

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. ПМТФ, 1962, 5, 75.
2. Гришин А. М. ПМТФ, 1963, 2, 175.
3. Бостанджиян С. А., Мержанов А. Г., Худяев С. И. Докл. АН СССР, 1965, 163, 1, 133.
4. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.
5. Мержанов А. Г., Столин А. М. Докл. АН СССР, 1971, 198, 6, 1291.
6. Мержанов А. Г., Посецельский А. П., Столин А. М. и др. Докл. АН СССР, 1973, 210, 1, 52.

Поступила в редакцию 10/X 1986,
после доработки — 26/III 1987

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА В КИСЛОРОДЕ

Ю. В. Фролов, А. Н. Пивкина, В. В. Гусельников
(Москва)

Процессы горения металлов давно привлекают внимание исследователей как с научной, так и с практической точки зрения [1—4]. Экспериментальные методы различаются в основном по виду энергии, используемой для нагрева образца: газовые горелки, модельные камеры сгорания, нагрев электрическим током и акустическим ударом, абразивный и лазерный нагревы и т. д. Общая постановка экспериментов во всех случаях практически неизменна: источник нагревает образец (чаще всего — в виде проволоочки) до температуры воспламенения в статистической или динамической агрессивной среде (воздух, кислород и т. п.). Изучаются характеристики воспламенения (температура, давление, критический диаметр образца и т. д.), скорость горения и ее зависимость от «внешних» параметров (давление, диаметр образца и его ориентация в пространстве, состояние поверхности).

В работах [3, 4] собраны данные по исследованию процесса возгорания Fe, Cu, Pb, Zn, Ni, Al, Mo, Co, Ti, Be и ряда других металлов и сплавов на их основе. Установлено, что зависимость температуры воспламенения T_v от давления при $p \leq 150$ атм, как правило, имеет нелинейный характер: при возрастании p T_v снижается, а затем при $p > 150$ атм остается практически неизменной.

В работе [5] экспериментально изучена T_v образцов из жаропрочных сплавов промышленных марок с повышенным содержанием никеля (в кислороде). Получено линейное уменьшение T_v от p (при $p \leq 120$ атм). Образцы нагревались параллельно с нагружением растягивающей силой, приложенной к концам образца. В работе не выяснена причина столь резкого падения T_v при увеличении давления — специфика постановки эксперимента или физико-химическая природа сплава.

В данной работе экспериментально изучаются процессы воспламенения и горения аналогичных жаропрочных сплавов ХН73МВТЮ и ХН67МВТЮ [6] в газообразном кислороде в условиях омического нагрева без приложения растягивающей нагрузки. Образцы в виде проволочек с $d = 1,2 \div 3$ мм, установленные в приборе постоянного давления, нагревались проходящим через них электрическим током промышленной частоты. Температура поверхности образца фиксировалась термомпарами с диаметром спая 100 мкм. Киносъемка велась скоростной камерой ККС-М с частотой кадров 1000—1500 кадр/с. Давление кислорода $p = 1 \div 130$ атм.

В исходном состоянии образец покрыт окисной оболочкой. Время прогрева образца до воспламенения $\tau_{пр}$ регулировалось величиной подаваемого тока, определяющей тепловое состояние образца. В результате исследований выделены характерные картины воспламенения:

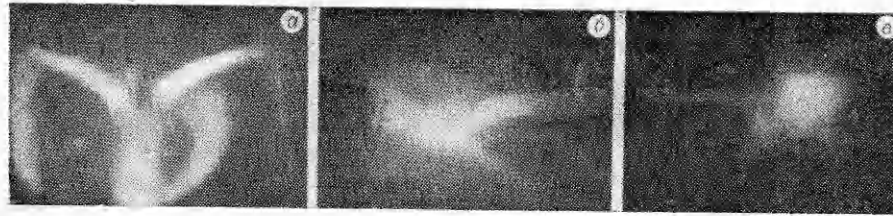


Рис. 1. Воспламенение образцов сплава ХН73МБТЮ в кислороде; $p = 60$ атм.

1) $\tau_{пр} \geq 5$ с. В образце устанавливается стационарное распределение температур, образец пластически деформируется, образуется «шейка», за разрывом окисной оболочки следует воспламенение (рис. 1, а);

2) $2 \leq \tau_{пр} < 5$ с. Стационарное поле температур в образце не успевает установиться, деформируется лишь часть образца, за разрывом окисной оболочки следует воспламенение (рис. 1, б);

3) $\tau_{пр} < 2$ с. Воспламенение происходит без деформирования и носит взрывной характер (рис. 1, в) идентично взрывающимся проволочкам [7]. Воспламенению предшествует интенсивное поверхностное испарение, на кинокадрах видны дымные струйки, являющиеся, по-видимому, продуктами окисления Мо (содержание Мо в сплавах $4 \div 5\%$).

Оксиды Мо легкоплавки и легколетучи ($T_{пл}$ эвтектики MoO_2-MoO_3 $778^\circ C$ [8], $T_{кип}$ MoO_3 $1200^\circ C$). Испарение этих окислов нарушает целостность окисной оболочки, активный металл входит в контакт с окислителем, происходит срыв теплового равновесия. Окисный слой на поверхности образца играет роль механической и тепловой «рубашки», при разрушении слоя при определенных температурах образец воспламеняется.

На рис. 2 в логарифмических координатах представлены зависимости температуры поверхности образцов, при которой происходит воспламенение, от давления кислорода и диаметра образца. При увеличении давления T_b падает. Характер этой зависимости нелинейный, при $p = 60$ атм кривая $T_b(p)$ практически выходит на «плато». Подчеркнем, что сплав воспламеняется при $T_b < T_{пл}$. При увеличении диаметра образца T_b повышается. Подобное изменение $T_b(d)$ характерно для металлов, подчиняющихся линейному закону окисления. С ростом d увеличиваются $\tau_{пр}$, а следовательно, и толщина окисной пленки. В результате срыв теплового равновесия происходит при более высоких температурах. После воспламенения в кислороде начинается процесс самоподдерживающегося горения.

При вертикальном расположении образца после его разрыва верхняя и нижняя части горят с резко различающимися скоростями, поскольку условия прогрева при горении сверху вниз предпочтительнее за счет стекания капли расплава по образцу (рис. 3). Горение носит

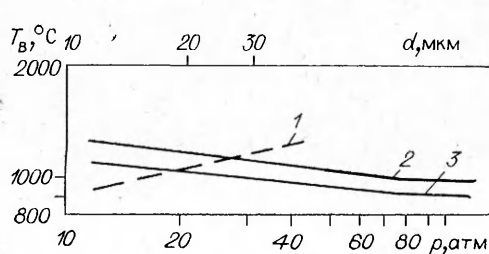


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности образца, при которой происходит воспламенение, от давления и диаметра образца.

1 — ХН67МБТЮ, $p = 100$ атм, $d = 2$ мм, $T_b < T_{пл}$; 2 — ХН73МБТЮ; 3 — ХН67МБТЮ.

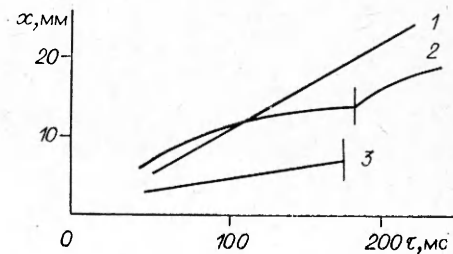


Рис. 3. Зависимость координаты фронта пламени от времени при вертикальном (1, 3) и горизонтальном (2) расположении образца; ХН73МБТЮ, $p = 60$ атм, кислород.

1 — горение сверху вниз, $u = 150$ мм/с; 3 — горение снизу вверх, $u = 30$ мм/с.

пульсирующий характер, происходит накопление капли, затем растекание ее по образцу и отрыв (при горизонтальном расположении проволоочки), последующее накопление и т. д. Средняя величина скорости горения ($60 \div 120$ атм) составляет $100 \div 200$ мм/с.

Фронт горения сплава имеет сложную структуру. Реакция окисления идет как на поверхности капли за счет диффузии окислителя к поверхности горения, так и в паровой фазе, в зоне взаимодействия паров металлов и их летучих субокислов с кислородом. В среднем радиус образующихся капель вдвое превышает исходный радиус образца. Размер зоны интенсивных парофазных реакций и конденсации $\sim 4R_0$.

Таким образом, в условиях омического нагрева без дополнительного механического нагружения температура воспламенения цилиндрических образцов нелинейно падает при увеличении давления до 50 атм, затем практически остается постоянной. Горение образцов в исследованном диапазоне давлений зависит от ориентации образцов в пространстве и протекает в смешанном поверхностно-факельном режиме со скоростями $100 \div 200$ м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом.— М.: Химия, 1974.
2. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
3. Markstein G. H. AIAA J., 1963, 1, 550.
4. Clark A. F., Hust J. G. AIAA J., 1974, 12, 441.
5. Неговоров Л. Я., Прозоров Ю. А., Холин В. Г. Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук, 1968, 1.
6. Масленников Б. С. Жаропрочные стали и сплавы.— М.: Металлургия, 1983.
7. Взрывающиеся проволоочки/Под ред. А. А. Рухадзе.— М.: ИЛ, 1963.
8. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов.— М.: Мир, 1969.

Поступила в редакцию 6/XI 1986,
после доработки— 18/II 1987

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАМЕНИ ГЕКСОГЕНА

*Н. Е. Ермолин, О. П. Коробейничев, Л. В. Куйбида,
В. М. Фомин
(Новосибирск)*

Обзор теоретических результатов по исследованию горения гексогена и его моделированию приведен в [1]. Согласно экспериментальным данным [2], полученным при $p = 5 \cdot 10^4$ Па и ламинарном горении образцов твердого горючего — гексогена, пламя имеет двухзонную структуру. Примыкающая к поверхности горения узкая зона холодного пламени имеет температуру $T \sim 1000$ К. Протяженность ее $\leq 0,1$ мм (оценена по ширине зоны изменения концентрации паров гексогена). За холодной следует светящаяся зона реагирования полупродуктов, образовавшихся в реакции газификации и в узкой зоне. Определяющей в светящейся зоне пламени является реакция между HCN и NO. В [1] для описания химических процессов в светящейся зоне пламени на основе решения уравнений Эйлера выделен кинетический механизм.

Ниже анализируется многостадийный механизм [1], состоящий из двадцати трех компонентов: O, O₂, H, H₂, OH, H₂O, HO₂, N, N₂, NO, NO₂, N₂O, NH, NH₂, HNO, CO, CO₂, CN, HCN, NCO, C₂N₂, HNCO, N₂H и сорока девяти обратимых стадий, приведенных в табл. 1, где $k_{jf} = A_{jf} T^{n_{jf}} \exp(-E_{jf}/RT)$ — константа скорости j -й стадии в прямом направлении. Константы скорости реакций, протекающих в обратном на-