

Рис. 3. Зависимость от давления критических начальных температур нормального и турбулентного горения азидоэтанола.

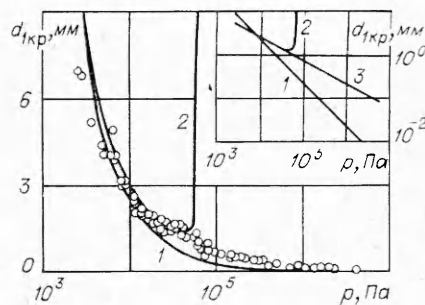


Рис. 4. Зависимость критического диаметра нормального горения азидоэтанола от давления. Сравнение опыта с расчетом.
1 — расчет по (1); 2 — расчет по (2); 3 — эксперимент.

Развитие неустойчивого режима горения, которое в случае азидоэтанола не приводит к прекращению горения, происходит, согласно [12], в результате развития возмущений на границе жидкость — пар при достижении предельной скорости горения. Значения предельных скоростей горения, полученные расчетом по модифицированному в [13] уравнению Ландау и экспериментально найденные, представлены в табл. 2, откуда видно, что указанные величины находятся в хорошем соответствии друг с другом. Аналогичный результат для ряда органических азидов получен ранее в [3].

Поступила в редакцию
2/VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Сергеев. Канд. дис., М., МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1975.
2. В. В. Сергеев, М. С. Кожух. ФГВ, 1975, 11, 3.
3. М. С. Кожух, В. В. Сергеев. ФГВ, 1977, 13, 5.
4. К. К. Андреев, Г. Н. Беспалов.— В кн.: Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1963.
5. M. O. Forster, J. C. Withers. J. Chem. Soc., 1912, 101, 493.
6. Я. Б. Зельдович. Теория горения и детонации газов. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1944.
7. Я. Б. Зельдович, В. В. Воеводский. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. М., 1947.
8. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 498.
9. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.
10. Б. Н. Кондриков. ФГВ, 1969, 5, 1.
11. В. Э. Анников. Канд. дис. М., МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1969.
12. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 240.
13. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1946, 54, 39.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В СОСТАВЕ СМЕСЕВЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

В. А. Бабук, В. П. Белов, Г. Г. Шелухин
(Ленинград)

В [1] установлено, что полнота сгорания алюминизированных смесевых конденсированных систем отличается при низких и высоких давлениях. При давлениях менее 1,5 — 2,5 МПа осуществляется ярко

выраженное неполное сгорание, при более высоких давлениях полнота сгорания значительно увеличивается. Высказано предположение, что изменение полноты сгорания обусловлено перестройкой механизма горения частиц алюминия при переходе от низких давлений к высоким. В данной статье излагаются результаты экспериментального исследования процесса горения алюминия в составе смесевых конденсированных систем в диапазоне давлений $0,1 \div 5,0$ МПа.

Исследование проводилось в установке постоянного давления, конструкция которой близка к описанной в [2]. Оно включало визуализацию частиц алюминия на поверхности горения и в газовой фазе и отбор частиц в надповерхностной зоне с последующим их анализом. Изучались смеси на основе перхлората аммония и различных связок. В каждом составе присутствовало 18% алюминия. Визуализация частиц осуществлялась скоростной микрокиносъемкой с использованием собственного свечения частиц. При наблюдении на поверхности применялись образцы со срезом под углом навстречу объективу кинокамеры. При давлениях, близких к атмосферному ($0,1-0,2$ МПа), когда газовая фаза обладает высокой прозрачностью, визуализация частиц на поверхности горения совмещалась с измерением их яркостной температуры на эффективной длине волны $0,63$ мкм.

Частицы отбирались при сжигании малых образцов ($5 \times 6 \times 12$ мм) в замкнутом объеме, который обеспечивал увеличение давления не более, чем на 5% при сгорании образца. В этом случае при горении образцов осуществляется разбавление продуктов сгорания азотом, частицы металла «замораживаются» и оседают на дно установки. Для исследования собранных частиц применялись оптический и электронный микроскопы.

В момент начала свечения, отождествляемый с моментом воспламенения, находящиеся на поверхности горения частицы алюминия имеют яркостную температуру $T_{я} \approx 2050$ К. Эта температура примерно равна яркостной температуре плавления окиси алюминия [3]. Затем интенсивность свечения частицы растет равномерно по всей поверхности и $T_{я}$ увеличивается до $2300-2400$ К при $p = 0,1$ МПа и до $2400-2500$ К при $p = 0,2$ МПа. Через некоторое время свечение частицы перестает быть равномерным. На ней появляются две области: яркой и слабосветящаяся, имеющая $T_{я} \approx 2100 \div 2200$ К при $p = 0,1$ МПа и $T_{я} = 2200 \div 2350$ К при $p = 0,2$ МПа. Размер частиц, фиксируемых на поверхности в момент их воспламенения, превышает размер частиц исходного порошка алюминия в $8-10$ раз. Это свидетельствует о том, что укрупнение частиц происходит до плавления окисной пленки. Наблюдается и вторичное укрупнение частиц уже в процессе их горения на поверхности системы. Слияние таких частиц приводит к образованию «сверхкрупных» частиц размером до $400-500$ мкм, которые могут находиться на поверхности до $200-300$ мс. На «сверхкрупных» частицах также имеется яркосветящаяся область, занимающая $40-50\%$ поверхности, и слабосветящаяся область (рис. 1). От слабосветящейся области в сторону газовой фазы отходит светящийся шлейф. На поверхности слабосветящейся области постоянно появляются и перемещаются мельчайшие частицы с высокой интенсивностью свечения, которые можно обнаружить только благодаря их движению. В процессе горения частиц доля яркосветящейся области непрерывно увеличивается, а доля слабосветящейся уменьшается.

После отрыва от поверхности горения частицы в газовой фазе разворачиваются так, что яркосветящаяся область находится сверху, и частица окружена симметричным шлейфом, направленным в сторону оттока продуктов сгорания (рис. 2). Среди «сверхкрупных» частиц имеются такие, у которых за время пребывания на поверхности горения

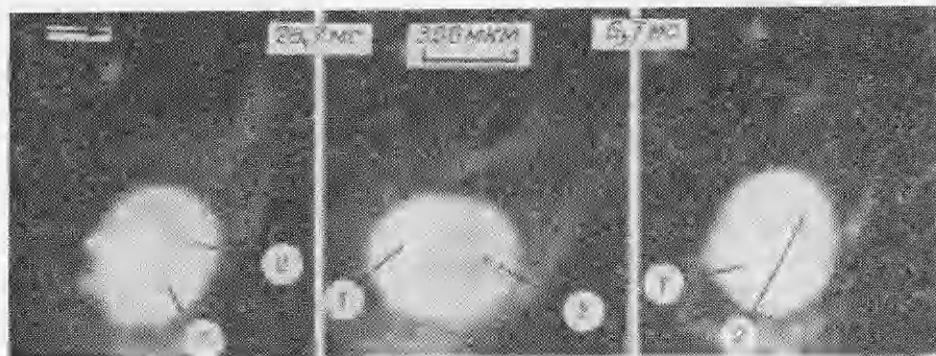


Рис. 1. Горение «сверхкрупной» частицы алюминия на поверхности горения системы при $p=0,1$ МПа, $T_n \sim 2350$ К (1) и 2450 К (2).

за счет сгорания масса уменьшается на 50—60%. У таких частиц яркосветящаяся область достигает $\sim 70\%$ поверхности частицы, после чего частица необратимо загасает. Это происходит в следующей последовательности. Начинает уменьшаться интенсивность свечения шлейфа, оттекающего от слабосветящейся области. К моменту полного исчезновения шлейфа перестают фиксироваться мельчайшие частицы в слабосветящейся области. Затем в этой области увеличивается яркость свечения, и она сливается с яркосветящейся областью. И, наконец, яркость свечения всей частицы падает, и частица перестает фиксироваться на поверхности горения.

При давлениях более $\sim 0,5$ МПа плотность шлейфа, оттекающего от частицы, такова, что с помощью кипосъемки не удается определить состояние поверхности горячей частицы. Для выявления особенностей горения при этих давлениях использовались результаты отбора частиц. В исследованном диапазоне давлений отобраны частицы имеют сферическую форму. Размер их существенно больше размера исходных частиц металла. Часть поверхности частиц покрыта оксидом алюминия, капсуляция их оксидом не наблюдалась.

Вид окиси на поверхности погашенных частиц зависит от их размера и величины давления. При низких давлениях (менее $\sim 2,0$ МПа) на основной массе частиц имеются «нашлепки» окиси, идентичные яркосветящейся области, наблюдаемой при кипосъемке (рис. 3). В большинстве случаев «нашлепки» окиси занимают 40—50% поверхности частицы, однако у отдельных частиц доля поверхности, занятой «нашлепкой» окиси, может достигать 70—80%. После обработки таких частиц кислотой, в результате которой алюминий растворяется, остаются сплошные чашеобразные скорлупки окиси с гладкой внутренней поверхностью. Толщина скорлупок небольшая в центре и уменьшается к краям.

При давлениях более $\sim 2,5$ МПа для основной массы частиц «нашлепки» окиси не фиксируются. После обработки кислотой получают неплотные скорлупки почти сферической формы. В скорлупках имеется либо несколько крупных, либо множество мелких отверстий. Толщина этих скорлупок значительно меньше толщины скорлупок, полученных при низких давлениях, и она примерно постоянна по всей поверхности частицы. Эти скорлупки как бы состоят из мельчайших шариков окиси (рис. 4).

При низких и высоких давлениях имеются узкие фракции отобранных частиц, у которых окись на поверхности имеет иной вид, чем у основной массы частиц при данном давлении. Так, при низких давлениях это фракция наиболее мелких частиц, а при высоких давлениях —

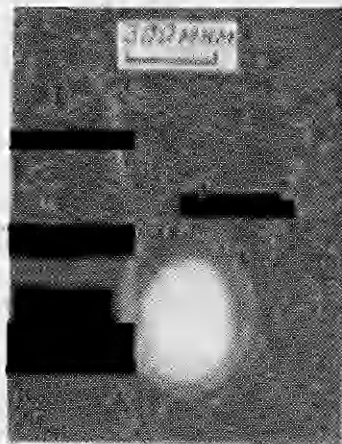


Рис. 2. Горение частицы алюминия в газовой фазе, $p = 0,1$ МПа.



Рис. 3. Отобранные частицы алюминия с «нашлепкой» окиси.
1 — Al_2O_3 ; 2 — Al.

фракция наиболее крупных частиц. Для этих фракций окись на поверхности частиц идентична окиси, характерной для высоких и низких давлений соответственно.

Полученные экспериментальные данные позволяют следующим образом представить механизм горения частиц алюминия в составе смесевых конденсированных систем. При подходе окисленных исходных частиц к поверхности горения алюминий плавится. Как только на поверхности появляется возможность контакта между частицами, еще до плавления окисной пленки, они соединяются по местам механического разрушения исходной окисной пленки, которое является следствием действия термических напряжений [4]. Таким образом получаются укрупненные частицы, находящиеся на поверхности горения. Механическое нарушение твердой окисной пленки приводит также к воспламенению частиц алюминия на поверхности горения. В момент воспламенения происходит плавление окисной пленки. После этого образовавшаяся частица принимает сферическую форму и ее горение идет в гетерогенном режиме (рис. 5). При этом режиме горения газообразный окислитель диффундирует через расплавленную окисную пленку, которая покрывает всю частицу, и взаимодействует с жидким алюминием, вследствие чего увеличивается температура частицы и толщина

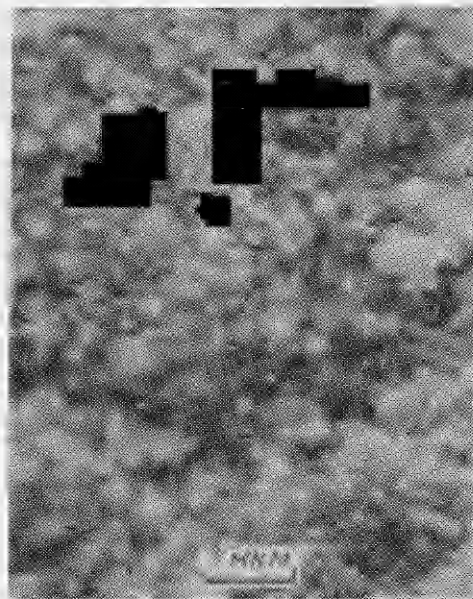


Рис. 4. Поверхность скорлупок окиси при высоких давлениях.

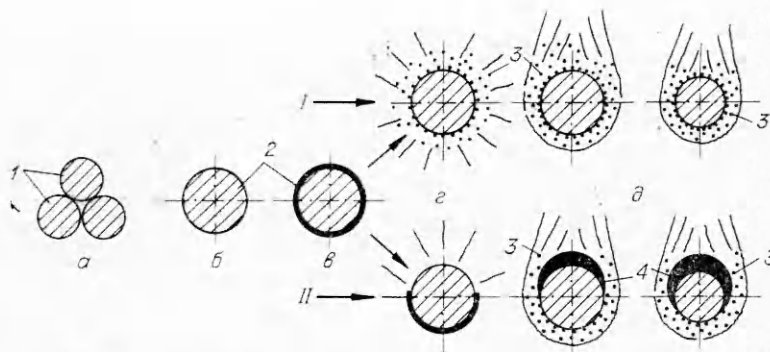


Рис. 5. Схема горения частиц алюминия при высоких (I) и низких (II) давлениях.

а) соединение частиц до их воспламенения; б) воспламенение и образование сферической частицы; в) гетерогенное горение; г) разрыв парами алюминия окисной пленки; д) парофазное горение. 1 — твердая окись; 2 — жидкая окись; 3 — частицы окиси; 4 — «нашлепка» окиси.

окисной пленки. В результате испарения алюминия его пары разрывают сплошную жидкую окисную пленку и зона горения перемещается в газовую фазу. Характер разрыва окисной пленки определяется интенсивностью испарения алюминия в момент разрыва, которая, в свою очередь, определяется давлением и размером частиц.

В дальнейшем горение частиц при низких и высоких давлениях будет рассматриваться применительно к основной массе частиц при этих давлениях. При низких давлениях разрыв окисной пленки происходит в одном или нескольких местах, и ее основная часть собирается в единую «нашлепку» окиси, которая занимает ~40—50% поверхности частицы. С поверхности частицы, не занятой «нашлепкой» окиси, испаряется металл, и над поверхностью располагается зона газофизического горения (см. рис. 1, 5). При высоких давлениях вся окисная пленка разрывается с образованием мельчайших частиц окиси. Размер этих частиц таков, что они сносятся с поверхности частицы парами алюминия. В этом случае со всей поверхности частицы идет испарение алюминия и зона газофазного горения окружает всю частицу (см. рис. 5).

Таким образом, при переходе к газофазному горению «нашлепка» окиси либо образуется, либо нет, и это определяется характером разрыва окисной пленки. Эксперименты дают основание предположить, что газофазное горение осуществляется в соответствии с диффузионной парофазной моделью горения частиц металла [5]. Часть образующейся в зоне горения окиси диссоциирует. Продукты диссоциации имеют возможность диффундировать как в общий поток продуктов сгорания, так и к поверхности частицы, на которой диссоциированная окись конденсируется. Парообразный алюминий, оттекающий от поверхности частицы, препятствует образованию сплошной окисной пленки, и на свободной поверхности частицы образуются мельчайшие частицы окиси, которые и фиксируются при киносъемке. Размер этих частиц таков, что под влиянием паров алюминия они непрерывно перемещаются по поверхности частицы и сносятся в газовую фазу. При низких давлениях конденсация части диссоциированной окиси на поверхности «нашлепки» окиси приводит к накоплению окиси на поверхности частицы в процессе горения. При высоких давлениях вся диссоциированная окись сносятся с поверхности частицы алюминия и накопления окиси в процессе горения на частице не происходит.

Предлагаемая модель горения частицы алюминия хорошо подтверждается результатами отбора частиц. Скорлупки окиси, получающиеся при низких давлениях, представляют собой «нашлепки» окиси, обра-

зующиеся при разрыве окисной пленки и при последующем накоплении окиси на частице в процессе горения. При высоких давлениях в каждый момент времени на поверхности частиц алюминия находится большое количество мельчайших частиц окиси. При отборе последние кристаллизуются, образуя скорлупку с малой толщиной стенки.

При низких давлениях «нашлепки» окиси, будучи непроницаемыми для газообразных продуктов, отключают значительную часть поверхности частицы от парофазного горения и тем самым уменьшают скорость горения частицы. При значительном накоплении окиси на поверхности частиц алюминия в определенных неблагоприятных внешних условиях вследствие существенного уменьшения теплоприхода и увеличения теплопотерь возможно погасание частиц алюминия. Это имеет место при горении «сверхкрупных» частиц на поверхности, когда горение частиц идет при пониженной температуре среды и при колебании концентрации окислителя, обусловленном локально-колебательным режимом горения [2]. При погасании парофазное горение переходит в гетерогенное, при котором нарастание толщины окисной пленки приводит к полному прекращению горения.

Влияние размера частиц алюминия на режим их горения определяет зависимость давления (граница низких и высоких давлений) от дисперсности частиц, поставляемых с поверхности горения в газовую фазу. При снижении размера частиц это давление увеличивается, и наоборот. Сформулированное отличие в режиме горения частиц алюминия при низких и высоких давлениях объясняет ранее полученные результаты по влиянию давления на полное сгорание различных алюминийсодержащих смесевых конденсированных систем [1].

*Поступила в редакцию
24/VI 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бабук, В. П. Белов, Г. Г. Шелухин. ФГВ. 1978. 14. 3. 145.
2. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1, 42.
3. Т. Бржустовский, Ч. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М., Мир, 1967.
4. J. Crump, J. Prentice, K. Kraeutle. Comb. Sci. and Techn., 1969, 1, 205.
5. Л. А. Клячко. ФГВ, 1969, 7, 3, 404.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ В КАНАЛАХ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ

*С. А. Абрюков, В. В. Афанасьев, В. П. Борисов,
Н. А. Медведев
(Чебоксары)*

В настоящее время принято выделять три механизма воздействия внешнего электрического поля на пламя [1—4]: тепловой, механический (точнее электро- и газодинамический) и кинетический. В допробойных электрических полях, когда фронт пламени не касается металлических электродов, а вся ионизация обусловлена химическими реакциями в пламени, кинетический и тепловой механизмы не играют практически ника-