

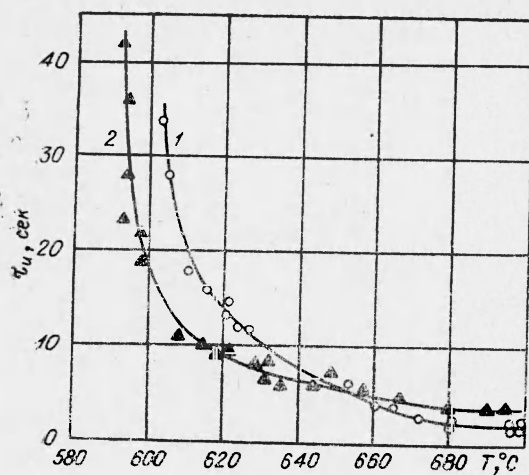


Рис. 2.

частицы магния имеют более высокие пределы воспламенения. Значения предельных температур для смеси кислорода с азотом приведены в табл. 3.

В заключение отметим, что время задержки парофазного воспламенения прессованных образцов уменьшается с ростом температуры среды, причем соответствующие зависимости для образцов разных размеров имеют точки пересечения. На рис. 2 показаны опытные зависимости, полученные для образцов размером 0,57 мм (кривая 1) и 0,8 мм (кривая 2) в воздухе. Очевидно, что такое пересечение неиз-

бежно в тех случаях, когда предел поверхностного воспламенения уменьшается с ростом размера образца.

УДК 536.46+669.729

ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦЫ МАГНИЯ В ВОДЯНОМ ПАРЕ

В. П. Грачухо, Е. С. Озеров, А. А. Юринов

(Ленинград)

При большом числе работ по исследованию горения магния в кислороде практически отсутствуют данные о горении этого металла в среде водяного пара. Последний случай интересен тем, что в зоне горения неизбежно образуется свободный водород, содержание которого влияет на условия переноса тепла и реагентов вблизи частицы. Если учесть, что коэффициент диффузии окислителя в водороде почти на порядок больше, чем в азоте или аргоне, можно ожидать, что присутствие водорода приведет к увеличению скорости подвода окислителя. Однако удельная теплота сгорания металла в водяном паре меньше, чем в кислороде, поэтому скорость горения, зависящая от градиента температур у поверхности частицы, в водяном паре может и уменьшиться.

Существенными с точки зрения механизма горения являются данные о влиянии давления в среде на скорость горения. Как известно [1], для алюминия скорость горения растет с ростом давления — вопреки выводам квазистационарной [2] и нестационарной [3] диффузионным теориям горения. Принимая во внимание различный механизм горения магния и алюминия в кислороде [4], нельзя даже качественно предсказать характер зависимости от давления для скорости горения магния.

Нижеуказанные вопросы обсуждаются на основании данных экспериментального исследования горения магния в смесях водяного пара с азотом при давлениях, больших или равных нормальному.

1. Установка была смонтирована на крышке 1 бомбы и вводилась внутрь последней сверху таким образом, что смотровая щель 4 в керамическом рабочем канале 3 устанавливалась напротив продольного смотрового окна бомбы. Крышка 1 крепилась на бомбе накидной гайкой, уплотнение осуществлялось с помощью резиновой прокладки 2. Сама бомба представляла собой стальной цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 100 мм и высотой 50 мм (рис. 1).

Для создания высокотемпературного потока паров воды использовалась плоскопламенная кислородно-водородная горелка 5, в которую по двум коллекторным полукольцам подводились компоненты горючей смеси: водород и кислород в смеси с азотом. Эти компоненты выходили затем из горелки по расположенным в шахматном порядке узким каналам, смешивались и сгорали вблизи устья горелки в пределах зоны толщиной не более 5 мм. Поскольку зона горения располагалась весьма близко к горелке, последняя охлаждалась проточной водой. Высокотемпературный газовый поток направлялся от горелки вверх по керамическому каналу 3 с внутренним диаметром 18 и длиной 250 мм.

Частица магния выдавалась в поток снизу через центральное отверстие в корпусе горелки с помощью питателя 6 вибрационного типа [5]. Питатель позволял выдавать отдельно одиночные частицы магния с заданной частотой.

Все компоненты горючей смеси, воздух в питатель, а также вода для охлаждения горелки подводились через штуцеры, вваренные в крышку бомбы (см. рис. 1). Через аналогичный штуцер отводились и продукты горения.

Состав смеси и все расходы газов измерялись предварительно градуированными измерительными шайбами. Давление в бомбе устанавливалось и поддерживалось постоянным с помощью вентиля сброса. Для измерения давления использовался манометр мембранного типа. Температура газа измерялась вольфрамрениевой и платина-платина-радиевыми термопарами.

Горючая смесь поджигалась искровым разрядом между двумя электродами из нихромовой проволоки диаметром 1 мм, которые были вмонтированы вблизи устья горелки в стенку керамического канала 3. Высокое напряжение для разряда создавалось с помощью катушки Румкорфа.

Горящие частицы регистрировались на непрерывно протягиваемую фотопленку шириной 35 мм. Скорость фотопленки обычно составляла 0,5 м/сек.

При фотосъемке перед объективом регистрирующего устройства располагался вращающийся диск-обтюратор. Таким образом, на фотопленке трек горящей частицы получался прерывистым и, зная частоту вращения обтюратора, можно было определить время горения частицы.

В качестве испытуемого материала использовался порошок магния, состоящий из сферических частиц диаметром 1—250 мкм. Из исходного порошка было выделено шесть фракций частиц. Каждая фракция характеризовалась средним размером, который определялся как среднее арифметическое для пробы из 300—400 частиц.

Укажем, что для всех фракций квадратичный размер отличался от среднего арифметического не более чем на 8%.

В таблице приведены характеристики всех шести фракций, причем за минимальный и максимальный принимались размеры, соответствующие значениям функций распределения 0,05 и 0,95 соответственно.

После того, как испытуемая фракция сжигалась в заданных условиях, производился подсчет времени горения каждой частицы по полу-

ченным на фотопленке трекам. В результате обработки 300—400 треков определялось среднее время горения, которое приписывалось среднему размеру испытываемой фракции. Однако такое сопоставление допустимо лишь в том случае, если воспламеняются и сгорают все частицы данной фракции.

Для проверки полноты сгорания проводились опыты, в которых сжигались порошки с максимальным размером частиц меньше минимального размера в испытываемой фракции и с минимальным размером

Т а б л и ц а

№ фракции	Размер частиц, мкм		
	минималь- ный	максималь- ный	средний
1	22	40	34
2	37	64	55
3	66	116	90
4	86	133	117
5	102	152	139
6	144	205	184

больше максимального размера частиц той же фракции. Если частицы таких порошков воспламенялись, то считалось, что частицы всех размеров в испытываемой фракции также воспламеняются в данных условиях. Кроме того, в процессе эксперимента производилось улавливание продуктов горения на предметное стекло и последующий качественный химический анализ их с целью обнаружения несгоревших частиц.

Приведенные ниже значения времени горения получены в тех

случаях, когда остатки горевших частиц представляли собой окисел и не содержали металла.

2. Для исследования зависимости времени горения частицы магния от давления опыты производились для фракций со средними размерами частиц 55 и 90 мкм. Обе фракции сжигались в среде, содержащей 0,35 водяного пара и 0,65 азота (концентрации даны в мольных долях). Температура среды в этом случае составляла $1050 \div 1150^\circ \text{C}$. В результате были получены зависимости, представленные графически на рис. 2. Кривая 1 на этом рисунке соответствует более крупной фракции. Видно, что время горения существенно возрастает с ростом давления от 1 до 6 ата и при дальнейшем увеличении давления практически не меняется.

Хотя полученный результат качественно и согласуется с выводом нестационарной диффузионной теории Сполдинга [3], при трактовке данных опыта необходимо иметь в виду ряд особенностей процесса. Это, прежде всего, наличие гомогенной и гетерогенной конденсации паров окисла при различном фазовом состоянии окисла на поверхности частицы (у алюминия — жидкий окисел, у магния — твердый). При нормальном давлении эти особенности приводят, например, к тому, что в кислороде время горения частиц алюминия пропорционально размеру в степени, меньшей 2 ($\sim 1,5$), а для частиц магния — большей 2 ($\sim 2,5$) [4].

На рис. 3 приведены зависимости времени горения от размера частицы при давлениях 11 (1), 6 (2) и 1 (3) ата (35% H_2O , 65% N_2). При нормальном давлении кривая удовлетворительно аппроксимируется зависимостью:

$$\tau_r = 2 \cdot 10^{-5} d^{2,6}, \quad (1)$$

а при давлениях 6 и 11 ата — зависимостью:

$$\tau_r = 4,8 \cdot 10^{-3} d^{1,6}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) время горения получается в миллисекундах, если диаметр частицы взять в микронах. Изменение характера зависимости с ростом давления свидетельствует об изменении механизма горения главным образом в области давлений от 1 до 6 ата.

Для выяснения зависимости времени горения от концентрации водяного пара была проведена серия опытов при нормальном давлении. Испытывались фракции со средним размером 90 мкм. Концентрация водяного пара изменялась от 0,35 до 1,0. Полученная зависимость представлена на рис. 4.

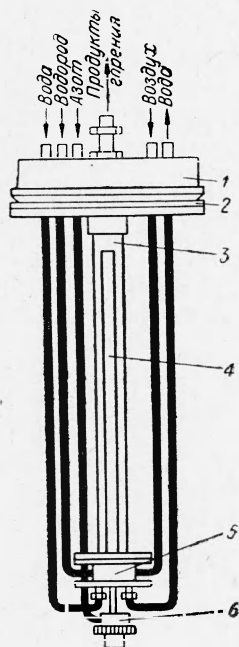


Рис. 1.

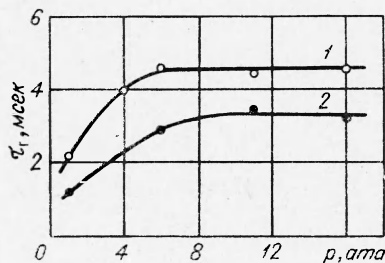


Рис. 2.

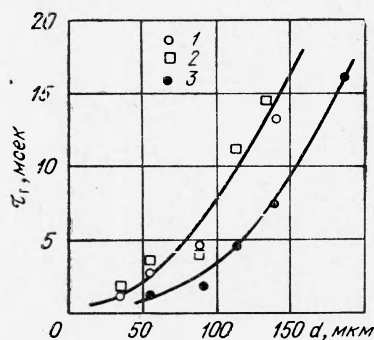


Рис. 3.

Следует отметить одну особенность всех результатов, полученных в настоящей работе: значения константы Срезневского, характеризующей, как известно, скорость горения частицы, оказались весьма высокими. Например, для частицы диаметром 90 мкм при нормальном давлении ее значение равно 4 мм²/сек. Возможно, такое высокое значение этой константы связано со спецификой горения магния в водяном паре. Как уже говорилось выше, в зоне горения в этом случае образуется свободный водород, который может влиять на процессы тепло- и массообмена в области, прилегающей к частице. В этой связи интересен результат следующего опыта. Азот, содержащийся в качестве инертного газа в среде с концентрацией водяного пара 0,35, замещался водородом так, чтобы концентрация пара в среде оставалась неизменной. При нормальном давлении измерялось время горения частиц фракции № 3. Было получено, что даже незначительное содержание в среде избыточного водорода вызывает заметное уменьшение времени горения частицы (рис. 5).

Интересны качественные наблюдения за горением частиц магния. Если в среде отсутствовал избыточный водород, то треки всегда были длинными, широкими и четкими. При добавлении водорода треки становились более узкими и короткими, причем вокруг горящей частицы образовывался широкий светящийся ореол. Можно предположить, что в этом случае зона горения приближалась к поверхности частицы, вследствие чего и возрастала скорость испарения металла.

Аналогичная картина наблюдалась и в случае горения частиц магния в средах, богатых водяным паром. Правда, в этом случае некоторое влияние на скорость горения могла оказать и температура среды. При концентрации пара 100% она достигала 1800 против 1100°С при концентрации 35%.

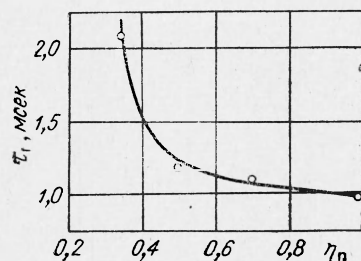


Рис. 4.

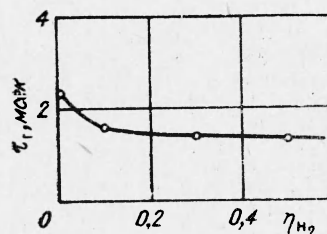


Рис. 5.

В заключение следует отметить, что во всех опытах горение частиц магния было парофазным, треки всегда были очень яркие, белого цвета, ширина их в 2—3 раза превосходила диаметр горящей частицы. Это, безусловно, объясняется тем, что температура среды всегда значительно превышала предельную температуру воспламенения частиц магния испытываемых размеров.

Продукты горения представляли собой конгломераты белой окиси магния различного размера: от 5—10 до 40—50 мкм. Иногда это были полые сферические оболочки, в 2—2,5 раза превышавшие по размеру исходные частицы. Указанные продукты не содержали металла ($p=1$ ата).

Поступила в редакцию
3/VII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, А. И. Коротков. ФГВ, 1968, 4, 3.
2. Г. Ф. Кнорре, К. М. Арефьев и др. Теория топочных процессов. М.—Л., «Энергия», 1966.
3. Д. Б. Сполдинг. ВРТ, 1960, 10.
4. М. А. Гуревич, Е. С. Озеров. Автореф. докл. 2-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Черногловка, 1969.
5. М. А. Гуревич, Г. В. Игнатов и др. ФГВ, 1969, 5, 3.

УДК 536.46+669.722

ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ЛЕГКОКИПАЩЕГО МЕТАЛЛА, ДВИЖУЩЕЙСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ГАЗООБРАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

Л. А. Клячко
(Москва)

В отличие от капель жидкого углеводородного топлива, для которых срыв пламени происходит при сравнительно малых значениях скорости их движения относительно воздуха, пламя, окружающее частицы (капли)