

Выводы

1. С ростом перегрузок увеличивается скорость горения и масса шлаковых остатков, причем более быстрогорящие составы обладают меньшей чувствительностью к перегрузкам.

2. С увеличением длины образца масса шлака увеличивается, а средняя скорость горения уменьшается.

3. Теоретическая модель горения алюминизированных систем при перегрузках хорошо согласуется с данными наших экспериментов и данными других авторов.

4. Теоретически предсказаны максимальное и минимальное увеличение скорости горения и продолжительность переходного режима в зависимости от величины перегрузок и характеристик системы, а также размер уносимых с поверхности горения частиц и масса шлака в стационарном режиме горения.

Поступила в редакцию
6/IV 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. C. T. Crowe, P. G. Willoughby. AIAA Preprint, № 66—523, AIAA 4-th Aerospace Sciences Meeting June 27—29, 1966.
2. R. L. Glick, B. K. Hodge, L. H. Caveny. AIAA Preprint, № 67—470, AIAA 3-rd Propulsion Joint Specialist Conf., July, 17—21, 1967.
3. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1967, 3, 3, стр. 323.
4. M. H. Lucy. J. Spacecraft and Rocket, 1968, 5, 2, 271.
5. I. B. Anderson, R. E. Reichenbach. AIAA, 1968, 6, 2, p. 271.
6. Б. В. Серков, Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 4, 600.
7. Виллугби, Кроув, Бейкер. Вопросы ракетной техники, 1969, 7, 28.
8. G. V. Northam, M. H. Lucy. J. Spacecraft and Rocket, 1969, 6, 4.
9. Б. И. Гончаренко, Б. Т. Ерохин и др. 2-й Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву, 1969, стр. 67.
10. E. I. Sturm, R. E. Reichenbach. AIAA, 1969, 1, 11, 2087.
11. G. V. Northam. AIAA Paper, № 70—126, January, 19—21, 1970, AIAA 8-th Aerospace Sciences Meeting.
12. А. С. Уралов. Дипломная работа. МИФИ — ИХФ АН СССР, февраль, 1970.
13. M. J. Bulman, D. W. Netser. AIAA, 1970, 8, 6, 1155.
14. В. Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959.

УДК 536.46+662.222

СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕВЫХ СИСТЕМ

*В. С. Никифоров, Н. Н. Бахман,
Т. Н. Крук, Ф. П. Мадякин
(Москва)*

В работах [1—3] было исследовано влияние добавок порошков алюминия, магния, бора и др. на скорость горения модельных смесей на основе перхлората аммония (ПХА) и перхлората калия (ПХК). Было показано, что действие добавок металлов определяется прежде

всего размером частиц металла. Мелкодисперсные порошки металлов могут в зависимости от природы металла существенно увеличивать скорость горения, а крупнодисперсные лишь снижать.

В данной работе на примере модельных смесей ПХК + полистирол (ПС) и ПХК+ПС подробно изучено влияние процента добавки мелкодисперсного и относительно крупнодисперсного алюминия. Изучено также влияние соотношения между окислителем и ПС на эффективность действия добавки алюминия.

Были использованы порошкообразные компоненты с эффективным размером \bar{d} частиц¹, равным для ПХА и ПХК ~ 10 мк, а для ПС ~ 5 мк. Использовался мелкодисперсный алюминий марки ПАК-4 (с чешуйчатой формой частиц; $\bar{d} \simeq 3$ мк) и относительно крупнодисперсный алюминий со сферической формой частиц; $\bar{d} \simeq 20$ мк.

Соотношение между окислителем и полистиролом обозначим величиной $\alpha_0 = \frac{m_{ок}/m_{г}}{(m_{ок}/m_{г})_{стех}}$. Алюминий вводился при постоянном α_0 , т. е.

тройная смесь рассчитывалась по принципу $(100-x)$ % смесь (окислитель+ПС, α_0) + x % алюминия.

Приготовленные смеси запрессовывались в цилиндрические латунные стаканчики. Полученные заряды сжигались в бомбе постоянного давления при $p=40$ атм. Измерялась средняя скорость горения $\bar{u} = h/\tau$, где h — высота заряда, а τ — время горения, измеряемое с помощью пьезокварцевого датчика давления. $Z = u_{Al}/u_0$ — эффективность действия алюминия, где u_{Al} и u_0 — скорости горения составов с алюминием и без него.

Влияние процента добавки алюминия. Интересно прежде всего отметить (рис. 1), что при увеличении процента алюминия от 0 до 5—8% скорость горения смесей ПХА+ПС остается практически постоянной, а для смеси с $\alpha_0=0,5$ даже наблюдается некоторое снижение скорости горения. По мере дальнейшего увеличения процента алюминия скорость горения начинает быстро расти. Наиболее быстрый рост наблюдается при избытке окислителя в исходном составе ($\alpha_0=2,1$). При содержании алюминия свыше 23% и состава с $\alpha_0=2,1$ становится выше скорости горения состава с $\alpha_0=0,5$. Для смеси с большим процентом ПС ($\alpha_0=0,15$) рост скорости горения по мере введения металла замедляется при большем проценте содержания алюминия.

Максимум скорости горения (по проценту алюминия) в опытах со смесями ПХА+ПС+ПАК-4 не был достигнут; можно лишь утверждать, что он лежит при содержании алюминия $\geq 25\%$.

Кроме скорости горения рассмотрим зависимость эффективности действия алюминия от процента его добавки. Из рис. 2 следует, что эффективность алюминия максимальна для состава $\alpha_0=2,1$. Однако Al эффективен и в составе с большим избытком ПС ($\alpha_0=0,15$), что связано с низкой скоростью горения исходного (без алюминия) состава с $\alpha_0=0,15$, равной 2,9 мм/сек.

Рассмотрим результаты опытов по влиянию добавок крупнодисперсного алюминия на скорость горения смесей ПХА+ПС. Характер кривых u (Al%) (рис. 3) совершенно иной, чем в случае мелкодисперсного алюминия. Так, для состава $\alpha_0=0,5$ скорость горения снижается по мере увеличения алюминия, для состава с $\alpha_0=1$ остается практически постоянной и лишь для состава с $\alpha_0=2,1$ — возрастает, но су-

¹ Размер частиц вычислялся по величине удельной поверхности, измеренной на приборе ПСХ-4.

щественно менее круто по сравнению с аналогичной кривой для мелкодисперсного алюминия (см. рис. 1).

Рассмотрим также влияние добавок мелкодисперсного и крупнодисперсного алюминия на горение смесей ПХК+ПС. Данные по скорости горения смесей ПХК+ПС+Al показаны на рис. 4.

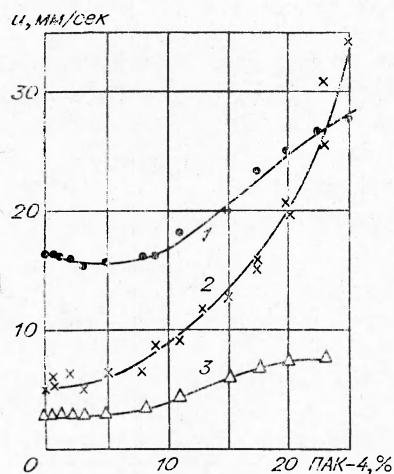


Рис. 1. Зависимость скорости горения смеси ПХА+ПС+ПАК-4 от процента алюминия в ней при различном соотношении компонентов в исходной двойной смеси ПХА+ПС; $p=40$ атм.
1 — $\alpha_0=0,5$; 2 — $\alpha_0=2,1$; 3 — $\alpha_0=0,15$.

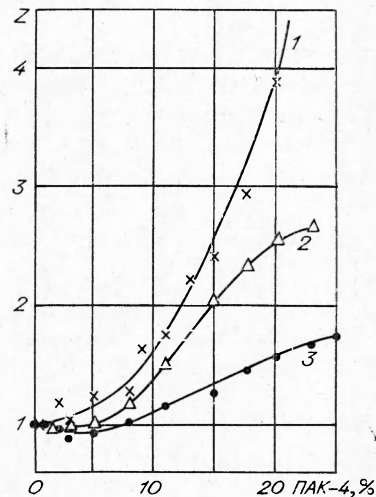


Рис. 2. Зависимость эффективности действия алюминия Z на состав ПХА+ПС от процента алюминия в смеси при различном соотношении компонентов; $p=40$ атм.
1 — $\alpha_0=2,1$; 2 — $\alpha_0=0,15$; 3 — $\alpha_0=0,5$.

При введении мелкодисперсного алюминия скорость горения существенно растет, особенно резко для состава с $\alpha_0=2$. Скорость горения для состава с $\alpha_0=2$ становится выше, чем для состава с $\alpha_0=0,5$ уже при содержании алюминия $\sim 10\%$. При введении крупнодисперсного алюминия скорость горения составов на основе ПХК снижается

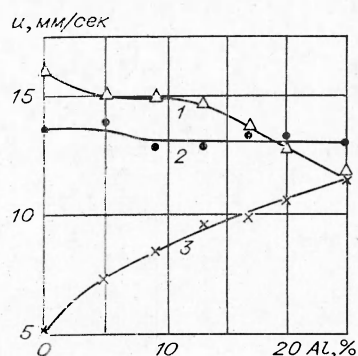


Рис. 3. Зависимость скорости горения состава ПХА+ПС+Al (20 мк) от процента алюминия в смеси при различном соотношении компонентов в исходной двойной смеси ПХА+ПС; $p=40$ атм.
1 — $\alpha_0=0,5$; 2 — $\alpha_0=1,0$; 3 — $\alpha_0=2,1$.

как при $\alpha_0=0,5$, так и при $\alpha_0=2$. Нужно, однако, отметить, что для двойной смеси ПХА+ПС с $\alpha_0=2,1$ ($u_0=5,2$ мм/сек) была гораздо ниже, чем для двойной смеси ПХА+ПС с $\alpha_0=2$, ($u=11,0$ мм/сек).

Влияние соотношения между окислителем и органическим горючим. В предыдущем разделе была подробно рассмотрена зависимость скорости горения величины Z от процента добавки алюминия при трех значениях α_0 . Для смеси 80% (ПХА+ПС) + 20% Al была подробно изучена зависимость скорости горения и величины Z от α_0 (рис. 5).

Для двойных смесей ПХА+ПС и ПХК+ПС максимум скорости горения лежит при существенном избытке полистирола ($\alpha_0=0,5$) [4]. При введении 20% мелкодисперсного алюминия кривая u (ПХА, %) поднимается вверх и сдвигается в сторону

большого содержания окислителя. Если же вводится 20% крупнодисперсного алюминия, то максимум на кривой u (ПХА, %) также сдвигается в сторону большего содержания окислителя, однако увеличение скорости горения наблюдается лишь при содержании ПХА в исходной смеси $\geq 90\%$, а при избытке ПС крупнодисперсный алюминий лишь снижает скорость горения.

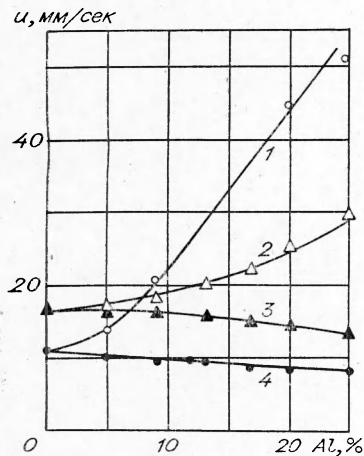


Рис. 4. Зависимость скорости горения состава ПХК+ПС+Al от процента алюминия в смеси при различном соотношении компонентов в исходной двойной смеси ПХК+ПС и различной дисперсности алюминия; $p=40$ атм.

1 - $\alpha_0=2$; $d_{Al} \sim 3$ мк; 2 - $\alpha_0=0,5$; $d_{Al} \sim 3$ мк; 3 - $\alpha_0=0,5$; $d_{Al} \sim 20$ мк; 4 - $\alpha_0=2$; $d_{Al} \sim 20$ мк.

Первый фактор приводит к снижению скорости горения, второй — к ее увеличению. Конкуренция теплоотвода и теплоприхода и определяет, как будет меняться скорость горения смеси при введении добавок алюминия [1, 2].

Рассмотрим с этой точки зрения основные результаты данной работы. Известно, что воспламенение взвеси частиц металла облегчается при увеличении их концентрации. Поэтому если процент добавки алюминия мал, то частицы лишь поглощают тепло на свой прогрев, а их воспламенение и горение происходит достаточно далеко от поверхности заряда. Соответственно скорость горения смесей не увеличивается и даже снижается.

При увеличении процентного содержания алюминия время воспламенения частиц уменьшается, что приводит к более полному сгоранию алюминия в пределах зоны влияния и к увеличению скорости горения.

При изменении состава смеси изменяется среда, в которой воспламеняются и сгорают частицы. Естественно, что увеличение содержания окислителя в исходной смеси (т. е. увеличение α_0) является благоприятным фактором.

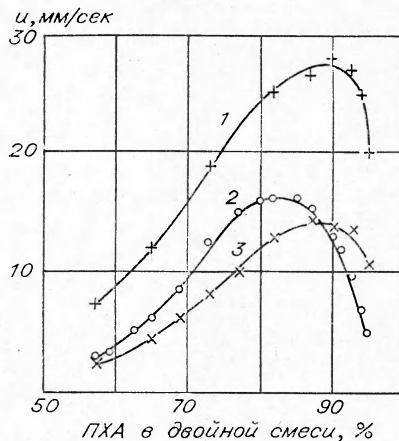


Рис. 5. Зависимость скорости горения состава 80% (ПХА+ПС)+20% Al от содержания ПХА в двойной смеси; $p=40$ атм.

1 — смесь с 20% ПАК-4; 2 — смесь без алюминия; 3 — смесь с 20% Al (20 мк).

Обсуждение результатов. Влияние алюминия на скорость горения связано с затратами тепла на прогрев частиц алюминия и с тепловыделением за счет горения частиц в зоне влияния.

Крупнодисперсные частицы воспламеняются с трудом и горят медленно. Поэтому при добавлении крупнодисперсного алюминия скорость горения снижается. Исключение составляют лишь составы с большим избытком окислителя, где наблюдается увеличение скорости горения даже при добавках крупнодисперсного алюминия.

Поступила в редакцию
3/VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Бахман, Ю. А. Кондрашков. ЖФХ, 1963, 37, 1; 216.
2. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев, Ю. А. Кондрашков. ФГВ, 1970, 6, 1, 93.
3. А. Н. Шашков, Н. Н. Бахман, Ю. А. Кондрашков. ФГВ, 1970, 6, 2, 241.
4. С. А. Цыганов, Н. Н. Бахман. ЖФХ, 1966, 50, 11, 2854.

УДК 536.46+662.27

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ ПО ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОБРАЗЦАМ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

*Б. А. Иванов, Е. М. Измайлов, С. Е. Наркунский,
А. П. Никонов, В. Ф. Плешаков
(Москва)*

В связи с использованием алюминиевых сплавов в качестве конструкционного материала для кислородного оборудования, возникает задача моделирования условий распространения горения при зажигании деталей различной формы в зависимости от их геометрических размеров, давления кислорода и теплофизических параметров сплавов. Решение этой задачи естественно начать с изучения простого случая, каким является распространение горения по цилиндрическим образцам (проволоке), так как при этом проявляются некоторые особенности механизма горения алюминия. Например, в работах [1, 2] экспериментально определено, что скорости распространения горения по алюминиевой проволоке диаметром 1 и 2 мм в чистом кислороде увеличиваются при повышении давления кислорода пропорционально $p^{0,5}$ в областях давлений $0,05 \leq p \leq 1,6$ МПа и $3,2 \leq p \leq 10,0$ МПа. Однако в областях давлений $1,6 \leq p \leq 3,2$ МПа и $p \leq 0,05$ МПа скорости распространения горения уменьшаются с увеличением давления. Эти данные интересны с точки зрения выяснения механизма горения алюминия, который, несмотря на большой прогресс в исследованиях горения отдельных частиц [3—7], до сих пор изучен недостаточно.

Цель настоящей работы заключается в изучении основных закономерностей процесса распространения горения и в определении физической модели горения алюминия, которая объяснила бы эти закономерности и дала возможность приближенно рассчитать скорость процесса.