

о возможности рождения ударных волн в результате внутрипламенных взрывных процессов следует считать предшественницей представлений, развиваемых в настоящей работе в результате прямых наблюдений.

Поступила в редакцию  
27/VIII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. A. Bone, D. T. A. Townend. Flame and Combustion in Gases. London, 1927.
2. G. W. Maxwell R. V. Wheeler. J. Inst. Petrol. Techn., 1928, **14**, 175; 1929, **15**, 408.
3. С. М. Когарко. ЖТФ, 1960, **30**, 1, 110.
4. С. М. Когарко, В. И. Скobelkin. Докл. АН СССР, 1958, **120**, 6.
5. С. М. Когарко, Д. Л. Рыжков. ЖТФ, 1961, **31**, 2, 216.
6. G. D. Salamandra, I. K. Sevastjanova. Comb. and Flame, 1963, **7**, 2, 1969.
7. В. П. Карпов. ФГВ, 1965, **3**, 68.
8. B. Lewis, G. Elbe. J. Chem. Phys., 1935, **3**, 63.
9. H. F. Coward, F. Brinsley. J. Chem. Soc. 1914, 105, 1859.
10. F. Goldmann. Z. physik. Chem., 1929, **5**, 307.
11. Я. Б. Зельдович. Теория горения и детонации газов. М.—Л., 1944.
12. К. И. Щелкин. ФГВ, 1966, **2**, 33.
13. G. Markstein. IV Symposium on Combustion, 1953.
14. G. Markstein. VI Symposium on Combustion, 1957.
15. W. G. Struck, H. W. Reichenbach. XI Symposium on Combustion, 1966.
16. S. R. Brinkley, B. Lewis. VII Symposium on Combustion, 1959, 807.
17. А. С. Соколик, В. П. Карпов, Е. С. Семенов. ФГВ. 1967, **3**, 1, 61.

УДК 536.46+662.612

#### ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО АЛЮМИНИЯ

А. Ф. Беляев,  
Б. С. Ермолов, А. И. Коротков, Ю. В. Фролов  
(Москва)

В работе [1] был рассмотрен вопрос о горении и воспламенении одиночных частиц мелкодисперсного алюминия в условиях высокотемпературного газового потока. В данной работе, являющейся продолжением [1], рассмотрены характерные особенности горения порошкообразного алюминия, возникающие при повышении его концентрации в газовом потоке, а также некоторые особенности горения, связанные со способом введения частиц в поток.

Повышение концентрации частиц ведет к тому, что среднее расстояние между отдельными частицами в газовом потоке становится сравнимым с характерным размером изучаемого процесса. В результате этого на условия воспламенения и горения одиночной частицы налагивается фактор взаимодействия с соседними частицами, что может привести к количественному, а не исключено, и к качественному изменению некоторых характерных закономерностей наблюдаемого процесса.

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНIE АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА

Методика эксперимента подробно изложена в [1], поэтому здесь лишь коротко напомним ее.

Установка представляет собой бомбу полузамкнутого объема с окном для оптических наблюдений. Высокотемпературный газовый поток в бомбе создавался за счет сжигания образцов, изготовленных из двухкомпонентных смесей горючее — окислитель. В качестве окислителя использовался главным образом перхлорат аммония, в качестве горючего — полимерные соединения типа полиметилметакрилата. Алюминиевый порошок определенного фракционного состава в заданном весовом соотношении (5—20%)<sup>1</sup> вводился в смесь исходных компонентов, из которой прессовались образцы, используемые для создания газового потока. По мере выгорания образца частицы поступали в газовый поток, где происходило их воспламенение и горение. Давление в установке во время опыта обычно составляло 50 атм.

**Воспламенение** частиц алюминиевого порошка с повышением его концентрации до 5—20% происходит, как показали эксперименты, значительно быстрее, чем воспламенение аналогичных по размеру одиночных частиц. Так, если при температуре газового потока  $\sim 2400^{\circ}\text{K}$  время воспламенения  $\tau_{\text{в}}$  одиночных частиц размером 70  $\mu\text{мк}$  составляет приблизительно 5 мсек, то при 10% концентрации частиц того же размера оно не превышает 1 мсек.

Более мелкий алюминий воспламеняется еще быстрее. Частицы диаметром 15—20  $\mu\text{мк}$  могут воспламеняться практически на поверхности образца, что неоднократно наблюдалось в ряде опытов [2].

Эффект уменьшения  $\tau_{\text{в}}$  частиц алюминия при повышении их концентрации в потоке является вполне естественным в свете выявленных [1] закономерностей воспламенения одиночных частиц. Время воспламенения одиночной частицы определяется условиями ее прогрева до температуры воспламенения и сильно зависит от температуры среды. Увеличение концентрации одновременно горящих частиц, в силу большого теплового эффекта реакции окисления алюминия, приводит к тому, что прогрев вылетающей с поверхности горения образца частицы определяется не только ее теплообменом с высокотемпературными продуктами горения смеси горючее — окислитель, но и дополнительным подводом тепла (путем теплопроводности и излучения) от уже горящих

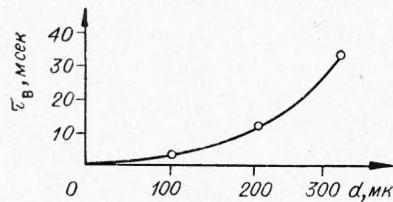


Рис. 1. Зависимость  $\tau_{\text{в}}$  от дисперсности алюминия.

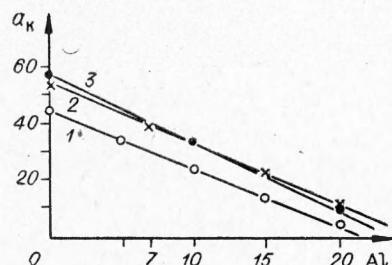


Рис. 2. Зависимость  $\alpha_{\text{k}}$  от количества сгоревшего алюминия для продуктов горения составов на основе ПХА с:

1 — 15% полизифира; 2 — 17% полиметилметакрилата; 3 — 9% полиэтилена.

<sup>1</sup> В дальнейшем концентрация частиц в газовом потоке будет характеризоваться исходной весовой концентрацией алюминия в образце (в %).

частиц. В результате время прогрева частицы, а следовательно, и время ее воспламенения уменьшается. На рис. 1 приведены времена воспламенения частиц алюминиевого порошка (концентрация Al в образце 10%) в функции от начального диаметра частиц  $d$ .

**Горение.** Если время воспламенения порошкообразного алюминия при увеличении его концентрации резко уменьшилось, то время горения  $\tau_r$ , наоборот, возросло.

Было установлено, что рост  $\tau_r$  в значительной мере зависит как от концентрации и дисперсности частиц алюминия, так и от состава образцов, используемых для создания высокотемпературного газового потока (при одном и том же значении  $a_k$ ). В отдельных случаях время горения порошка алюминия (при 10—20% концентрации) превышало время горения одиночных частиц в 5—8 раз.

Рассматривая причины, вызывающие изменение времени горения частиц порошка алюминия с увеличением его концентрации, нужно иметь в виду, что процесс горения алюминия является окислительным, в результате которого кислород от  $H_2O$ ,  $CO_2$  и других газообразных кислородсодержащих соединений переходит в связанные с алюминием состояния, т. е. процессом, который приводит к изменениям химического состава среды, окружающей горящие частицы.

При горении одиночных частиц эти изменения крайне малы, а поэтому концентрацию «активных» кислородсодержащих элементов ( $H_2O$  и  $CO_2$ ) можно считать постоянной, как это и было принято в работе [1]. В случае же, когда концентрация Al достигает 5—20%, подобное утверждение уже не приемлемо.

Термодинамический расчет состава окисляющей среды показал, что с каждым процентом сгоревшего алюминия параметр  $a_k$  уменьшается в среднем на 2% (рис. 2), т. е. если  $a_k^0$  — начальная относительная концентрация  $H_2O + CO_2$  (в %), а  $c$  — количество прореагировавшего алюминия (в % по отношению к образцу), то  $a_k = a_k^0 - 2c$ .

Так, например, если концентрация алюминия в образце равна 10% и весь он сгорает, то  $a_k$  уменьшается на  $\sim 20\%$ . В соответствии с выявленными закономерностями горения одиночных частиц [1] подобное ухудшение окисляющих свойств среды должно привести к увеличению времени горения частиц и притом тем большему, чем резче уменьшение параметра  $a_k$ .

Для грубой верхней оценки влияния изменения  $a_k$  на  $\tau_r$  частиц можно предположить, что весь алюминий сгорает в атмосфере, соответствующей полному его окислению до  $Al_2O_3$ , т. е. при  $a_k = a_k^0 - 2c^0$  ( $c^0$  — исходная концентрация алюминия в образце). Тогда, согласно [1], время горения будет равно

$$\tau_1 = 0,67 \frac{d^{1,5}}{a_k^{0,9}} = \tau_r^0 \frac{1}{\left(1 - 2 \frac{c^0}{a_k^0}\right)^{0,9}}. \quad (1)$$

Рассмотрим конкретный пример.

Одиночные частицы алюминия диаметром 20 мк, введенные в стехиометрический модельный состав на основе ПХА, создающий газовый поток с  $a_k = 54\%$ , сгорают за 1,5 мсек. Увеличение концентрации тех же частиц в образце до 10 или 20% привело к тому, что в аналогичных условиях время горения Al увеличилось, согласно эксперименту, до 5,5 и 7,5 мсек соответственно, т. е. в 4 раза. В то же время оценка  $\tau_r$  в предположении, что  $a_k = a_k^0 - 2c^0$  показывает, что время

горения частиц  $20 \text{ мк}$  не должно было бы превышать  $2,2$  и  $4,5 \text{ мсек}$  соответственно.

Реально же алюминий воспламеняется и начинает гореть в среде, богатой окисляющими агентами: при малом конечном значении  $a_k$  он только догорает, причем догорают фактически наиболее крупные частицы. Точный учет этого фактора приводит к появлению в (1) коэффициента, являющегося сложной функцией от отношения  $(c^0 / a_k^0)$ . В рассмотренном примере расчет с учетом поправочного коэффициента дает значения  $\tau_r$ , примерно в 3 раза меньшие измеренных.

Таким образом, одной из причин роста  $\tau_r$  при повышении концентрации алюминия является ухудшение газового состава среды, в которой происходит горение частиц. Но полностью объяснить наблюдаемое на опыте увеличение  $\tau_r$  только этим нельзя. Вторую причину следует искать в методических особенностях эксперимента — в способе подачи частиц в газовый поток.

В работах [3—5] отмечено, что при горении смесевых составов на основе перхлората аммония, содержащих  $10$ — $20\%$  алюминия, на поверхности горения или вблизи ее происходит укрупнение частиц. Это явление было обнаружено и в наших опытах. Следовательно, размер частиц алюминия, поступающих в газовый поток, уже не соответствует исходному размеру частиц, введенных в образец.

«Эффективный» диаметр (более подробно об этом будет сказано ниже) образующихся в результате агломерации частиц можно оценить, если воспользоваться соотношением между  $\tau_r$ ,  $a_k$  ( $c$ ) и  $d$ , т. е. если применить приведенную выше формулу (1) с учетом поправочного коэффициента, описывающего изменение  $a_k$  по мере выгорания алюминия. В рассмотренном примере «эффективный» диаметр частиц при концентрации Al  $10$  и  $20\%$  должен быть равен соответственно  $30$  и  $45 \text{ мк}$ .

## АГЛОМЕРАЦИЯ

В связи с тем, что укрупнение (агломерация) алюминиевых частиц существенно влияет на условия и время горения алюминия в газовом потоке, а также в связи с использованием металлических порошков для увеличения скорости горения смесевых систем [6, 7], процесс агломерации может представлять определенный самостоятельный интерес.

Первоначально агломерация была обнаружена на баллиститных пороах и на смесевых составах на основе перхлората аммония, в которых баллистит использовался в качестве связующего. Исследования, как правило, проводились на маленьких образцах в бомбе постоянного давления в атмосфере азота при давлении  $30$ — $50 \text{ atm}$ .

Были установлены [3—5] некоторые закономерности этого явления. В частности, было экспериментально показано, что степень агломерации возрастает при уменьшении размера и увеличении концентрации частиц алюминия, а также при уменьшении давления в бомбе. В работе [5] предложена формула для количественной оценки степени агломерации. В этой же работе показано влияние на агломерацию фракционного состава перхлората аммония и бокового обдува поверхности горения со скоростью порядка нескольких метров в секунду.

Ниже изложены результаты экспериментов по отбору и анализу конденсированных продуктов горения модельных смесей горючее — окислитель, содержащих до  $20\%$  мелкодисперсного алюминиевого порошка.

**Методика.** Сжигание образцов, состоящих из двух тонких плоско-параллельных пластин, жестко скрепленных с пластмассовым каркасом, проводилось в бомбе постоянного давления. Горение было возможным лишь с внутренних, обращенных друг к другу, поверхностей пластин. Использование образцов такой формы позволило свести к минимуму влияние холодного азота, с помощью которого создавалось давление в бомбе, и получить обдув поверхности горения горячими продуктами, движущимися со скоростями до 200 м/сек.

Для отбора и закалки конденсированных продуктов горения применяли отборник, схема которого приведена на рис. 3. Щелевой образец 1 неподвижно закреплялся перед внутренней боковой поверхностью барабана 2, вращающегося при помощи мотора 4 со скоростью до 1000 об/мин. В барабан наливался спирт, который при вращении растекался тонким слоем 3 (толщиной около 3—5 мм) по боковой поверхности барабана. Конденсированные продукты горения, вытекая из щели заряда, попадали в спирт, тормозились в нем, гасли и охлаждались. Подобная схема отбора позволяла улавливать конденсированные продукты сгорания размером до 100 мк не более чем через 1 мсек после вылета с поверхности горения, без изменения их формы и структуры в момент торможения и охлаждения.

Отобранные частицы анализировались под микроскопом при увеличении в 60—400 раз. Результаты оформлялись в виде интегральных кривых распределений частиц по объему.

Для краткой характеристики распределений использованы размеры  $D_{50}$   $\left( D_{50} = \left( \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i} \right)^{1/3} \right)$  и  $D_{90}$  (соответственно 50 и 90% частиц по объему имеют размер меньше данного). Оба размера получаются непосредственно из распределений.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 4 представлены интегральные кривые распределений частиц исходного алюминия и конденсированных продуктов горения ряда исследованных составов. Характерные размеры этих распределений приведены в табл. 1. Микрофотографии типичных агломератов представлены на рис. 5.

Анализ приведенных данных показывает, что имеется сильная зависимость эффекта агломерации от концентрации алюминия в образце (что неоднократно отмечалось) и от вида горючего.

Так, средний размер агломератов  $D_{50}$ , отобранных при горении состава с полиэфирным связующим, содержащем 7% алюминиевого порошка, лишь в 1,2 раза превышает аналогичный размер исходного алюминия  $D_{50}^0$

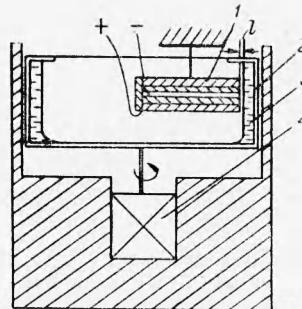


Рис. 3. Схема отборника.

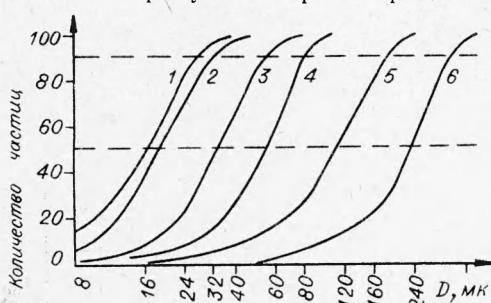


Рис. 4. Интегральные кривые распределений исходного алюминия (1) и частиц — агломератов, полученных при сжигании модельных составов:

2 — 15% полиэфира + 7% Al; 3 — 10% полиметилметакрилата + 7% Al; 4 — 40% баллистита + 10% Al; 5 — 20% полиформальдегида + 10% Al; 6 — 20% полиформальдегида + 20% Al.

Таблица 1

Вид горючего в образце	Концентрация алюминия в образце, %	Характерный размер <sup>**</sup> агломератов	
		$D_{50}$ , мк	$D_{90}$ , мк
Полиэфир . . .	7	18	35
Полиметилметакрилат . . .	7	33	56
Баллистит (стружка) . . .	10	54	80
Полиформальдегид . . .	10	120	185
То же Н* . . .	20	240	350
Порох Н* . . .	10	—	300

\* Алюминий смешивался с тонкоизмельченным порохом; прессование с подогревом.

\*\* Размер исходного порошка Al:  $D_{50}^0 = 16$  мк,  $D_{90}^0 = 30$  мк.

Нами были качественно исследованы агломераты, образующиеся при горении составов на основе перхлората аммония с инертным горючим. С помощью простых экспериментов было установлено, что агломераты по своей структуре неоднородны. Во-первых, крупные агломераты прокаливались в течение нескольких часов при температуре 350—400°С, которая заведомо ниже температуры плавления алюминия и его окисла, но выше точки плавления и разложения других компонентов смеси. Опыты показали, что прокаленные агломераты очень легко разламываются и дробятся на части, сравнимые по размеру с исходным алюминием.

Во-вторых, была оценена средняя плотность вещества агломератов. С этой целью собранные агломераты были спрессованы под давлением около 4000 атм в цилиндрики диаметром 4 мм. При таком давлении перхлорат аммония и полимерные горючие уплотняются до относительной плотности, практически равной 1,0, а порошок алюминия — до 2,62 г/см<sup>3</sup>. Измерения показали, что средняя плотность агломератов не превышает 2,1 г/см<sup>3</sup>.

Оба эти факта указывают на то, что в состав агломератов, помимо алюминия и его окисла, в значительном количестве должны входить вещества с более низкой плотностью. Такими веществами могут быть только неполностью разложившееся горючее (плотность  $\rho_0 = 1,0$  г/см<sup>3</sup>) и ПХА ( $\rho_0 = 1,96$  г/см<sup>3</sup>).

и составляет 18 мк. При горении состава на основе полиметилметакрилата, с той же концентрацией алюминия, размер  $D_{50} = 33$  мк, т. е. уже в 2 раза больше, чем  $D_{50}^0$ . Еще больший размер агломератов получен при горении составов, в которых в качестве горючего использованы полиформальдегид и тонко измельченная стружка баллиститного пороха; в этом случае отдельные частицы достигают в диаметре 0,5 мм и более (рис. 5). Так как время горения алюминиевых частиц пропорционально их диаметру в степени 1,5, то при горении алюминия в виде таких крупных агломератов его эффективность может быть низка.



Рис. 5. Микрофотографии исходного алюминия и характерных частиц — агломератов.

а — исходный алюминий; б, в — агломераты, полученные на модельных составах на основе ПХА; г — агломераты, полученные на баллиститном порохе Н.

Количественный химический анализ состава агломератов не проводился, однако доля алюминия в агломератах была оценена.

По методике, разработанной для исследования горения одиночных частиц алюминия, измерялось время горения агломератов; далее по формуле  $\tau_r = f(a_k, d)$  рассчитывался «эффективный» диаметр агломерата  $d_{\text{эфф}}$ , определяемый как диаметр алюминиевой частицы, имеющей то же время горения. Отношение «эффективного» диаметра к первоначальному диаметру частицы характеризовало долю алюминия в агломерате. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Легко заметить, что время горения агломератов меньше времени горения аналогичных алюминиевых частиц, причем различие тем больше, чем больше размер агломератов. Из таблицы также видно, что в крупных агломератах (диаметром более 80 мк) весовая доля алюминия не превышает 40% и уменьшается с увеличением их диаметра. Время горения агломератов зависит от количества содержащегося в них алюминия. Подобная оценка является, конечно, приближенной, ибо нельзя полностью отождествлять время горения сплошных алюминиевых частиц со временем выгорания алюминия из агломератов, обладающих сложной структурой.

Таким образом, хотя агломерация и приводит к заметному увеличению времени горения, прямое использование размеров агломератов для оценки  $\tau_r$  может явиться причиной весьма существенных ошибок.

Размер агломератов и количество содержащегося в них алюминия зависит еще и от давления, при котором проводится сжигание образцов, от концентрации и дисперсности алюминиевого порошка. В табл. 3 приведены данные по влиянию давления на размер образующихся ча-

Исходный размер агломератов, мк	Время горения агломератов, мсек	Время горения частиц алюминия при $d_{\text{Al}} = d$ , мсек	«Эффективный» диаметр агломератов, мк	Доля Al в агломератах ( $d_{\text{эфф}}/d$ ) <sup>3</sup>
50	4,8	6,0	43	0,63
80	7,8	12,0	57	0,36
120	12,6	22,0	83	0,33
160	19,0	34,0	108	0,30
200	25,0	45,0	130	0,27

тиц — агломератов, полученных на образцах с 7%-ной концентрацией алюминиевого порошка.

Из таблицы видно, что с повышением давления среднеобъемный размер агломератов снижается вдвое. Такого же порядка изменения наблюдаются и на других составах.

Табл. 4 иллюстрирует зависимость характерного размера агломератов от дисперсности частиц исходного порошка алюминия (горючее — 15% полиметилметакрилата, 7% алюминия).

Давление в бомбе, атм	$D_{50}$ , мк	$D_{50}/D_{50}^0$
1	40	2,35
20	30	1,75
40	19	1,20

\*  $D_{50}^0 = 16$  мк.

Из таблицы видно, что с повышением давления среднеобъемный размер агломератов снижается вдвое. Такого же порядка изменения наблюдаются и на других составах.

Табл. 4 иллюстрирует зависимость характерного размера агломератов от дисперсности частиц исходного порошка алюминия (горючее — 15% полиметилметакрилата, 7% алюминия).

Фракционный состав, Al, %	Размер частиц алюминия, мк	Размер агломератов, мк		$D_{50}/D_{50}^0$	$D_{\infty}/D_{90}^0$
		$D_{50}$	$D_{90}$		
50–70	мелкий				
100	0	62	72	60	92
50	50	38	60	50	82
10	90	19	42	41	72
0	100	17	28	42	70

Дисперсность менялась путем смешения мелкодисперсного алюминия с алюминием фракции 50-70 мк. Согласно полученным данным, переход от мелкодисперсного порошка к алюминию с крупными частицами приводит к двухкратному уменьшению агломерации.

Использованная в работе методика исследования позволила получить экспериментальные результаты по влиянию обдува поверхности горения образца высокотемпературными продуктами сгорания при скоростях до 100 м/сек и более (осреднение ведется по длине щели).

Эти результаты представлены на рис. 6. Точка на оси ординат, соответствующая нулевой скорости обдува (время отбора менее 1 мсек), получена при торцовом сжигании плоского образца. В зависимости от скорости обдува  $\omega$  различие между кривыми 1 и 2 во времени составляет 0,5-3,0 мсек.

При скорости обдува порядка 10-15 м/сек на кривых имеется максимум; дальнейшее увеличение скорости  $\omega$  приводит к снижению размера агломератов. Из этого же графика видно (сравнение кривых), что в начальный момент выгорание агломератов идет с весьма большой скоростью, превышающей скорость горения алюминия.

В работе [5] отмечалось, что степень агломерации зависит от размера кристаллов перхлората аммония. Действительно, при увеличении частиц ПХА от 5-10 мк до 100-200 мк диаметр агломератов возрастает почти в два раза. В то же время опыты показали, что размер агломератов может зависеть не только от фракционного состава системы, но и от способа ее изготовления.

Рис. 6. Влияние скорости поперечного обдува горящей поверхности образца на среднеобъемный размер агломератов.

Расстояние от среза щели образца до поверхности гасящей жидкости в отборнике: 1 —  $l=3$ ; 2 —  $l=30$  мм.

Одна и та же смесь (7% полиметилметакрилата + 83% ПХА + 7% Al) приготавливается путем обычного «сухого» смешения компонентов и «желатинизацией» (Al и ПХА вводятся в раствор горючего в дихлорэтане затем при перемешивании дихлорэтан испаряется). Во втором случае смешение компонентов оказывается более равномерным, так как горючее тонким слоем обволакивает частицы Al и окислителя.

В итоге при сжигании образцов из «желатинированной» смеси размер  $D_{50}$  ( $D_{90}$ ) образующихся агломератов был в полтора раза меньше, чем на образцах из смеси, изготовленной обычным методом: 34 (58) и 45 (81) мк соответственно.

Для выяснения причин образования агломератов была проведена скоростная киносъемка горящей поверхности образца, со скоростью около 2000 кадр/сек; увеличение до 10 раз.

Образцы сжигались при атмосферном давлении, когда эффекты агломерации проявляются наиболее сильно, и при давлении в 20 атм. Анализ материалов киносъемки подтвердил рассмотренные выше особенности агломерации и позволил сделать ряд замечаний относительно механизма этого явления.

На рис. 7 представлены некоторые кинокадры, характеризующие поверхность горящего образца, содержащего 15% мелкодисперсного алюминия. Видно, что с поверхности горения отлетают сравнительно крупные частицы, имеющие плоскую неправильную форму «хлопьев» (рис. 7, в). Выделяющиеся на общем фоне яркие точки являются частицами алюминия, вкрапленными в агломерат. При горении образ-

ца крупные «хлопья» могут сравнительно долго находиться вблизи поверхности горения, оставаясь соединенными с ней тонкой перемычкой (рис. 7, б). В этот момент на них иногда налипают более мелкие частицы.

После отрыва от поверхности образца, попадая в высокотемпературную зону горения, агломераты быстро оплавляются и принимают сферическую форму. Если агломераты достаточно крупные, а время отбора мало, то их поверхность в момент отбора имеет заметные неровности (см. рис. 5, в). В других случаях, например на баллиститных составах, получаемые в отборнике агломераты имеют почти идеальную гладкую сферическую поверхность (см. рис. 5, г).

По-видимому, время оплавления «хлопьев» при прочих равных условиях существенно зависит от свойств горючего, от его способности обра-

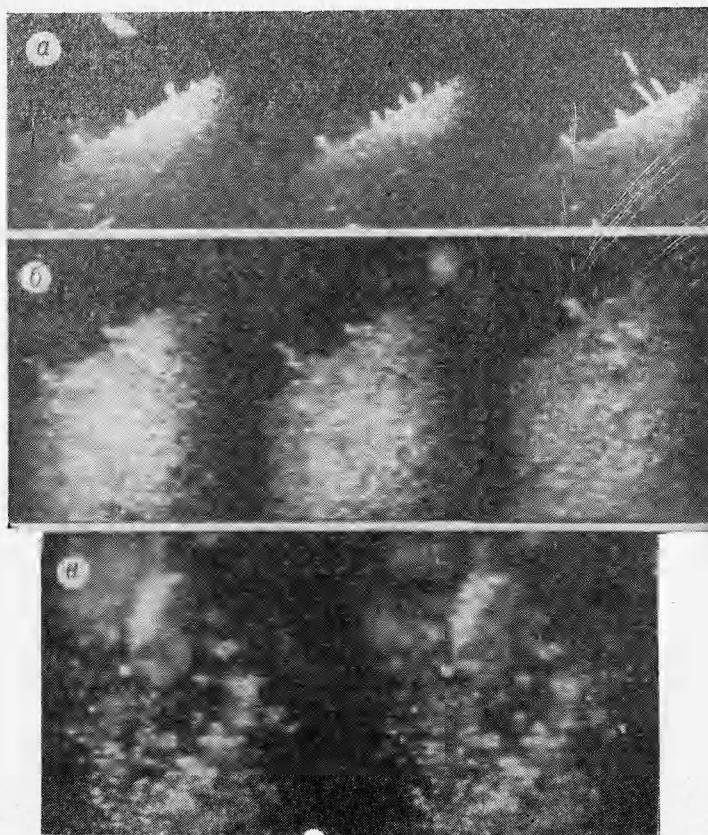


Рис. 7. Кинокадры горящей поверхности образца, содержащего алюминий.

зовывать расплав или газифицироваться. В момент отделения от поверхности горения зарегистрированы небольшие перемещения «хлопьев».

На основании анализа приведенных выше данных можно следующим образом представить картину образования агломератов.

Использованные в работе конденсированные смесевые системы имеют неоднородную, неупорядоченную структуру и состоят из кристаллов перхлората аммония, промежутки между которыми заполнены полимерным горючим. Алюминий, в силу принятой технологии изготовления образцов, в основном находится в прослойках горючего. Чем крупнее

фракция ПХА, тем толще прослойка горючего, тем больше в них содержится алюминия. Последнее зависит также от концентрации самого алюминия и от равномерности перемешивания компонентов смеси.

В общем случае скорости разложения горючего и окислителя различны. Наиболее интенсивно процесс разложения идет по границе их контакта<sup>1</sup>. В силу этого, отдельные прослойки горючего в местах соприкосновения с ПХА обгорают со всех сторон и затем уносятся потоком газообразных продуктов, оттекающих от поверхности горения.

Процессу образования агломератов может способствовать и другая возможная причина. При горении составов на основе ПХА глубина прогретого слоя конденсированной фазы достигает 50 мк и более. При этом в к-фазе при определенной температуре ( $T \gtrsim 243^{\circ}\text{C}$ ) может начаться процесс разложения ПХА и не исключено его частичное взаимодействие с горючим. Образующиеся газообразные продукты, действуя на расположенные выше прослойки горючего, содержащие алюминий, будут помогать их выбросу с поверхности горения.

С повышением давления толщина прогретого слоя уменьшается, а скорость разложения компонентов смеси увеличивается. Это должно приводить к уменьшению размера агломератов — к эффекту, который хорошо прослеживается экспериментально (см. табл. 3).

Рассмотренная картина является характерной для данных условий эксперимента и данных составов. Не исключено, что при использовании иных составов возникнут иные особенности горения порошкообразного алюминия, входящего в состав конденсированных систем.

На основе изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение концентрации алюминиевого порошка приводит к уменьшению времени воспламенения и увеличению времени горения частиц.

2. Увеличение времени горения происходит за счет ухудшения газового состава окисляющей среды (уменьшение параметра  $a_k$ ) и в результате агломерации, которая приводит к укрупнению горящих частиц.

3. Агломерация алюминия зависит как от свойств и состава конденсированной смеси (дисперсности и концентрации алюминиевого порошка, фракционного состава перхлората аммония, вида горючего и способа приготовления образцов), так и от условий сжигания образцов (давления, обдува поверхности горения).

4. Агломераты имеют сложный состав и помимо алюминия содержат значительное количество продуктов частичного разложения горючего и, возможно, перхлората аммония.

5. Время горения агломератов не определяется их видимым размером, а зависит от количества содержащегося в них алюминия.

Поступила в редакцию  
2/XI 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1968, 4, 3.
2. В. В. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». М., 1963.
3. L. A. Watermeier, W. P. August, S. P. Pfaff. 9-th Symposium (International) on Combustion. Acad. Press., N. Y., 1963.
4. B. Brown, K. McCarthy. 8-th Symposium (International) on Combustion. Baltimore, 1962.

<sup>1</sup> В определенных условиях скорость распространения пламени целиком может определяться средней скоростью распространения «носиков» между горючим и окислителем [9, 10].

5. L. Povinelly, R. Rosenstein. AIAA J., 1962, 2, 10.
6. J. Ito. 3-th Symposium (International) on Rocket and Astronautics, 1962.
7. G. Inami, H. Shandfield. AIAA J., 1967, 7, 1314.
8. Р. Ф. Чейкин, В. Х. Аnderсен. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». М., 1963.
9. А. Ф. Беляев, Ю. А. Кондрашков и др. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
10. Н. Н. Бахман, Д. П. Поликарпов. Изв. АН СССР, «Энергетика и автоматика», 1961, 4.

УДК 536.46

## ГОРЕНИЕ ОДНОЧНЫХ ЧАСТИЦ БОРА

*М. А. Гуревич, И. М. Кирьянов, Е. С. Озеров*

(Ленинград)

1. В струю горячего газа (смесь окислителя с аргоном и азотом) вводились частицы кристаллического бора. Наблюдение за горящими частицами велось визуально или при помощи киносъемки.

Струя горячего газа получалась при помощи дуговой плазменной горелки 1 (рис. 1), в которой дуга постоянного тока силой 150–300 а горела в кольцевом зазоре между вольфрамовым катодом 2 и медным анодом 3. Температура аргона на выходе из горелки по расчетной оценке изменялась в пределах 4000–6000°С.

На выходном срезе горелки был дополнительно смонтирован смеситель 4. Здесь в струю аргона тонкими радиальными струйками подмешивался окислитель (водяной пар или кислород) или смесь окислителя с азотом. Из смесителя газ поступал через шамотную насадку 5 — в металлическую камеру 6, диаметр которой (150 мм) в 15 раз превышал внутренний диаметр насадки 5. Камера предназначалась для уменьшения подсоса атмосферного воздуха. По всей ее длине имелось слюдяное окно для наблюдения за частицами.

Температура потока газовой смеси могла измеряться в любой его точке вольфрам-рениевой термопарой (диаметр электродов 0,3 мм), а вне насадки 5, кроме того, методом обращения Д-дуплета натрия. В последнем случае в горелку вместе с аргоном подавалось небольшое количество паров натрия.

Содержание компонент в газовой смеси рассчитывалось по их расходам, измеряемым реометрами. По суммарному расходу газов в средней температуре рассчитывалась и средняя скорость потока в канале насадки 5. Эта скорость изменялась в пределах 10–20 м/сек.

Частицы металла вводились в поток через отверстие в насадке 5. Для этого использовались два типа питателя. Первый мало отличается от описанного в [1]. Испытуемый порошок засыпался в небольшую камеру, дно которой вибрировало с частотой 50 гц. Из полученного в

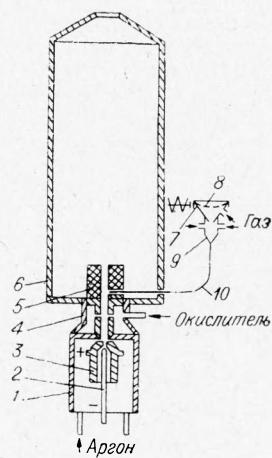


Рис. 1.