

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ-АГЛОМЕРАТОВ АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ. III. ФРАГМЕНТАЦИЯ ЧАСТИЦ

О. Г. Глотов^{1,2}, Н. С. Белоусова^{1,2}, Г. С. Суродин¹

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
630090 Новосибирск, glotov@kinetics.nsc.ru

²Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск,
nata.bel.94@mail.ru

Исследовано горение алюминиевых частиц-агломератов диаметром $215 \div 840$ мкм в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении. Основные события процесса горения частиц после их выхода из образца в воздух — смена симметричного горения на асимметричное, фрагментация, окончание горения — характеризуются соответствующими временами. Для характерных времен стадии симметричного горения, начала фрагментации, окончания фрагментации, окончания горения получены аппроксимирующие зависимости от диаметра частицы. Определены характеристики фрагментации частиц. Приведены данные об относительном количестве материнских частиц-агломератов, испускающих то или иное количество фрагментов, и о зависимости количества фрагментов от диаметра горячей частицы. У более крупных частиц фрагментация начинается позже, но протекает более интенсивно. В целом наблюдаемая самопроизвольная фрагментация агломератов алюминия незначительна, поэтому для сокращения времени их горения необходима целенаправленная интенсификация процесса фрагментации.

Ключевые слова: алюминиевый агломерат, диаметр, горение в свободном падении в воздухе, фрагментация.

DOI 10.15372/FGV2024.9443

EDN XXWVWR

ВВЕДЕНИЕ

В первой статье цикла [1] показано, что, несмотря на более чем 60-летнюю историю, исследование горения частиц алюминия активно продолжается и в настоящее время, поскольку до сих пор отсутствуют удовлетворительные количественные описания и числовые значения для ряда параметров процесса, например для (1) времени горения и макрокинетики выгорания агломератов; (2) массовой доли накапливаемого на горячей частице оксида φ и характеристик финальной оксидной частицы, остающейся после полного выгорания активного алюминия; (3) данных о фрагментации; (4) закономерностей движения и коэффициента аэродинамического сопротивления горящих частиц; (5) степени близости процессов горения агломератов и изначально монолитных частиц алюминия того же размера. Выполненный цикл работ дает ответы на часть поставленных вопросов. В первой статье [1] представлены данные о времени горения агломератов диаметром $215 \div 840$ мкм в воздухе и о характеристиках финальных оксидных частиц. Во второй статье [2] подтверждено наличие стадий симметричного и асимметричного горения для крупных агломератов, определены длительности стадий, исследованы закономерности движения горящих частиц-агломератов в свободном падении и предложена эмпирическая зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления горящего агломерата от числа Рейнольдса. В данной статье исследована фрагментация крупных агломератов при горении. Фрагментацию частиц алюминия наблюдали во множестве работ [3–9] в виде выбросов струй газа,

несущего высокодисперсные частицы, или в виде выбросов оптически разрешимых, сравнительно крупных частиц-фрагментов, в предельном случае — в форме звездообразного взрыва. Особенностью последнего является единовременный выброс множества фрагментов с симметричным разлетом в радиальном направлении от центра. Фрагментация обычно происходит, когда на поверхности горящей частицы имеется сформировавшийся оксидный колпачок. Выбросы фрагментов или струй из-под колпачка могут приводить к закрутке частицы [10, 11] и возмущениям траектории движения [2]. Очевидно, что фрагментация влияет на характеристики конденсированных продуктов горения частицы и на время горения. Возможное уменьшение времени горения может иметь практическое значение для эффективного использования металлического горючего в технических устройствах, однако количественная информация о фрагментации частиц алюминия в литературе отсутствует. Целью представляемой работы было получение данных о временах начала и окончания фрагментации алюминиевой частицы-агломерата и о количестве образуемых фрагментов.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Исследования [1, 2] и данной работы проведены с применением метода модельных агломератов [3], который позволяет получать горящие частицы контролируемого размера. Метод многократно описан, конкретная реализация (компоненты, образцы, постановка экспериментов) изложена в [1]. Здесь лишь напомним, что образец, генерирующий последовательно 8–12 горящих агломератов, был закреплен на высоте около 3 м от пола и горение частиц происходило в свободном падении. Горящие частицы-агломераты будем называть материнскими, чтобы отличать их от частиц-продуктов горения. Полет частиц регистрировали с помощью видеосъемки со скоростью 25 кадр/с, остатки горения собирали в поддон, установленный на полу. Видеозаписи преобразовывали в видеограммы — изображения, состоящие из последовательности пронумерованных кадров. В ходе покадровой обработки видеограмм определяли следующие параметры.

1. Количество выбросов фрагментов N_{frag} , отделившихся от материнской частицы. В проведенных опытах число N_{frag} варьировалось от 0 до 21, где $N_{frag} = 0$ означает отсутствие фрагментации.

2. По совокупности всех видеограмм вычисляли относительную долю фрагментирующихся частиц N_{fp}/N_p — отношение количества фрагментировавшихся агломератов N_{fp} к общему числу агломератов N_p .

3. Характерные времена — начало фрагментации t_{bf} , окончание фрагментации t_{ef} , начало стадии асимметричного горения t_{as} , окончание горения t_b . Времена t_{bf} и t_{ef} соответствуют первому и последнему кадрам, на которых видны выбросы фрагментов. Время горения t_b и длительность стадии симметричного горения t_{as} определяли и анализировали в [1] и [2] соответственно. Здесь сосредоточимся на характерных временах процесса фрагментации t_{bf} и t_{ef} . Заметим, что в проведенных экспериментах точность определения времен составляет $1/25$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры реализации фрагментации представлены на рис. 1. В отличие от титана [12, 13], фрагментация алюминиевых агломератов выражена слабо и проявляется в большинстве случаев в виде редких выбросов единичных фрагментов или струй. Звездообразные взрывы с одновременным выбросом множества фрагментов наблюдаются редко. Принципиальное отличие режимов состоит в следующем. В режиме единичных выбросов

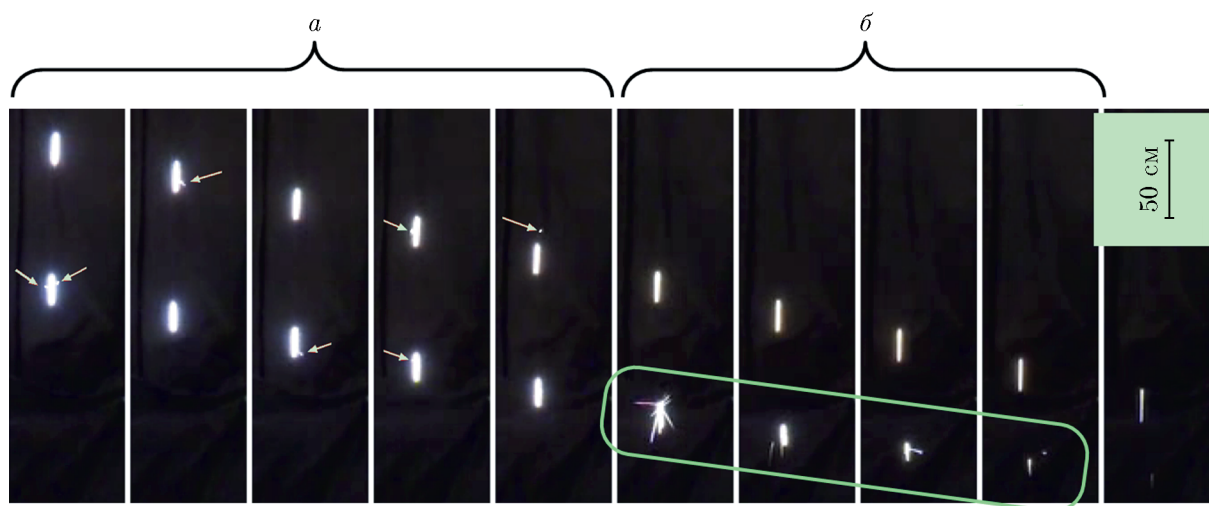


Рис. 1. Фрагмент видеogramмы движения и горения двух частиц-агломератов: светящиеся отрезки соответствуют смещению частицы за время экспозиции кадра ($1/25$ с); *a* — типичная фрагментация в виде единичных выбросов (указаны стрелками); *б* — сравнительно редко наблюдаемая фрагментация со звездообразным взрывом (очерчена прямоугольником)

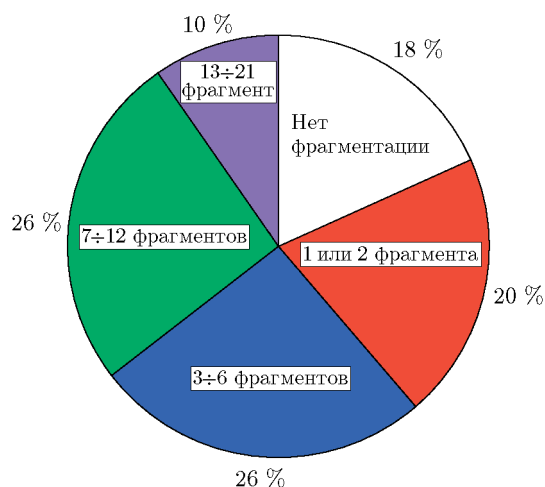


Рис. 2. Относительное количество агломератов, производящих то или иное количество фрагментов (среднее — 4 фрагмента, статистика по 86 частицам)

после горения остается крупная оксидная частица-остаток, в режиме взрыва крупный остаток отсутствует. Поскольку режим звездообразного взрыва реализуется сравнительно редко, в большинстве опытов число крупных частиц-остатков, отобранных в поддон, совпадало с начальным количеством материнских частиц.

На рис. 2 показана диаграмма, характеризующая статистику количества наблюдаемых фрагментов N_{frag} , отделяющихся от материнской частицы. Как видно, примерно $1/5$ агломератов (точнее, 0.18) не фрагментируют вовсе, т. е. относительная доля фрагментирующих частиц N_{fp}/N_p составляет 0.82. Примерно половина агломератов производят $1 \div 6$ фрагментов, что иллюстрируется рис. 1, *a*. Только $1/10$ часть агломератов фрагментирует в режиме звездообразного взрыва, как показано на рис. 1, *б*.

На рис. 3 представлены данные о количестве отделяемых фрагментов в зависимости от диаметра материнской частицы. Видно, что агломераты диаметром менее 250 мкм, как правило, не фрагментируют ($N_{frag} = 0$). В диапазоне размеров $250 \div 750$ мкм имеется тенденция увеличения количества фрагментов (или, с учетом данных рис. 1, числа

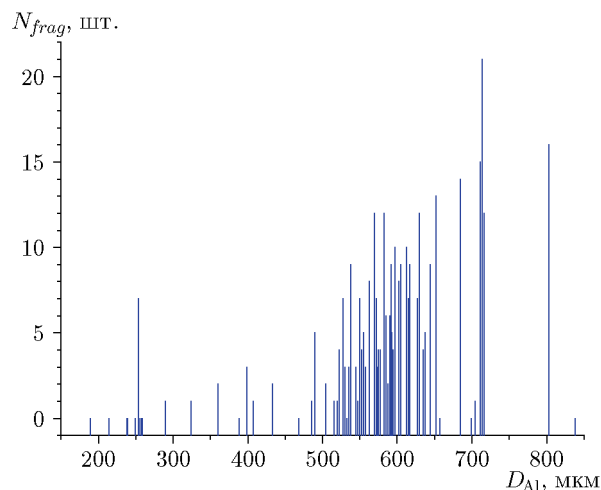


Рис. 3

Рис. 3. Количество наблюдаемых фрагментов как функция диаметра горячей частицы-агломерата

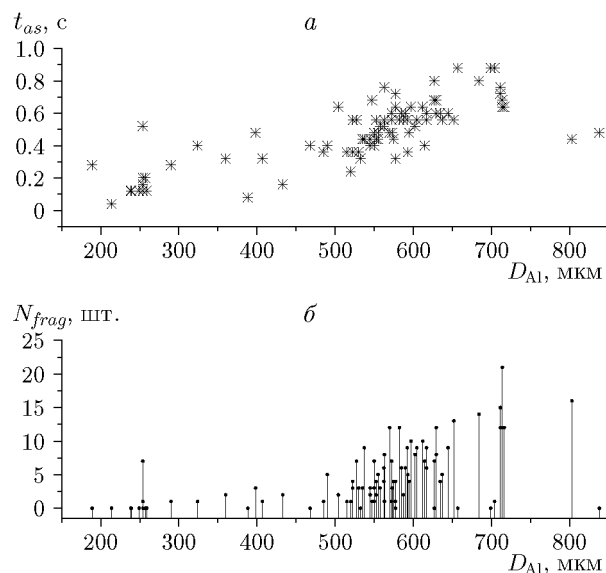


Рис. 4

Рис. 4. Сопоставление зависимостей длительности симметричной стадии горения (*a*) и количества выпускаемых фрагментов (*б*) от диаметра горячей частицы-агломерата

реализаций актов фрагментации, каждый из которых характеризуется единовременным выбросом нескольких фрагментов) с ростом диаметра частицы-агломерата. Склонность к «взрывной» фрагментации имеют частицы размером около 700 мкм. Для частиц крупнее 750 мкм статистика мала, поэтому нельзя с уверенностью говорить о сохранении указанной тенденции.

На рис. 4 график количества фрагментов $N_{frag}(D_{A1})$ с рис. 3 сопоставлен с графиком времени начала асимметричного горения $t_{as}(D_{A1})$ (оно же — длительность стадии симметричного горения [2]). Качественное сходство рисунков очевидно — размерная длительность стадии симметричного горения также возрастает с диаметром частиц D_{A1} . Иными словами, чем крупнее частица, тем позже она начинает фрагментировать, при этом фрагментация более выраженная (больше выбросов фрагментов). Известно [14], что структура агломерата включает в себя жидкие капли Al и Al_2O_3 и гипотетические газообразные продукты их взаимодействия. Поведение такого объекта определяется относительными объемами алюминия и оксида, эффектами сил поверхностного натяжения, пространственно распределенным (не сферически-симметричным вследствие наличия колпачка) тепловым потоком из зоны газофазной реакции, конвективным переносом тепла в объеме агломерата, а также прямыми и обратными связями между перечисленными процессами. Можно предположить, что в процессе горения периодически или однократно возникают условия для реализации возможности выхода газа из агломерата (например, вскрытие пузырей). Газообразные продукты горения могут образовываться в объеме частицы в результате химического взаимодействия конденсированного оксида с алюминием [14], а также пиролиза связующего, которое могло попасть в объем агломерата на этапе его формирования. Представляется, что для детализации представлений о поведении этой сложной системы будет полезно ее математическое моделирование [1, 11].

На рис. 5 показаны четыре варианта (*a*, *b*, *c*, *d*) треков горящих алюминиевых агло-

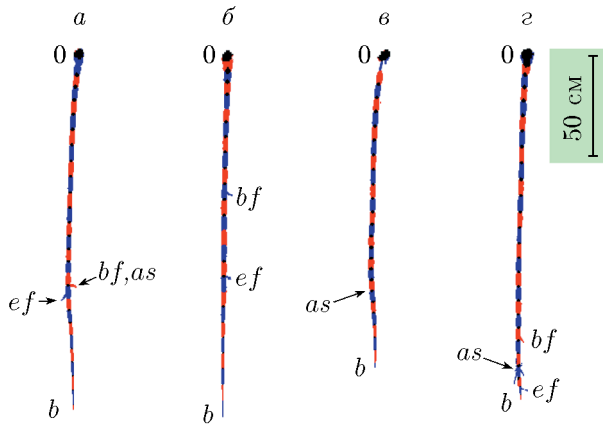


Рис. 5. Типичные варианты треков горящих алюминиевых агломератов: различные варианты реализации последовательности событий начала фрагментации bf и начала асимметричного горения as : рассчитанные диаметры частиц $D_{Al} = 595$ (а), 577 (б), 254 (в), 570 мкм (г)

мератов с указанием характерных событий. Использованы следующие обозначения: 0 — выход частицы из образца, bf — начало фрагментации, ef — конец фрагментации, as — начало асимметричного горения, b — конец горения. Эти же буквы bf , ef , as , b используются в качестве индексов для обозначения времен перечисленных событий (например, t_b — время горения). Каждый трек собран из отрезков-участков, взятых с последовательных кадров. Чтобы сохранить информацию о принадлежности участков трека к разным кадрам, участки рисуются чередующимся цветом. На треке рис. 5,а излом траектории совпадает с началом фрагментации, так что $t_{bf} = t_{as}$. Такая последовательность событий типична. Однако нередко наблюдается иная ситуация: на видеogramме отчетливо видно торможение горящей частицы, а выбросов фрагментов не заметно. Трек рис. 5,б иллюстрирует случай, когда фрагментация имеется, а возмущений трека не видно. В случае рис. 5,в, напротив, имеется искривление трека, а фрагментации не заметно. В случае рис. 5,г фрагментация происходит ближе к концу горения, причем во втором «акте» выбрасывается сразу несколько фрагментов. Их разлет близок к симметричному, поскольку трек искривляется незначительно. Горение заканчивается вскоре после последнего, третьего акта фрагментации, так что промежуток времени между событиями t_{ef} и t_b небольшой — звездообразная фрагментация приблизила конец горения.

Очевидно, что возмущения движения, такие как торможение частицы или искривление трека, связаны с выбросами массы из горящей частицы, и наличие колпачка является существенным фактором. Однако, как следует из анализа рис. 5, аномалии движения не всегда сопровождаются видимыми выбросами струй или фрагментов. Как указано в [2], выброс фрагмента в направлении «от наблюдателя» может быть скрыт за треком. Искривление трека в плоскости, проходящей через точку зрения наблюдателя и траекторию падения, также будет незаметно для наблюдателя. Также выбросы могут быть газовыми (без частиц).

На рис. 6 представлены результаты статистического анализа характерных времен t_{as} , t_{bf} , t_{ef} и t_b . Каждой частице соответствует вертикальный отрезок прямой, на котором в общем случае имеются четыре поперечных штриха-засечки. Ордината первого штриха (или начала отрезка, его нижняя точка) обычно соответствует времени начала асимметричной стадии горения t_{as} . Однако в ряде случаев фрагментация начинается раньше, чем аномалии трека, и тогда первая засечка соответствует времени t_{bf} , а вторая — времени t_{as} . Третья засечка — это обычно t_{ef} , последняя засечка (верхняя точка отрезка) всегда t_b . Засечек на отрезке может быть менее 4. Так случается, если фрагментация представлена одним выбросом ($N_{frag} = 1$), и тогда $t_{bf} = t_{ef}$ и второй и третий штрихи совпадают, а также если фрагментация отсутствует ($N_{frag} = 0$) либо отсутствует аномалия трека, и тогда соответствующее время t_{as} не определено и штрих отсутствует. Последний штрих — время

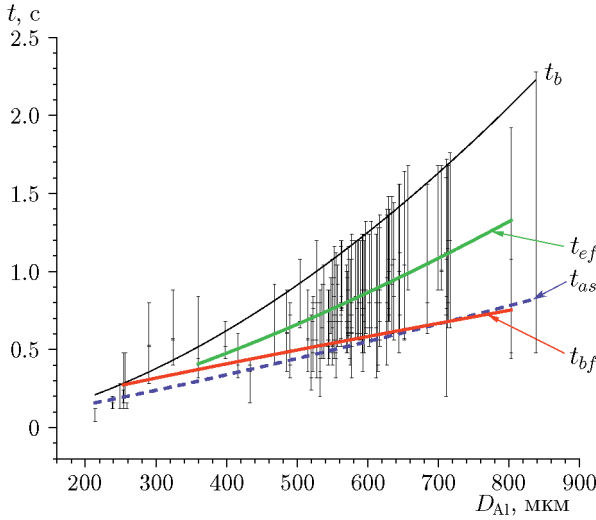


Рис. 6. Зависимости характерных времен t_{as} , t_{bf} , t_{ef} и t_b от диаметра частиц

Параметры аппроксимирующих зависимостей характерных времен от диаметра частицы

Событие	Зависимость (t — [с], D_{Al} — [мкм])	R^2	D_{Al} , мкм	n , шт.
as	$t_{as}(D_{Al}) = 2.44 \cdot 10^{-4} \cdot D_{Al}^{1.21}$	0.61	214 ÷ 838	84
bf	$t_{bf}(D_{Al}) = 2.1 \cdot 10^{-3} \cdot D_{Al}^{0.87924}$	0.27	254 ÷ 803	61
ef	$t_{ef}(D_{Al}) = 7.11404 \cdot 10^{-5} \cdot D_{Al}^{1.47035}$	0.71	360 ÷ 803	56
b	$t_b(D_{Al}) = 2.00 \cdot 10^{-5} \cdot D_{Al}^{1.73}$	0.91	214 ÷ 838	89

горения t_b — присутствует всегда, так что в предельном случае вертикальный отрезок может быть представлен единственным штрихом — своей верхней границей t_b . Соответствующие точки-штрихи аппроксимированы степенными зависимостями вида $t(D_{Al}) = xD_{Al}^y$ (см. таблицу), где t — время одного из событий bf , ef , as , b (с соответствующим индексом), x и y — параметры аппроксимации (константы), R^2 — коэффициент детерминации [15], n — число точек (обработанных материнских частиц)). Прокомментируем приведенные данные.

(1) Зависимость $t_b(D_{Al})$ была получена и проанализирована в [1] и здесь воспроизведена без изменений.

(2) При построении аппроксимирующей зависимости $t_{bf}(D_{Al})$ были использованы все опыты, в которых наблюдали фрагментацию, в том числе слабовыраженную с выбросом единственного фрагмента ($N_{frag} = 1$ и $t_{bf} = t_{ef}$). Обращает на себя внимание сравнительно низкое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.27$ для зависимости $t_{bf}(D_{Al})$. Оценим надежность корреляционной связи фактора D_{Al} и времени начала фрагментации t_{bf} с помощью критерия Фишера [15, 16]. Вычислим фактическое значение этого F-критерия: $F_{fact} = R^2 / (1 - R^2)(n - f - 1) / f = 22.3$. Здесь $n = 61$ — число экспериментальных точек, $f = 1$ — число факторов в аппроксимирующей зависимости. Табличное значение F-критерия для 95-й перценти при $n = 61$ и $f = 1$ согласно табл. 6 из работы [15, с. 458] составляет $F_{tabl} = 4$. Поскольку $F_{fact} = 22.3 > F_{tabl} = 4$, фактор D_{Al} признается статистически значимым для зависимости $t_{bf}(D_{Al})$. Для зависимостей $t_{as}(D_{Al})$, $t_{ef}(D_{Al})$, $t_b(D_{Al})$ значение коэффициента детерминации R^2 выше, так что сомнений в наличии корреляции не возникает. Вообще говоря, причиной низких значений R^2 являются ошибки измерений и вызванный ими разброс данных. Коэффициент корреляции признаков, на которые на-

ложены ошибки измерения, всегда ниже, чем коэффициент корреляции исходных признаков. Другими словами, ошибки измерения всегда ослабляют корреляционную связь между переменными, и это искажение тем больше, чем больше отношение дисперсий ошибок к дисперсии самих исходных переменных [16, с. 73].

(3) При построении зависимости $t_{ef}(D_{Al})$ опыты со слабовыраженной фрагментацией ($N_{frag} = 1$) были исключены из рассмотрения, так что зависимость $t_{ef}(D_{Al})$ построена только для опытов, в которых $t_{bf} < t_{ef}$ и $N_{frag} > 1$. Поэтому число точек n для соответствующих зависимостей времен событий bf и ef в таблице отличается.

(4) Явного соответствия времен начала фрагментации t_{bf} и наступления стадии асимметричного горения t_{as} не наблюдается. Вместе с тем очевидно, что физической причиной асимметричного горения и искривлений трека являются выбросы массы из горящей частицы. Отсутствие соответствия t_{bf} и t_{as} позволяет предположить, что выбросы массы могут осуществляться газовыми струями, невидимыми при обычной видеосъемке. По своей природе это пары алюминия, или газообразные продукты химического взаимодействия между конденсированными Al и Al_2O_3 в составе агломератов [14, 17], или продукты иных реакций, например реакции (P2) в [18]: $Al(r) + AlO(r) \rightarrow Al_2O(r)$. Состав названных газообразных продуктов в настоящее время неизвестен, однако в детальных кинетических механизмах реагирования алюминия обычно записываются соответствующие реакции. В качестве заключительного комментария к таблице подчеркнем, что полученные зависимости следует использовать только в указанных диапазонах размеров частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки треков 86 алюминиевых частиц-агломератов диаметром $215 \div 840$ мкм, горящих в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении, определены следующие количественные характеристики фрагментации. Фрагментации подвержены 82 % частиц. В 72 % случаев происходит выброс небольшого количества (от 1 до 12) единичных фрагментов в течение некоторого промежутка времени, и лишь в 10 % случаев наблюдается фрагментация в форме звездообразного взрыва с одновременным выбросом относительно большого количества (до 21) фрагментов. В таких случаях, вероятно, сокращается время горения частицы, однако количественные данные об этом эффекте отсутствуют. Агломераты диаметром менее 250 мкм, как правило, не фрагментируют. В диапазоне размеров $250 \div 750$ мкм наблюдается тенденция увеличения количества фрагментов; агломераты диаметром около 700 мкм имеют склонность к фрагментации в форме звездообразного взрыва с большим количеством фрагментов. Для характерных времен начала фрагментации t_{bf} и окончания фрагментации t_{ef} получены аппроксимирующие зависимости

$$t_{bf}(D_{Al}) = 2.1 \cdot 10^{-3} \cdot D_{Al}^{0.87924} (D_{Al} = 250 \div 800 \text{ мкм}),$$

$$t_{ef}(D_{Al}) = 7.11404 \cdot 10^{-5} \cdot D_{Al}^{1.47035} (D_{Al} = 360 \div 800 \text{ мкм}) (t - [c]).$$

Выбросы массы в виде струй или фрагментов есть основная причина аномалий движения (торможение, искривление траектории) горящих алюминиевых агломератов, которые связаны с началом стадии асимметричного горения, обусловленной накоплением оксида в форме колпачка на поверхности частицы. При этом явного соответствия времен начала фрагментации t_{bf} и наступления стадии асимметричного горения t_{as} не наблюдается. Это позволяет предположить, что выбросы массы, приводящие к аномалиям движения, могут осуществляться как в форме наблюдаемых отстрелов фрагментов, так и в форме невидимых при обычной съемке газовых струй.

Полученные данные свидетельствуют об относительно малом масштабе эффекта самопроизвольной фрагментации крупных агломератов алюминия. Следует изучить возможности целенаправленной интенсификации явления фрагментации с помощью, например, введения добавок в исходное металлическое горючее. Кандидатами на роль таких добавок могут быть легкокипящие или легковоспламеняющиеся металлы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Институту химической кинетики и горения (FWGF-2021-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С. Горение крупных частиц-агломератов алюминия в воздухе. I. Методика исследования, время горения и финальные оксидные частицы // Физика горения и взрыва. — 2025. — Т. 61, № 1. — С. 44–59. — DOI: 10.15372/FGV2023.9367. — EDN: CFVDEM.
2. Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С. Горение крупных частиц-агломератов алюминия в воздухе. II. Движение и стадии горения частиц // Физика горения и взрыва. — 2025. — Т. 61, № 4. — С. 95–112. — DOI: 10.15372/FGV2024.9442. — EDN: NIZQOT.
3. Glotov O. G. Method of Model Agglomerates and its application to study the combustion mechanisms of Al, Al + B, and Ti particles // Innovative Energetic Materials: Properties, Combustion Performance and Application. — Singapore: Springer, 2020. — P. 405–455. — DOI: 10.1007/978-981-15-4831-4_14.
4. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачёв В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.
5. Глотов О. Г., Жуков В. А. Эволюция 100-микронных алюминиевых агломератов и изначально сплошных алюминиевых частиц в пламени модельного твердого топлива. II. Результаты // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 61–70. — EDN: JZGCMZ.
6. Терещук В. С. О возможных причинах фрагментации горящих частиц Al // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 312, № 5. — С. 1122–1125.
7. Krier H., Burton R. L., Melcher J. C. The rates and structure of aluminum burning in a solid rocket motor environment // Techn. Rep., Depart. of Mech. and Indust. Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign. — 2001. — UILU-eng 2001-4012. — 2001.
8. Prentice J. L. Metal particle combustion // Progress Report, Naval Weapons Center, Activity of the Naval Material Command. — 1967. — AD839526.
9. Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А. Зажигание высокоэнергетического материала, содержащего ультрадисперсный порошок Al/B // Хим. физика. — 2022. — Т. 41, № 3. — С. 41–48. — DOI: 10.31857/S0207401X22030074. — EDN: LXIPNY.
10. Reshetnikov I. V., Karasev V. V., Valiulin S. V., Glotov O. G., Bykovskikh A. M. Model of rotation of burning aluminum droplets // Energetic Materials — Past, Present and Future. 50th Int. Annu. Conf. of the Fraunhofer ICT, Karlsruhe, Germany, 2019. — P. 125-1–125-4.
11. Reshetnikov I., Karasev V., Bykovskikh A., Glotov O. Dynamics of generation of nano-oxides during the burning of aluminum and titanium microparticles // 8th Europ. Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2019), Madrid, Spain, 2019. — P. 1–14. — DOI: 10.13009/EUCASS2019-892.
12. Глотов О. Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. II. Результаты экспериментов // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 58–71. — EDN: QASQQN.

13. **Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С.** Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. I. Экспериментальные методики, время горения и режимы фрагментации // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 6. — С. 20–31. — DOI: 10.15372/FGV20210603. — EDN: CFUUON.
14. **Бабук В. А., Низяев А. А.** К вопросу о формировании «полых» агломератов при горении смесевых твердых топлив // Хим. физика и мезоскопия. — 2016. — Т. 18, № 1. — С. 5–16. — EDN: VUEAYF.
15. **Афифи А., Эйзен С.** Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. — М.: Мир, 1982.
16. **Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д.** Прикладная статистика: Исследование зависимостей. — М.: Финансы и статистика, 1985.
17. **Бабук В. А., Будный Н. Л., Ивоненко А. Н., Низяев А. А.** Моделирование характеристик конденсированных продуктов в камере сгорания // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 3. — С. 55–63. — DOI: 10.15372/FGV20180306. — EDN: URTGWA.
18. **Бекстед М. В., Лианг У., Паддупаккам К. В.** Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 15–33. — EDN: MNQNRA.

Поступила в редакцию 19.01.2024.

После доработки 03.09.2024.

Принята к публикации 16.10.2024.
