

ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ

М. А. Гуревич, К. И. Лапкина, Е. С. Озеров
(Ленинград)

По опытным данным [1], температура среды, предельная для воспламенения частицы алюминия, практически не зависит от размера частиц ($15 \div 65 \text{ мк}$), слабо уменьшается с ростом содержания кислорода и весьма близка к температуре плавления окисла. Авторы [1] делают вывод, что воспламеняется та частица, температура которой достигла точки плавления окисла (2050°C), а нагрев осуществляется почти исключительно подводом тепла из окружающей среды. В [2] указывалось, что результатам [1] противоречит замечание Гордона [3], в опытах которого «мелкие» частицы алюминия воспламенялись при температуре среды, заметно меньшей температуры плавления окисла. Этот факт может означать, что в действительности зависимость предельной температуры от размера частицы заметно сильнее найденной Фридманом и Мачеком, причем предельная температура может расти с увеличением размера частицы. Такая возможность качественно подтверждается результатами расчетов [2], из которых следует, что зависимость температуры среды на пределе воспламенения от размера частицы имеет минимум, если скорость предпламенного окисления алюминия зависит от температуры и кристаллической структуры окисной пленки.

В [2] для простоты полагалось, что скорость окисления не зависит от толщины окисной пленки.

В настоящей работе более детально изучены пределы воспламенения частиц алюминия.

Метод эксперимента

Для испытания частиц алюминия использовались две установки. В первой — «низкотемпературной» (рис. 1) — предварительно перемешанная газовая смесь нагревалась (не выше, чем 1150°C) в печи 1 с

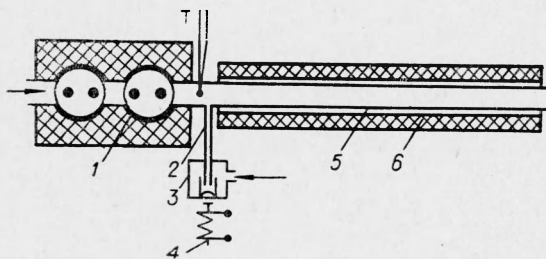


Рис. 1. Низкотемпературная установка.

силитовыми стержнями и двигалась по прозрачной кварцевой трубке 5, заключенной в обогреваемый электрообмоткой шамотный кожух 6. Последний имел продольную смотровую щель для наблюдений за горящими частицами.

Во второй установке (рис. 2) в качестве нагревателя использовалась типовая аргонно-дуговая горелка Т-12. Окислитель и нейтральный газ подмешивались к струе раскаленного аргона за соплом горелки. Нагретая (до $800 \div 2500^\circ\text{C}$) газовая смесь поступала в канал шамотного насадка 2, длина которого выбиралась таким образом, чтобы частицы воспламенялись вблизи его выходного торца. За шамотным насадком газ выходил в прозрачную кварцевую трубку 1, диаметр которой в 3—4 раза превосходил диаметр шамотного

канала. Такое соотношение размеров позволяло достаточно долго работать при высокой температуре газа без кристаллизации кварцевой трубки вблизи ее входного торца.

Частицы вводились в поток с помощью одного из двух питателей. Конструкция первого (см. рис. 1) аналогична предложенной в [1]: проба порошка засыпается в стаканчик, укрепленный на упругой мембране, последняя колеблется под действием вибратора 4 и из образующегося при этом облака часть частиц газом выносится через трубку 2 в нагретый поток. Другой питатель (см. рис. 2, 3) выполнен по схеме, описанной в [4]: порошок укладывается в металлическую чашку, над которой установлены заземленные диафрагмы с малыми отверстиями; при подаче на чашку кратковременного импульса высокого напряжения заряженные частицы летят к диафрагмам, некоторые частицы пролетают через отверстия в них, подхватываются газом и выносятся в нагретый поток.

Предел воспламенения определялся следующим образом. Выбирался такой режим работы установки, при котором было обеспечено воспламенение большинства частиц испытуемой фракции порошка. Затем при неизменном составе (или температуре) среды понижалась температура (или содержание окислителя) до тех пор, пока не переставали появляться горящие частицы. Минимальные значения температуры среды (или содержания окислителя), при которых еще наблюдается видимое горение частиц, считались предельными. Эти температуры относились к наибольшему размеру частиц во фракции, если предел возрастал с уменьшением размера, и к наименьшему размеру, если предел уменьшался с уменьшением размера.

Для определения зависимости предельной температуры от размера вблизи ее минимума использовался следующий прием. В условиях, когда обеспечено воспламенение всех частиц заданной фракции, фотоэлектрическим методом (фотоэлектронный умножитель ФЭУ-19М и осциллограф С1-19) определялось время видимого свечения частиц. Строились интегральные распределения частиц по размерам и значениям этого времени. Значения размера и времени свечения приводились в соответствие друг с другом по равенству указанных функций распределения [5].

Минимальная предельная температура среды заметно меньше температуры в зоне горения частицы, поэтому предполагалось, что малые изменения температуры среды вблизи предела не повлияют на скорость горения и время свечения. Последнее легко было проверить — если были обеспечены условия воспламенения всех частиц фракции, кривая распределения по временам свечения практически не изменялась при повышении температуры на несколько сот градусов.

Если же воспламенялись частицы не всех размеров, то изменяя температуру среды и измеряя время свечения всех горевших частиц, можно было найти зависимость минимального и максимального значений времени свечения от температуры среды. По этим данным строилась зависимость предельной температуры от размера частиц.

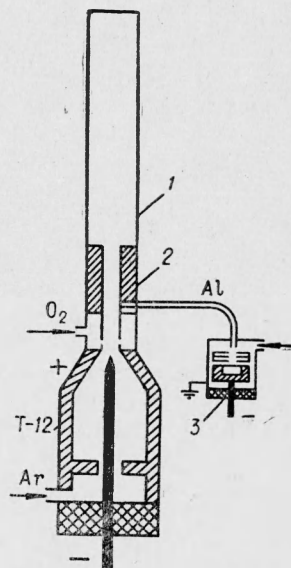


Рис. 2. Высокотемпературная установка.

Температура потока в месте воспламенения измерялась хромель-алюмелевыми (до 1100°С), платина-платинородиевыми (до 1600°С), вольфрам-рениевыми (до 2500°С) термопарами и методом обращения D-дуплета натрия (до 2500°С). Погрешность измерений не превышала 4% от температуры и в пределах этой погрешности результаты, полученные различными методами измерений, совпадали. Проверка показала, что в высокотемпературной установке погрешности, связанные с потерями тепла излучением от спая термопары на холодные стенки, были малы из-за компенсирующего излучения раскаленного катода горелки и светящихся газов. Содержание окислителя в газовой среде определялось по его расходу (кислород и водяной пар) и расходу нейтральных газов, а также отбором проб на газовый анализ (только кислород).

Результаты измерений

Измерения предельных температур проделаны для фракций сферического порошка алюминия с пределами размеров, указанными в таблице. Измерения проведены для смесей кислорода с аргоном и азотом. Результаты измерений нанесены на график рис. 3. Здесь номера кривых соответствуют номерам фракций по таблице. (При расчете использованы значения размеров, близкие к нижним границам фракций.) Тем-

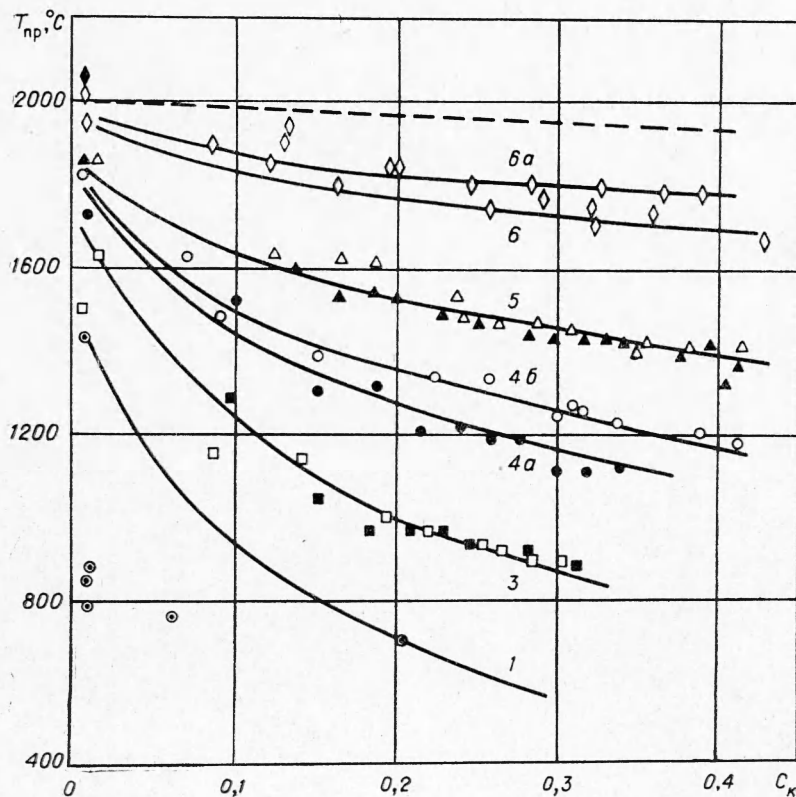


Рис. 3. Пределы воспламенения частиц алюминия в смеси кислорода с аргоном и азотом.
d, мк; 1 — 6; 3 — 11; 4а — 19; 4б — 21½; 5 — 27; 6а — 46; 6б — 40.

Номер фракции	1	2	3	4	5	6
$d, \text{мк}$	0—7	5—10	10—20	20—30	30—40	40—50

ные и светлые точки получены в различных сериях опытов. Сплошные кривые построены по эмпирической формуле

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{пл. ок}} - 0,6 - \frac{C_k^{0,3}}{\lambda} \cdot d \cdot \exp(-0,85 \sqrt{d}). \quad (1)$$

Здесь $T_{\text{пл. ок}}$ — температура плавления окисла (2300°K);

C_k — относительное объемное содержание кислорода в среде;

d — диаметр частицы, мк ;

λ — коэффициент теплопроводности среды $\left(\frac{\text{кал}}{\text{см. сек. град}} \right)$

при температуре $T = \frac{1}{2} T_{\text{пр}} + \frac{1}{2} (T_0 + T_{\text{пл. ок}})$,

где $T_0 = 20^\circ \text{C}$ — начальная температура частицы.

Штриховая линия на рис. 3 — это кривая Фридмана и Мачека для частиц размером 35 мк .

Из рис. 3 видно, что температура среды на пределе воспламенения довольно сильно зависит от размера частиц и содержания кислорода в среде. Для малых размеров и содержания кислорода больше 5% предельная температура заметно ниже температуры плавления окисла.

Фракции 1 и 2 имели одинаковые минимальные пределы воспламенения. Если учесть, что в них содержатся частицы одинакового размера, $5\text{--}7 \text{ мк}$, можно считать, что минимальная из отмеченных температур среды на пределе воспламенения (720°C в воздухе) относится к частицам размером около 6 мк . На рис. 4, 1 по формуле (1) построена зависимость предельной температуры от размера частицы в воздухе. На левой ветви ее нет опытных точек, так как получить их не удалось из-за трудностей проведения опытов со столь малыми частицами.

Надежнее в области минимума найдена аналогичная зависимость (рис. 4, 2) для водяного пара в качестве окислителя.

Укажем в этой связи, что при окислении алюминия в водяном паре гидроокись алюминия переходит в γ -окись примерно при тех же температурах, что и аморфный окисел алюминия.

Таким образом, описанная в [2] схема расчета, учитывающая кристаллизацию пленки окиси при одинаковой зависимости скоростей реакции и кристаллизации от содержания кислорода, хорошо согласуется с опытом и может служить основой для количественных расчетов пределов воспламенения частиц алюминия.

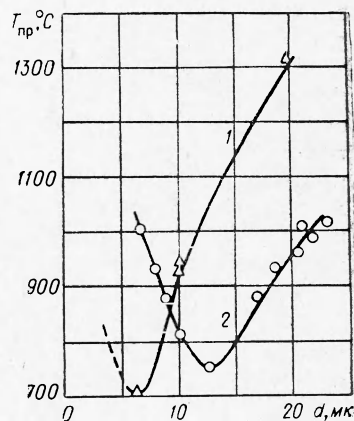


Рис. 4. Пределы воспламенения частиц алюминия в воздухе (1) и водяном паре (2).

Поступила в редакцию
10/VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Friedman, A. Masek. Combustion and Flame, 1962, 6.
2. Т. И. Алексеева, М. А. Гуревич, Е. С. Озеров. Тр. ЛПИ им. М. И. Калинина, № 280, 1967.
3. Д. А. Гордон. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». ИЛ, 1963.
4. H. Shelton, C. D. Hendriks, R. F. Wuerker. Appl. Phys., 1960, 33, 7.
5. М. А. Гуревич, Г. В. Игнатов и др. ФГВ, 1969, 5, 3.

УДК 662.232.1+536.468

О ЗАЖИГАНИИ ПИРОКСИЛИНА

В. Ф. Михеев, С. С. Хлевной
(Новосибирск)

В последнее время выполнена серия экспериментальных работ по зажиганию ряда взрывчатых веществ при различных граничных условиях теплообмена [1—8]. Получены данные для азида бария, пироксилина, поливинилнитрата, нитрокрахмала, нитроглицеринового пороха. Установлено, что наблюдаемые в опытах закономерности могут быть объяснены тепловой теорией, предполагающей развитие экзотермических реакций в прогретом слое конденсированной фазы ВВ в качестве определяющих процесс зажигания.

В связи с этим возникла принципиальная возможность оценивать по данным зажигания эффективные кинетические параметры химических процессов (энергия активации E , произведение теплового эффекта реакции на частотный фактор $Q_1 k_0$) [9], что и было сделано в указанных выше работах. Кинетические параметры для нитроклетчатки, определенные этими методами при высоких температурах, оказались отличающимися от параметров, полученных по результатам прямых измерений методом высокотемпературной импульсной калориметрии [10].

Отличаются они также и от параметров, вычисленных из большого количества экспериментальных данных для широкого интервала температур (от 70 до 300°С) и практически совпадающих с результатами импульсной калориметрии [10]. Поэтому представляет интерес изучить зажигание нитроклетчатки постоянным потоком, обратив особое внимание на строгую контролируемость условий нагрева.

Зажигание нитроклетчатки (пироксилин № 1) исследовалось на графитовой световой установке [5]. Образцы пироксилина (таблетки диаметром 16 и толщиной 4 мм) прессовались до плотности $1,49 \div 1,50 \text{ г/см}^3$ из тщательно просушенного порошка и приклеивались к подставке из оргстекла (диаметр 20, толщина 5 мм). В поверхность образца клеивались две манганин-константановые ленточные микротермопары (толщина $5 \div 6$, ширина $\sim 60 \text{ мк}$). База клейки термопар равнялась $13 \div 14 \text{ мм}$, спай находился примерно на середине базы. К боковой поверхности образца ленточные термоэлектроды приклеивались ацетоном, а после просушки покрывались тонким слоем клея Б-88. Образцы выдерживались в эксикаторе с селикагелем не менее 10 суток. Концы термоэлектродов пропускались затем через сверления в подставке, и после установки в специальном держателе подпаивались к удлинительным проводам. Затем поверхность образца, воспринимаю-