реагирующими компонентами.

Анализ результатов (см. табл. 1, 2) свидетельствует о том, что независимо от состава исходной смеси (разные значения стехиометрического коэффициента α , дисперсности титана, а также содержания инертного разбавителя) скорость горения однозначно зависит от максимальной температуры, развиваемой во фронте горения волны синтеза.

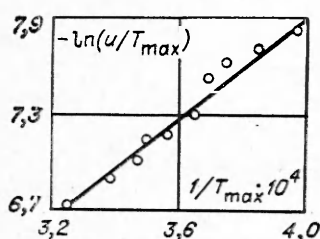


Рис. 3. Обобщенная зависимость скорости горения от максимальных значений температуры для смеси титана и углерода.

Если предположить, что распространение фронта горения в рассматриваемой смеси описывается законом распространения фронта горения в гомогенной конденсированной среде [8] и принять порядок реакции $Ti + C$ равным единице, то все экспериментальные результаты в координатах $\ln(u/T_{\max})$ и $1/T_{\max}$, где u — скорость горения, $T_{\max}$ — максимальная экспериментально измеренная температура, ложатся на прямую (рис. 3). Обработка данных, отложенных в этих координатах по методу наименьших квадратов, дала $E = 61$ ккал/моль.

Таким образом, в результате проведенного исследования на примере горения смеси титана с сажей изучено изменение максимальной

температуры в волне синтеза в зависимости от стехиометрического коэффициента, дисперсности титана, а также содержания инертного разбавителя и показано, что скорость горения однозначно зависит от максимальной температуры, развиваемой при горении, независимо от состава исходной смеси.

Авторы благодарят В. М. Маслова за участие в проведении ряда экспериментов.

Институт химической
физики АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
18/XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез неорганических соединений. Отчет, Черноголовка, 1970.
2. В. М. Шкиро, И. П. Боровинская. — В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. М., «Наука», 1975.
3. И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 4.
4. Т. С. Азатян, В. М. Мальцев и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 445.
5. Т. С. Азатян, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев. ФГВ, 1976, 12, 2, 286.
6. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.
7. И. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. Термодинамический анализ реакций СВС. Препринт ОИХФ АН СССР, Черноголовка, 1975.
8. Б. В. Новожилов. Докл. АН СССР, 1961, 141, 151.