

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ АЛЮМОМАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ  
В ВОДЯНОМ ПАРЕ

Е. С. Озеров, А. А. Юринов

При использовании горючих систем, содержащих диспергированные металлы, выбор оптимальных условий организации процессов горения облегчается, если известны характеристики горения единичных частиц в условиях, близких к реальным. Особый интерес представляют алюмомагниевого сплавы, частицы которых воспламеняются почти так же легко, как частицы магния, а тепла выделяют заметно больше, чем магний. Ниже описаны результаты исследования горения частиц алюмомагниевого сплава в атмосфере водяного пара при нормальном и повышенном давлении.

Исследование проводилось на трековой установке, описанной в [1]. В опытах использовались полидисперсные порошки магния, алюминия и их сплавов. Из порошков выделялись узкие фракции со средним диаметром частиц от 66 до 185 мкм (табл. 1). Частицы вбрасывались в поток горячего (~1800°C) водяного пара, генерируемый диффузионной водородно-кислородной горелкой. В случае необходимости уменьшения концентрации водяного пара поток разбавлялся азотом.

Движущиеся в газовом потоке частицы фотографировались на непрерывно протягиваемую фотопленку. Фотографирование велось через вращающийся диск-обтюратор, так что треки горящих частиц получались прерывистыми. По числу разрывов трека определялось время горения частиц. Кроме того, по известной скорости движения фотопленки и углу наклона трека на ней определялась скорость движения горящей частицы, а по известным расходам компонент горючей смеси — скорость газового потока, т. е. для каждой частицы была известна относительная скорость движения частицы и газа. Опыты производились при давлении газа  $(1 \div 6) \times 10^5$  Па.

Установлено, что в зависимости от температуры газа горение частиц алюминия и сплавов АМ, бедных магнием, может быть парофазным (яркие белые треки) или

Таблица 1

$p \cdot 10^5$ , Па	$m_1$	$\delta$ , мкм	$\tau$ , мс	Nu	$K$ , мм <sup>2</sup> /с
1,0	1,0	165	12,0	2,30	1,93
	0,9	150	11,0	2,24	1,80
	0,5	150	15,0	2,24	1,30
	0,5	84	5,5	2,18	1,17
	0,33	175	24,0	2,25	1,13
	0,1	78	7,0	2,18	0,80
	0,002	66	6,0	2,17	0,67
	0,0	120	18,0	2,20	0,72
0,35	1,0	185	26,0	2,66	0,98
	0,9	165	24,0	2,60	0,87
	0,5	165	33,5	2,62	0,62

Примечание.  $m_1$  — весовая доля магния в сплаве,  $p$  — парциальное давление водяного пара в среде (полное давление  $P$  во всех случаях было атмосферным).

Таблица 2

$P \cdot 10^5$ , Па	$m_1$	$\delta$ , мкм	$\tau$ , мс	Nu	$K$ , мм <sup>2</sup> /с
3	0	148	30,5	2,83	0,52
6	0	148	38,5	2,75	0,42
—	0,33	160	22,4	3,10	0,75
—	0,5	150	18,8	2,84	0,85
—	0,9	148	15,7	2,90	0,98
—	1,0	145	13,5	2,72	1,16

гетерогенным (ярко-красные тонкие треки). Горение частиц магния в аналогичных условиях было всегда парофазным.

Анализ продуктов сгорания показал, что в случае парофазного горения металл сгорает полностью, образуя конгломераты частиц окиси, а в отдельных случаях — полые сферы окиси диаметром, в 1,5÷2 раза большим диаметра исходных частиц.

Качественные наблюдения процесса позволяют сделать вывод, что частицы сплава с содержанием магния больше 10% горят преимущественно подобно магнию (парофазно), а с содержанием магния менее 10% — подобно алюминию (гетерогенно).

При обработке опытных данных и определении константы скорости горения (константы Срезневского) учитывалось влияние внешней конвекции на скорость горения частицы [2] введением среднего (для фракции) числа Нуссельта Nu. В соответствии с диффузионной теорией горения выражение для константы Срезневского имеет вид

$$K = 2\delta^2 / \text{Nu} \tau, \quad (1)$$

где  $\delta$  и  $\tau$  — характерные для данной фракции диаметр частиц и наблюдаемое время сгорания соответственно. Число Nu определялось по формуле

$$\text{Nu} = 2 + 0,54 \text{Re}^{1/2}, \quad (2)$$

где Re — среднее для фракции число Рейнольдса, определяемое по известным значениям размеров частиц и измеренным в опыте относительным скоростям движения частиц в газе. Полученные в результате такой обработки значения  $K$ , а также исходные данные приведены в табл. 1.

В опытах при повышенных давлениях было обнаружено некоторое уменьшение скорости горения с ростом давления (см. также [1]), что видно из сравнения данных табл. 1 и 2.

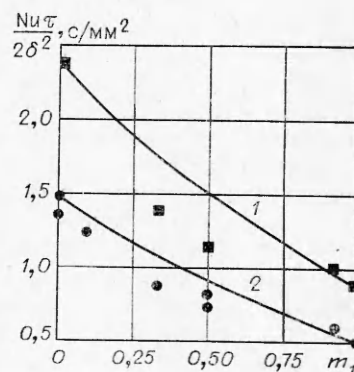
При повышенных давлениях (табл. 2) горение частиц исследовалось в среде чистого водяного пара.

Зависимость приведенной константы скорости горения от давления аппроксимируется выражением:

$$K = K_0 [1 + (P/P_0)^{1/3}]^{-1}, \quad (3)$$

где для алюминия  $K_0 = 5,3$  мм<sup>2</sup>/с,  $P_0 = 2,7 \cdot 10^2$  Па, а для магния  $K_0 = 31,6$  мм<sup>2</sup>/с,  $P_0 = 4$  Па.

Зависимость приведенного времени горения частицы от состава сплава представлена на рисунке (точки). Здесь же представлены результаты расчета (сплошные линии) указанной зависимости. Расчет проводился в квазистационарном приближении с использованием модели приведенной пленки. Считалось, что весь образующийся окисел конденсируется в зоне горения и что выгорание магния и алюминия происходит ста-



Зависимость приведенного времени горения от состава сплава.  
1 —  $p = 6 \cdot 10^5$  Па; 2 —  $p = 10^5$  Па.

дийно. Стадийность процесса выгорания подтверждена более полным расчетом на ЭВМ, в котором учитывалась возможность одновременного испарения компонент при идеальном перемешивании внутри частицы.

В указанных допущениях задача решается аналитически (см., например, [3]), причем время горения частицы  $\tau$  определяется как сумма времени выгорания магния  $\tau_1$  и алюминия  $\tau_2$

$$\tau_1 = \frac{\rho_1 c_{p1} (r_1^2 - r_2^2)}{\text{Nu } \lambda \ln \eta_1}, \quad (4)$$

$$\tau_2 = \frac{\bar{v}_2 \bar{c}_{p2} r_2^2}{\text{Nu } \lambda \ln \eta_2}, \quad (5)$$

где

$$r_2 = r_1 [\rho_R (1 - m_1) / m_1 (\rho_2 - \rho_1) - \rho_1]^{1/3};$$

$$\eta_i = \left[ 1 + n_{\text{ок}f} \frac{q_i}{l_i} + \frac{c_{pi}}{l_i} (T_f - T_{si}) \right] [1 + (\gamma - 1) n_{\text{ок}f}]^{\frac{1}{\beta_i(\gamma-1)}} \times \\ \times \left( 1 + \frac{n_{\text{ок}f}}{\beta_i} \right)^{-1}; \\ i = 1, 2.$$

Здесь  $\lambda$  и  $c_p$  — коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость газа,  $l_i$ ,  $q_i$  и  $c_{pi}$  — теплота испарения, теплота реакции и теплоемкость паров металлов соответственно,  $r_1$  — начальный радиус частицы,  $r_2$  — радиус алюминиевого ядра,  $\beta_i$  и  $\gamma$  — стехиометрические коэффициенты,  $n_{\text{ок}f}$  — содержание окислителя в среде,  $T_f$  — температура среды,  $T_{si}$  — температура кипения металлов.

Для учета зависимости скорости горения от давления вводилась поправка в соответствии с выражением (3), причем эмпирические константы горения для первой стадии принимались такими же, как для магния, а на второй — как для алюминия. Видно, что в этом случае все опытные точки для сплавов лежат ниже расчетных кривых. Это может свидетельствовать, например, о том, что при горении сплава пары магния выносят мельчайшие капли алюминия, вследствие чего эффективная скорость горения оказывается больше расчетной. Возможно, что частица чистого алюминия горит медленнее, чем частица, оставшаяся после выгорания магния из сплава, из-за большей начальной массы окисла на частице. Расчетные формулы (4) и (5) позволяют оценить наибольшую из возможных скоростей горения, что часто наиболее интересно для практики.

Ленинградский политехнический  
институт им. М. И. Калинина

Поступила в редакцию  
4/IV 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Грачухо, Е. С. Озеров, А. А. Юринов. ФГВ, 1971, 7, 2.
2. Л. А. Клячко. ФГВ, 1971, 7, 2.
3. М. А. Гуревич, Е. С. Озеров, Л. С. Рыбина. ФГВ, 1974, 10, 3.