

Полученное в работе [5] увеличение скорости горения образцов, содержащих в качестве добавки инертные частицы Al_2O_3 , с ростом перегрузок можно объяснить увеличением теплопередачи при образовании ПОС от зоны пламени к поверхности топлива.

Приведенные выше рассуждения с некоторыми ограничениями, видимо, можно применить и к алюминизированным топливам. Следует отметить, что во многих работах отмечалось влияние на увеличение скорости горения с ростом перегрузок самой величины скорости горения в отсутствии массовых сил и размера частиц металла, которые являются основными параметрами для условия возникновения ПОС. Там, где ПОС не мог образоваться, например у быстрогорящих топлив [5], влияние массовых сил не проявилось.

Поступила в редакцию
7/VIII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1967, 3, 3.
2. Б. Б. Серков, Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 4.
3. Б. И. Гончаренко, Б. Т. Ерохин и др. Второй симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черногоровка, 1969.
4. J. B. Anderson, R. E. Reichenbach. AIAA J., 1968, 6, 2.
5. E. J. Sturm and R. E. Reichenbach. AIAA J., 1969, 7, 11.
6. E. J. Sturm and R. E. Reichenbach, AIAA J., 1970, 8, 6.
7. J. Grump. Proceeding of Second J. CRG. Combustion Conference, Aerospace Corp. EL. Segundo, Calif., 1965.
8. G. Northam. Proceeding of the ICTG/AIAA Solid Propulsion Conference, CPIA Publ., 111.
9. Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов. ФГВ, 1972, 8, 4.
10. С. К. Орджоникидзе, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил. Третий симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черногоровка, 1971.
11. С. С. Забродский. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожигенном слое. М., Госэнергоиздат, 1963.
12. В. И. Перельман. Краткий справочник химика. М., Госнаучтехиздат, 1963.
13. В. К. Боболев, А. П. Глазкова и др. ПМТФ, 1964, 3.
14. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
15. Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. Основы техники псевдоожигения. М., «Химия», 1967.
16. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.

УДК 662.612

О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Е. И. Попов, Л. Я. Кашпоров, В. М. Мальцев,
А. Л. Брейтер*
(Москва)

Порошки алюминнево-магниевоы сплавов обладают более высокой, чем порошки алюминния, реакционной способностью, что определяет целесообразность их применения. Для обеспечения эффективного сгорания порошков сплавов необходимо знать механизм и закономерности

процесса горения частиц. Имеющиеся сведения о горении частиц сплавов алюминия с магнием неполны и противоречивы.

Фотографирование горящих частиц сплава, содержащего 50% магния [1], показывает, что его горение протекает в две стадии: вначале быстро горит магний, образуя диффузионное пламя и разрушая частицу, а алюминий рассеивается в виде мелких частиц, которые продолжают гореть более медленно. Спектроскопические исследования [2] показывают, что в начале процесса преобладает горение магния, а по мере его выгорания все более увеличивается доля горящего алюминия. По мнению авторов [3], присутствие в продуктах сгорания двойных окислов, обнаруженное рентгеноструктурным анализом, служит доказательством невозможности постадийного парофазного горения алюминия и магния, поскольку рекомбинация простых окислов алюминия и магния маловероятна. Однако этот аргумент недостаточно убедителен, так как пары обоих окислов в отдельности могут быть ненасыщенными по отношению к их чистым жидкостям, а при смешении паров может начаться конденсация жидкой фазы промежуточного состава, для которой пересыщение больше единицы [4]. Двойной окисел $MgAl_2O_4$ может также образоваться при предпламенном поверхностном окислении, предшествующем парофазному горению [5].

В настоящей работе исследован процесс горения одиночных частиц алюминиево-магниевого сплава при атмосферном давлении. Частицы содержали 5; 10; 20; 50; 70; 90 и 95% магния и приготавливались в виде сфер диаметром от 100 до 600 мкм. Исследуемая частица помещалась на острие вольфрамовой иглы и сжигалась в воздухе или в пламени прессованных смесей перхлората аммония и уротропина, имеющих расчетную температуру 2500, 2700 и 3100° К. Воспламенение частицы при горении в воздухе осуществлялось от миниатюрного силитового стержня, нагреваемого электрическим током. Процесс горения изучался с помощью кино съемки камерами «Конвас» и СКС-1 при увеличении до $\times 10$.

Полученные фотографии горящих частиц позволяют установить последовательность и продолжительность стадий горения и особенности горения в течение всего процесса. Важнейшей особенностью горения частиц алюминиево-магниевого сплава является двухстадийность процесса (рис. 1, а). На первой стадии частица окружена совокупностью факелов, образующих неоднородную зону свечения продуктов реакции. Сравнивая характер и размеры зоны свечения, окружающей частицу алюминиево-магниевого сплава на первой стадии горения, с характером и размерами светящейся зоны вокруг горящей частицы магния (рис. 1, б) и с фотографиями и описаниями процесса горения магния, выполненными другими авторами [6—10], можно заключить, что на этой стадии из частицы выгорает в основном магний.

Характерными чертами первой стадии горения являются неоднородность пламени, состоящего из отдельных факелов, и постоянство разме-

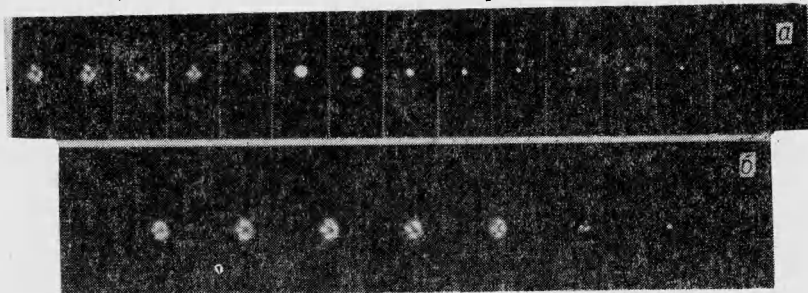


Рис. 1. Горение металлических частиц в воздухе.
а) сплав 30% алюминия+70% магния; б) магний.

ров частицы и зоны пламени, сохраняющееся в продолжение почти всей стадии. Сохранение неизменных размеров частицы и зоны пламени позволяет предположить, что жидкая капля сплава заключена внутри твердой окисной оболочки, которая образовалась в результате окисления, предшествовавшего воспламенению и протекавшего в соответствии с поверхностным механизмом. Это исключает также возможность того, что контролирующей стадией процесса является диффузия магния из капли к ее поверхности, так как в этом случае зона свечения с течением времени должна уменьшаться. Неоднородность зоны пламени подразумевает и неоднородность окисной пленки. Через дефекты окисной пленки (трещины, поры) происходит истечение магния, приводящее к его взаимодействию с кислородом воздуха в факелах парофазного диффузионного пламени.

Невысокое диффузионное сопротивление окисной пленки на частицах алюминиево-магниевых сплавов объясняется тем, что в пленке преобладает окись магния [3, 11-12], обладающая слабыми защитными свойствами. В конце первой стадии горения интенсивность свечения резко уменьшается. Это подтверждает, что существенного выгорания алюминия во время первой стадии не происходит. В это же время, при окончании выгорания магния, увеличивается протекание гетерогенных реакций, о чем свидетельствует появление очагов яркого свечения на поверхности частицы. Тепло, выделяющееся при гетерогенных реакциях, способствует нагреву частицы до температуры плавления окисла и началу второй стадии горения.

Зона свечения вокруг частицы на второй стадии ее горения является однородной, более яркой и уменьшается в размерах по мере выгорания металла. Однородность и сферичность зоны пламени показывают, что окисная пленка на поверхности частицы однородна и, по-видимому, расплавлена. Диффузия металла через пленку обеспечивается низким диффузионным сопротивлением жидкого окисла. Возможно также, что на этой стадии горения окисная пленка на поверхности частицы отсутствует, как это предполагается в работе [13] при исследовании горения алюминия. Размер зоны пламени значительно превышает размер частицы, что говорит о горении металла в паровой фазе. Сравнение характера второй стадии горения с известной картиной горения алюминия [1, 7-10, 13, 14] показывает большое сходство, что подтверждает горение алюминия на этой стадии процесса.

По мере выгорания металла происходит уменьшение размеров пламени, а следовательно, и горящей капли, поскольку окисная оболочка продолжает оставаться в расплавленном состоянии.

Двухстадийный непрерывный характер горения присущ алюминиево-магниевым сплавам, горящим в воздухе, при содержании в них не менее 30% магния. При меньшем содержании магния двухстадийность процесса сохраняется, причем характер обеих стадий не изменяется, но переход от первой стадии ко второй происходит по-иному. В этом случае в конце первой стадии зона свечения уменьшается до размера самой частицы, процесс парофазного горения прекращается и выгорание алюминия происходит только после повторного воспламенения частицы.

Частицы, которые повторно не воспламеняются, представляют собой полые пористые окисные оболочки, содержащие внутри капли несгоревшего алюминия.

Таким образом, изменение размеров зоны свечения во времени является сложным. На рис. 2 показана величина отношения радиуса зоны свечения r_c к начальному радиусу частицы r_0 для сплавов, горящих в соответствии с двухстадийным непрерывным механизмом, в течение всего процесса горения (по оси абсцисс отложено относительное время горения θ). При воспламенении частицы величина r_c/r_0 быстро достига-

ет максимального значения (участок *ab*). Далее, в основной части длительности первой стадии горения отношение r_c/r_0 остается постоянным (участок *бв*), затем уменьшается, проходит через минимум в точке *г*, затем с началом второй стадии это отношение несколько возрастает (участок *гд*) и, наконец, монотонно уменьшается до конечной величины (участок *де*). Для сплавов, содержащих менее 30% магния, характер эволюции отношения r_c/r_0 , показанный на рис. 2, в основном сохраняется, однако появляется значительная неопределенность момента перехода от одной стадии к другой.

Как видно из рис. 2, величина r_c/r_0 увеличивается с повышением содержания в сплаве магния. Это показывает, что стадийность процесса горения нельзя объяснить инкапсуляцией алюминия магнием, возможность которой предполагается ограниченной взаимной растворимостью компонентов сплава. В этом случае величина отношения не должна зависеть от соотношения компонентов.

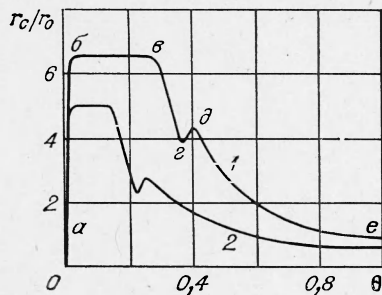


Рис. 2. Зависимость отношения радиуса зоны свечения частицы к радиусу исходной частицы от времени.

1 — сплав 30% алюминия+70% магния;
2 — сплав 50% алюминия+50% магния.

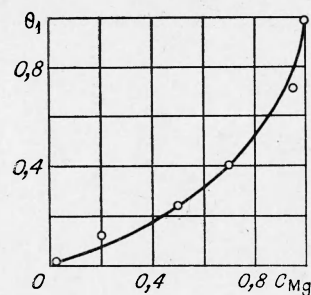


Рис. 3. Зависимость относительной продолжительности первой стадии горения от состава алюминиево-магниевых сплавов.

Из сравнения кривых 1 и 2 рис. 2 и из рис. 3 следует, что при обогащении сплава магнием увеличивается продолжительность первой стадии процесса горения. Эта зависимость практически одинакова для частиц всех исследованных размеров, что можно объяснить при помощи следующего рассуждения.

Полное время горения частицы сплава τ складывается из времени горения магния τ_1 и времени горения алюминия τ_2 . Согласно большинству экспериментальных данных, время горения частиц магния пропорционально диаметру частицы в степени в среднем 2,0 [9, 15, 16], а алюминия — в степени 1,8 [9, 13, 17—20]. Тогда

$$\theta = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \frac{k_1 (d_0^2 - d^2)}{k_1 (d_0^2 - d^2) + k_2 d^{1,8}},$$

где d_0 — начальный диаметр частицы; d — диаметр частицы перед началом второй стадии; k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности. Величины d_0 и d связаны соотношением

$$\frac{d_0}{d} = \sqrt[3]{\frac{x}{1-x} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} + 1},$$

где x — доля магния в сплаве; ρ_1 и ρ_2 — плотности соответственно магния и алюминия. Величины x , ρ_1 и ρ_2 для каждого сплава постоянны, поэтому $d = kd_0$. Тогда

$$\theta = \frac{k_1 (1 - k^2)}{k_1 (1 - k^2) + k_2 k^{1,8} d_0^{-0,2}},$$

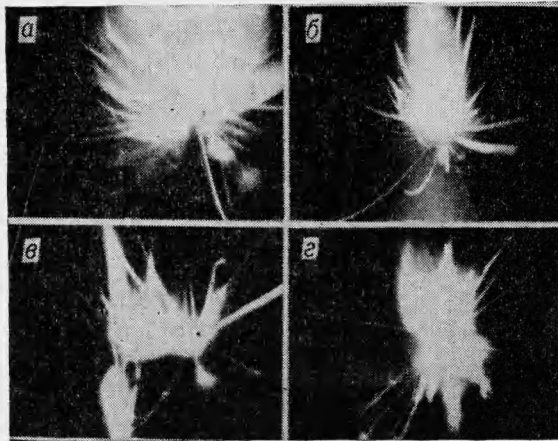


Рис. 4. Дробление металлических частиц в окислительном пламени (температура 2700° К).
 а) алюминий; б) сплав 95% алюминия+5% магния; в) сплав 90% алюминия+10% магния; г) сплав 80% алюминия+20% магния.

характерно для частиц всех составов (рис. 4). В результате взрыва образуется значительная по размерам зона свечения, что является признаком преобладания парофазного горения. Фотографии горячей частицы перед дроблением (рис. 5) показывают, что на всей поверхности окисной оболочки протекают гетерогенные реакции. За счет тепла гетерогенных реакций происходит бурное испарение металла, способствующее разрыву окисной оболочки и разбрызгиванию испарившейся капли. По мнению автора работы [21], дробление частиц алюминиево-магниевых сплавов вызывается очень большой разностью температур кипения магния и алюминия, вследствие чего кипение магния при нахождении частицы в зоне высоких температур носит взрывной характер и приводит к дроблению оставшегося алюминия.

Дробление частиц происходит во всех трех пламенах (рис. 6), следовательно, уже при температуре 2500° К создаются благоприятные условия для процесса взрывного горения, что вполне естественно, так как эта температура превышает температуру кипения обоих компонентов.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Горение частиц алюминиево-магниевых сплавов в воздухе протекает в две стадии, на первой из которых выгорает в основном магний, а на второй — алюминий. При содержании в сплаве магния не менее 30% процесс горения не прерывается, а при меньшем — возникает разрыв между стадиями.

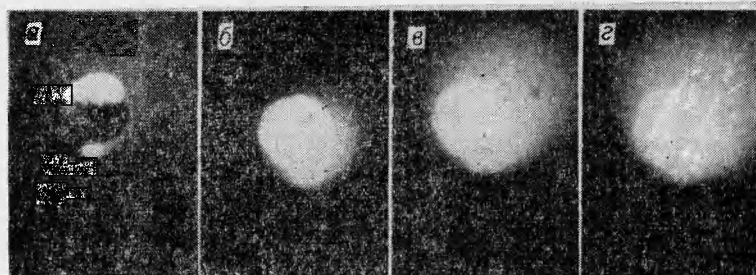


Рис. 5. Начальная стадия горения частицы сплава 95% алюминия+5% магния в окислительном пламени (температура 2700° К).

откуда видно, что относительное время выгорания магния из частицы сплава, горящей в соответствии с двухстадийным механизмом, должно лишь весьма слабо зависеть от начального диаметра частицы, что и подтвердилось экспериментально.

Процесс горения частиц сплавов существенно зависит от характеристик окружающей среды. Горение в окислительных средах, создаваемых горящими смесями перхлората аммония и уротропина, как правило, происходит со взрывом (дроблением). Наличие взрыва ха-

2. Горение и магния, и алюминия происходит в основном в паровой фазе. При горении магния окисная оболочка на частице является неплотной, но твердой, и магний диффундирует через дефекты пленки, что приводит к образованию неоднородного пламени, состоящего из отдельных факелов; размер светящейся зоны в течение этой стадии не изменяется. При горении алюминия пленка окисла находится в жидком состоянии или отсутствует и пламя является сферическим и однородным; размер зоны горения уменьшается по мере выгорания частицы.



Рис. 6. Дробление частиц сплава 95% алюминия + 5% магния в окислительных пламенах с различной температурой, °К.
а) 2500; б) 2700; в) 3100.

3. При повышении содержания магния в сплаве увеличивается размер стационарной зоны горения и продолжительность первой стадии процесса горения.

4. При повышении температуры окружающей среды горение частиц алюминиево-магниевых сплавов сопровождается дроблением частиц.

Поступила в редакцию
24/Х 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Гордон. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». М., ИЛ, 1963, стр. 175.
2. Э. М. Храковская, Л. П. Латонина. Сб. «Вопросы испарения горения и газовой динамики дисперсных систем (Материалы 4-й и 5-й Всесоюзных научных конференций)». Киев, «Наукова думка», 1967, стр. 11.
3. В. М. Фейсел, К. А. Папп, Д. Л. Хильдебранд, Р. П. Сернка. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». М., ИЛ, 1963, стр. 181.
4. М. Н. Чесноков, В. А. Федосеев. Матер. 9-й республ. межвуз. конф. по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, 1969, стр. 55.
5. А. Л. Брейтер, Л. Я. Кашпоров, В. М. Мальцев и др. ФГВ, 1971, 7, 2, 222.
6. Н. М. Cassel, J. Liebman. Combustion and flame, 1962, 6, 3, 153.
7. Дж. Г. Маркштейн. Ракетная техника и космонавтика, 163, 1, 3, 3.
8. Т. Бржустовский, И. Глассмен. Сб. «Гетерогенное горение». М., «Мир», 1967, стр. 126.
9. М. А. Гуревич, Е. С. Озеров. Матер. Второго Всесоюзн. симп. по горению и взрыву. Черногловка, 1969, стр. 70.
10. В. А. Федосеев. Сб. «Физика аэродисперсных систем». Вып. 3. Киев, Изд-во Киевского ун-та, 1970, стр. 61.
11. М. В. Мальцев, Ю. Д. Чистяков, М. И. Цыпин. Докл. АН СССР, 1954, 99, 5, 813; Изв. АН СССР, сер. физ., 1956, 20, 7, 824.
12. М. П. Қирьянова, М. Н. Чесноков. Сб. «Физика аэродисперсных систем». Вып. 1. Киев, «Наукова думка», 1969, стр. 126.
13. R. P. Wilson, F. A. Williams. 13-th Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh, 1971, p. 833.
14. А. Мачек, Р. Фридман, Дж. Семпл. Сб. «Гетерогенное горение». М., «Мир», 1967, стр. 21.
15. N. S. Cohen. AIAA Paper, 1968, 96, 1.
16. Г. К. Ежовский, А. С. Мачалова, Е. С. Озеров, А. А. Юринов. Материалы Третьего Всесоюзн. симп. по горению и взрыву. Черногловка, 1971, стр. 110.
17. A. Davis. Combustion and flame. 1963, 7, 4, 359.

18. Д. К. Кюл. Ракетная техника и космонавтика, 1965, 3, 12, 83.
 19. А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, А. И. Коротков. ФГВ, 1968, 4, 3, 323.
 20. А. Мачек. Вопросы ракетной техники, 1968, 12, 22.
 21. П. Блэкмен, Д. К. Кюл. Ракетная техника, 1961, 31, 9, 104.

УДК 622.615

ОДНОЗНАЧНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БАЛЛИСТИТНОГО ПОРОХА ОТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

А. А. Зенин, Б. В. Новожилов
 (Москва)

Температура поверхности горящего пороха T_n является важной характеристикой процессов, происходящих в реакционном слое (РС) конденсированной фазы (к-фазы). В общем случае T_n зависит от начальной температуры пороха T_0 и давления p . В свою очередь параметры T_0 и p определяют скорость горения пороха u . Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные для баллиститного пороха Н [1—4] позволяют показать, что для него может существовать однозначная, т. е. не зависящая от других параметров (например, от давления), связь $T_n = F(u)$.

Известно, что две функции $u = f(p, T_0)$ и $T_n = \Psi(p, T_0)$ называются зависимыми одна от другой, если для каждой точки (p, T_0) имеет место тождество $\Psi(p, T_0) \equiv F[f(p, T_0)]$, т. е. одна из функций может быть представлена через другую — $T_n = F(u)$. Аналитический признак зависимости f и Ψ состоит в том, что якобиан

$$I = \frac{D(f, \Psi)}{D(p, T_0)}$$

должен обращаться тождественно в нуль. Полученные в работах [1—4] экспериментальные данные позволяют построить функции f и Ψ и найти значения производных, получаемых после раскрытия якобианов, для режимов $p = 1$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$ и $p = 20$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

Очевидно, если значения I будут отличаться от нуля меньше, чем на ошибку вычисления ΔI , то вполне возможно, что якобиан I равен нулю. Для $p = 1$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$ получаем: $I = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_{T_0} \left(\frac{\partial T_n}{\partial T_0}\right)_p - \left(\frac{\partial u}{\partial T_0}\right)_p \times \left(\frac{\partial T_n}{\partial p}\right)_{T_0} = (0,03 \cdot 0,4 - 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 13) = 1,6 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм, причем вероятная ошибка вычисления ΔI составляет $\pm 3,5 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм. Аналогично для $p = 20$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$ получим: $I = (0,014 \cdot 0,6 - 1,85 \cdot 10^{-3} \cdot 3,6) = 1,7 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм, вероятная же ошибка вычисления составляет в этом случае $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм.

Таким образом, с точностью до ошибки экспериментов якобианы указанных режимов равны нулю и для пороха Н может существовать однозначная зависимость $T_n = F(u)$. В существовании этой зависимости можно убедиться и непосредственно, если нанести все данные по температуре поверхности пороха Н на график $T_n = F(u)$. На рис. 1 приведены средние значения T_n для трех режимов горения.

Температура поверхности баллиститного пороха Н определяется лишь скоростью горения, независимо от того, каким способом эта ско-