

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

А. А. Раздобрев, А. И. Скорик, Ю. В. Фролов

Вопрос о механизме воспламенения и горения металлов и в первую очередь алюминия и магния не нов [1—8]. Но в то же время нельзя утверждать, что эти процессы изучены с должной последовательностью и определенностью: ни одна из предложенных моделей воспламенения и горения частиц, базирующихся на известных экспериментальных фактах, не объясняет с единых позиций всю гамму качественных и количественных особенностей наблюдаемых процессов. Это обосновывает необходимость постановки более тонких экспериментов и разработку новых совершенных методик исследования как индивидуальных частиц металлов, так и их совокупностей, дающих не только качественную, но и количественную информацию о наблюдаемых явлениях.

В настоящей работе приведены результаты исследований по воспламенению и горению частиц алюминия в атмосфере воздуха, углекислого газа и кислорода, полученные с применением методики [4], в основу которой положен нагрев неподвижных индивидуальных частиц металла с помощью оптического квантового генератора (ОКГ) непрерывного действия.

Общая схема установки показана на рис. 1. Для нагрева частиц (до температуры воспламенения) использован ОКГ на CO_2 с длиной волны 10,6 мкм и мощностью на выходе до 100 Вт. Выходной пучок фокусировался с помощью линзы из хлористого натрия. Сечение пучка излучения в месте расположения частицы превосходило размер последней в 2—2,5 раза, а прошедшая мимо нее часть потока собиралась и фокусировалась сферическим зеркалом на теневую (по отношению к ОКГ) сторону частицы. Такая схема подвода излучения обеспечивает достаточно равномерный разогрев частицы. Затвор-диафрагма, расположенный между ОКГ и линзой, позволял регулировать мощность излучения, падающего на частицу, в пределах от 0,1 до 100 Вт.

Частица исследуемого металла выставлялась на верхнем торце кварцевой иглы и накрывалась стеклянной трубкой с окнами, через которую пропускался газ нужного состава (воздух, кислород, углекислый газ, гелий). Форма исходных частиц была близка к сферической, диаметр изменялся от 230 до 680 мкм. Ошибка при измерении исходного размера частиц в каждом опыте составляет ± 8 мкм, времени — $\pm 0,2$ мс. Каждый опыт повторялся не менее 3 раз.

Регистрация процессов, протекающих при нагревании, воспламенения и последующего горения частиц, велась методом скоростной микрофотосъемки со скоростью 250—500 кадр/с при двух-, восьмикратном увеличении. По результатам киносъемок, помимо анализа качественной картины, определялись время задержки воспламенения, скорость распространения пламени по поверхности и некоторые другие параметры.

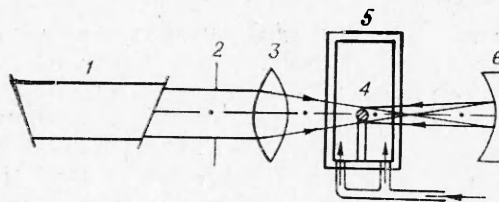


Рис. 1. Экспериментальная установка.

1 — ОКГ; 2 — затвор-диафрагма; 3 — линза из хлористого натрия; 4 — частица алюминия на кварцевой игле; 5 — кварцевая трубка с окнами; 6 — сферическое зеркало.

Экспериментальные результаты

Исследованный характер поведения частиц алюминия с исходным диаметром 400 мкм^1 в атмосфере воздуха, подвергнутых действию потоков излучения ОКГ не превышающих 2 Вт (плотность потока в пятне около 150 Вт/см^2), аналогичен описанному в [1]: по мере нагревания на поверхности частицы образуются микротрещины; через $400\text{—}600 \text{ мс}$ после подачи излучения частица плавится, превращаясь в сферу, матовый ее оттенок сменяется зеркальным блеском; диаметр частицы по сравнению с исходным увеличивается на $5\text{—}7\%$. Более длительный прогрев (до 15 с) не приводит к каким-либо качественным изменениям. Воспламенения в этих условиях не наблюдается.

Увеличение плотности потока излучения интенсифицирует процессы, не меняя качественной картины, описанной выше, а при определенном значении приводит к воспламенению и сгоранию частицы алюминия. Величина плотности потока, начиная с которой происходит воспламенение (критический поток), зависит от размера частицы, состава окружающей среды, геометрии опыта и в условиях описываемых опытов составляет $2\text{—}250 \text{ Вт/см}^2$.

Развитие процессов при действии на частицу металла потоков излучения, превышающих критический, протекает в следующей последовательности.

При подаче излучения ОКГ через $140\text{—}150 \text{ мс}$ частица приобретает практически идеальную сферическую форму с зеркальным блеском. Спустя $170\text{—}180 \text{ мс}$ яркость свечения частицы резко увеличивается, у поверхности появляется ярко светящийся ореол шириной $40\text{—}50 \text{ мкм}$. Это приводит к кажущемуся увеличению размера частицы в $1,3\text{—}1,5$ раза (рис. 2, а). Характерный интервал времени скачка яркости составляет около $5\text{—}7 \text{ мс}$. Через $260\text{—}280 \text{ мс}$ образуется факел пламени в отдельной точке поверхности (рис. 2, б), который распространяется по всей частице (рис. 2, в). Скорость распространения пламени по поверхности частицы составляет $800\text{—}850 \text{ мм/с}$. Завершается распространение пламени по поверхности, как правило, выбросом ярко светящейся частицы произвольной формы.

После воспламенения частицы происходит быстрое расширение пламени по нормали к поверхности и формирование устойчивой слоистой структуры пламени, характеризующейся наличием трех, отличающихся по яркости свечения, зон (рис. 2, г—з). Непосредственно к поверхности частицы примыкает «темная» зона, ширина которой близка к исходному радиусу частицы. За «темной» следует зона яркого свечения (зона «конденсации») с шириной около $350\text{—}450 \text{ мкм}$. Переход от темной зоны к яркому свечению достаточно резкий. Зона «конденсации» постепенно переходит в зону «высвечивания», свечение которой по мере удаления от частицы ослабевает и на расстоянии $2\text{—}2,5 \text{ мм}$ практически не фиксируется на киноплёнке при темпе съемки $4500\text{—}5000 \text{ кадр/с}$. Характерно, что процесс горения частиц алюминия в условиях опыта сопровождается периодическим выбросом в зону пламени «шариков» размером $20\text{—}80 \text{ мкм}$ (см. рис. 2 г—е). Отдельные мелкие (размером $20\text{—}30 \text{ мкм}$) «шарики» после нескольких витаний в зоне горения, как правило, удаляются от поверхности частицы

¹ Прямые наблюдения показали, что картина развития процессов при действии излучения ОКГ на частицы металла качественно одинакова при изменении диаметра частиц от 230 до 680 мкм .

² Здесь и в дальнейшем приведены значения падающих потоков. Коэффициент отражения в опытах не измерялся. Согласно [9, 10] значение коэффициента отражения может составлять от 96 до 50% . Ясно, что подаваемая тепловая энергия на частицу используется (в зависимости еще от многих факторов, например, диаметра частиц) лишь частично.

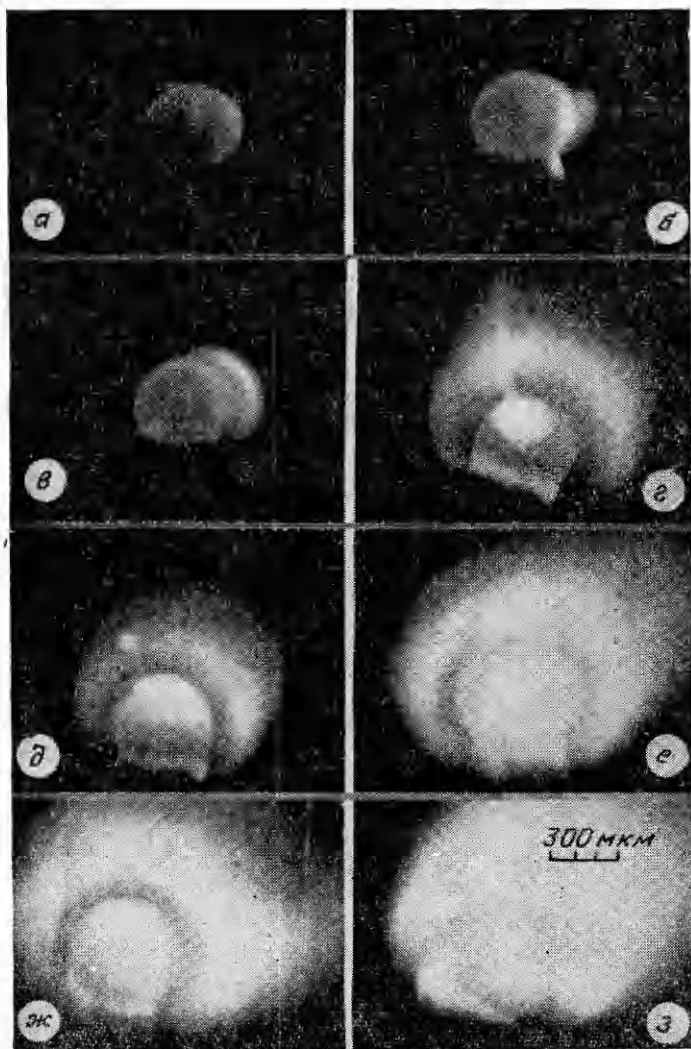


Рис. 2. Качественная картина воспламенения и горения частицы алюминия в воздухе.

и уходят из поля зрения (см. рис. 2, д). В случае выброса нескольких мелких «шариков» (см. рис. 2, е) они могут сливаться в результате столкновения (см. рис. 2, ж). Вновь образовавшийся крупный «шарик» (см. рис. 2, ж, з) совершает колебательные движения, то удаляясь, то приближаясь к поверхности частицы. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается, и «шарик» в конечном итоге оседает на поверхности частицы (см. рис. 2, з). Аналогичная картина наблюдается при выбросе с горячей поверхности крупного «шарика» размером 80 мкм.

В процессе устойчивого горения частицы на ее поверхности периодически появляются островки с повышенной яркостью свечения (см. рис. 2, г—з). Площадь, занимаемая островками, может увеличиваться и достигать одной трети наблюдаемой поверхности полусферы частицы. Значительное увеличение площади островка приводит к его срыву в виде ярко светящейся струи (см. рис. 2, г) или «шарика» (см. рис. 2, д).

Замена воздуха на углекислый газ приводит к незначительному увеличению времени задержки воспламенения (300—310 мс для частиц 400 мкм). Качественная картина воспламенения и горения сохраняется. При нагревании в кислороде процессы настолько интенсифицируются, что при киносъемке кинокамерой СКС-1м с темпом до 5000 кадр/с, кроме времени задержки воспламенения (100—120 мс для частиц с исходным диаметром 400 мкм) других измерений не удается произвести с достаточной степенью точности. Процесс воспламенения и горения фиксируется в виде кратковременной вспышки, сопровождающейся взрывом частицы.

Помимо качественной картины по результатам киносъемки были определены зависимости времени задержки воспламенения частиц алюминия и скорости распространения пламени по поверхности от исходного диаметра частиц: представлены ниже.

| d_0 , мкм | $u \cdot 10^{-3}$, мм/с | τ , мс | d_0 , мкм | $u \cdot 10^{-3}$, мм/с | τ , мс |
|-------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|
| 230 | 3,24 | 100 | 450 | 0,72 | 295 |
| 270 | 2,38 | 180 | 500 | 0,70 | 310 |
| 310 | 1,72 | 230 | 570 | 0,68 | 320 |
| 350 | 1,38 | 256 | 620 | 0,66 | 325 |
| 400 | 0,85 | 270 | 680 | 0,64 | 330 |

Приведенные данные показывают, что увеличение размера частиц приводит к росту времени задержки воспламенения и снижению скорости распространения пламени по поверхности. Отмеченные закономерности наиболее отчетливо проявляются при изменении диаметра частиц от 230 до 400 мкм.

Обсуждение результатов

Образование структурных дефектов на поверхности частицы при нагреве может быть связано, как и в [1], с нарушением целостности окисной пленки, покрывающей частицу, в результате разности термических расширений металла и его окиси. Наиболее вероятной причиной превращения частицы в идеально сферическую и увеличение ее размеров (на 5—7%) на начальных стадиях нагрева является тепловое расширение материала частицы. Определенное из экспериментов увеличение размера частиц удовлетворительно совпадает с расчетными при температуре 660—1000°C. Более значительный кажущийся рост размеров частиц, вероятнее всего, связан с образованием прилегающего к частице светящегося ореола, а не вследствие термического расширения [1] материала частицы. Отмеченное в [1] 30%-ное увеличение размера по сравнению с исходным в экспериментах по исследованию воспламенения и горения частиц алюминия в пламенах газовых горелок, по-видимому, является результатом ошибки измерений в присутствии интенсивно разогретых продуктов сгорания и отраженного излучения.

Среди причин, приводящих к резкому скачку яркости свечения, можно выделить по крайней мере две: растрескивание окисной пленки за счет термических напряжений, связанных с различием (трехкратным) в коэффициенте объемного расширения и реакций между алюминием и его окисью, о возможности протекания которой при нагреве алюминия сообщалось в [8]; расплавленный алюминий и его пары (расчетная температура свыше 1500°C [8]) интенсивно взаимодействуют с кислородом воздуха, что приводит к дальнейшему резкому повышению температуры приповерхностной зоны частицы.

При снижении плотности потока картина меняется. Толщина окисной пленки и, следовательно, ее прочность нарастают со скоро-

стью, соизмеримой со скоростью нарастания механических напряжений, и вероятность ее разрушения снижается. Прямым подтверждением этому могут служить опыты, проведенные авторами с целью изучения влияния толщины окисной пленки на образование дефектов микроструктуры и процессы воспламенения частиц исходных и предварительно окисленных в атмосфере воздуха излучением ОКГ, нагреваемых в атмосфере гелия. Наблюдения показали, что разрушение окисной пленки в первом случае происходит значительно (на 300—350 мс) раньше, чем во втором.

Если повысить плотность облучения до таких значений, чтобы частица могла воспламениться, то трудно предположить, что условия нагрева и структура поверхности окисной пленки были совершенно однородными. В таком случае частица не может воспламениться одновременно по всей поверхности. Экспериментальные результаты показывают, что факел пламени появляется в одной из точек поверхности частицы. Появление пламени, естественно, повышает температуру поверхности частицы (см. рис. 2, в), увеличивает скорость оттока продуктов испарения. Распространяющийся факел уносит с поверхности частицы (бесформенные яркие образования) окисную пленку.

Дальнейшее расширение пламени и образование в результате этого различающихся по яркости зон вокруг горящей частицы соответствуют модели парофазного горения алюминия [7]. С точки зрения этой модели, «темная» приповерхностная зона соответствует области, в которую из-за диффузионных затруднений (при имеющейся скорости и плотности оттока продуктов испарения от поверхности частицы) попадает лишь незначительная доля окислителя. По мере удаления из «темной» зоны взаимное перемешивание окислительной среды и пара алюминия¹ облегчается и уже в зоне «конденсации» очевидны условия, оптимальные для интенсивного взаимодействия и протекания экзотермической реакции, завершающейся в третьей зоне.

Результатом реакций, протекающих при горении частицы алюминия, может быть наличие в факеле пламени яркосветящихся шариков. Причин, вызывающих образование шариков, может быть несколько: выброс массы материала из частицы, слияние множества мелких частичек в факеле пламени, образующегося в результате сноса «островков». Одни субдисперсные частички окиси алюминия выносятся из зоны горения, а другие конденсируются на поверхность частицы, накапливаясь «островками» (коэффициент излучения окиси алюминия выше коэффициента излучения самого металла) и впоследствии выносятся потоком продуктов испарения (яркие струи или отдельные шарики с поверхности частицы). Крупные шарики (40—100 мкм), по видимому, поджимаются продуктами, конденсирующимися на поверхность частицы (образование «островков», см. рис 2, г—д).

Замена окружающей среды (частица в кислороде) приводит к практическому исчезновению «темной» зоны и взрыв является, очевидно, следствием перегрева частицы за счет приблизившейся к ее поверхности высокотемпературной зоны «конденсации». Причины изменения времени воспламенения и скорости распространения пламени по поверхности с ростом исходного размера частиц в данной работе детально не исследовались.

Таким образом, изучение физической картины воспламенения и горения частиц алюминия под действием излучения ОКГ методом высокоскоростной микрокиносъемки показало, что:

¹ В работе [8] показано, что в результате горения частиц алюминия в зоне пламени и на поверхности могут образоваться такие продукты, как AlO , Al_2O и др. Поскольку в настоящих опытах анализ продуктов не производился, то под парами алюминия подразумеваются продукты неполного окисления металла.

воспламенению предшествует разрушение окисной пленки, сопровождающееся резким повышением яркости свечения частицы;

воспламенение происходит на отдельном участке поверхности, от которого пламя распространяется по всей частице со скоростью, зависящей от размера последней;

в пламени горячей частицы отчетливо выражены три зоны, отличающиеся по яркости свечения, появление которых, по-видимому, обусловлено диффузионным механизмом горения;

горение частиц алюминия сопровождается образованием на ее поверхности ярко светящихся «островков», предположительно состоящих из окиси алюминия, и выбросом с поверхности частицы шариков различного размера.

Авторы выражают признательность научным сотрудникам ИОА СО АН СССР М. Ф. Небольсину и В. И. Букатому за помощь при выполнении опытов и научному сотруднику ИХФ АН СССР Б. И. Хайкину за ценные советы и внимание к работе.

*НИИ прикладной математики
и механики при ТГУ*

*Поступила в редакцию
24/II 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
2. Б. М. Злобинский, В. Г. Иоффе, В. Б. Злобинский. Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972.
3. В. В. Недин, О. Д. Нейков и др. Взрывоопасность металлических порошков. Киев, «Наукова думка», 1971.
4. А. А. Раздобреев, В. И. Букатый. Изв. вузов СССР, Физика, 1973, 3.
5. Гетерогенное горение. Сборник. М., «Мир», 1967.
6. J. L. Pringle. J. Electrochim. Soc., 1970, 117, 3, 385.
7. Р. Фридман, А. Мачек.— В сб. Гетерогенное горение. М., «Мир», 1967.
8. М. Я. Ген, Ю. В. Фролов, Т. А. Вербжицкая, В. С. Сторожев.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Азакан, 1973.
9. В. В. Пантелеев, А. А. Янковский. ЖПС, 1965, 3, 350.
10. М. К. Чун, К. Роуз. J. Appl. Phys., 1970, 41, 614.

УДК 536.46

К ВОСПЛАМЕНЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

А. И. Григорьев, И. Д. Григорьева

Вопрос о расчете критических условий воспламенения небольшой частицы металла наиболее подробно и ясно был рассмотрен в работе [1], где предложена система уравнений, описывающих прогрев металла в потоке нагретого окислителя с учетом нарастания на поверхности металла окисной пленки, диффузия окислителя в которой лимитирует весь процесс окисления:

$$\begin{aligned} 1/3(c_{pr} \cdot dT/dt) &= Q_p \cdot dh/dt - \lambda/2r \cdot Nu(T - T_0), \\ dh/dt &= k_n C_{ок}^m / h^n \cdot \exp(-E/RT), \\ \text{при } t=0 \quad T &= T_n; \quad h = h_n, \end{aligned} \quad (1)$$