

## СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.46

ЗАРЯДЫ И ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ —  
ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ АГЛОМЕРАТОВ АЛЮМИНИЯВ. В. Карасёв, А. А. Онищук, О. Г. Глотов, А. М. Бакланов,  
В. Е. Зарко, В. Н. ПанфиловИнститут химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск  
karasev@ns.kinetics.nsc.ru

Экспериментально исследованы дисперсные, структурные и электрофизические характеристики высокодисперсной фазы оксида алюминия, образующейся при горении капле-агломератов металла. Данные получены с помощью просвечивающей электронной микроскопии, а также системы видеорегистрации подвижности аэрозольных частиц в однородном электрическом поле. Аэрозольные частицы представляют собой агрегаты с размерами от долей до нескольких микрометров и фрактальной размерностью  $1,60 \pm 0,04$ , состоящие из первичных сферических частиц размерами от единиц до сотен нанометров. Большинство агрегатов имеют электрические заряды, как положительные, так и отрицательные. Характерный заряд агрегатов составляет несколько единиц элементарного заряда. Некоторые крупные агрегаты вращаются при смене полярности электрического поля, т. е. представляют собой диполи.

Согласно имеющимся представлениям [1, 2] высокодисперсный оксид образуется при горении жидких капель алюминия путем «химической» конденсации в зоне диффузионного микропламени, окружающего частицу. Микропламя локализуется на расстоянии порядка размера частицы от ее поверхности. Дальнейший коагуляционный рост оксидных частиц происходит в «дымовом хвосте», который формируется при движении частицы в несущем газовом потоке.

Распределение по размерам и морфология образующихся в результате конденсационно-коагуляционного роста аэрозольных частиц-микроагрегатов могут существенно зависеть от величины электрических зарядов, полученных первичными частицами при прохождении физико-химических стадий процесса горения [3].

В литературе имеется весьма ограниченная экспериментальная информация о зарядовых (электрофизических) и морфологических свойствах высокодисперсных частиц оксида алюминия, образующихся при горении алюминиевых капель [4]. В настоящей работе сдела-

на попытка частично восполнить имеющийся пробел.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Аэрозоль оксида алюминия получали в экспериментах с образцами алюминизированного ракетного топлива. Образцы, представляющие собой параллелепипеды длиной  $20 \div 25$  мм и сечением  $1 \times 1,5$  мм, сжигали в двадцатилитровой емкости в отфильтрованном от аэрозолей воздухе при атмосферном давлении. Масса алюминия в образцах составляла  $\approx 6$  мг. Горящая поверхность образца генерировала несколько десятков алюминиевых капле-агломератов размерами  $100 \div 500$  мкм, которые сгорали во время падения в емкости за время порядка десятых долей секунды. В результате в емкости накапливался высокодисперсный аэрозоль оксида алюминия. Отбор аэрозоля проводили через 6 мин после сжигания и далее анализировали его дисперсные, морфологические и зарядовые характеристики.

Дисперсный состав и морфологию аэрозольных частиц изучали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (JEM-100SX). Образцы для электронной микроскопии отбирали с помощью термопреципитатора.

Для наблюдения процессов движения и коагуляции аэрозолей, а также их поведения

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-03-32390) и фонда ИНТАС (код проекта 2000-00460).

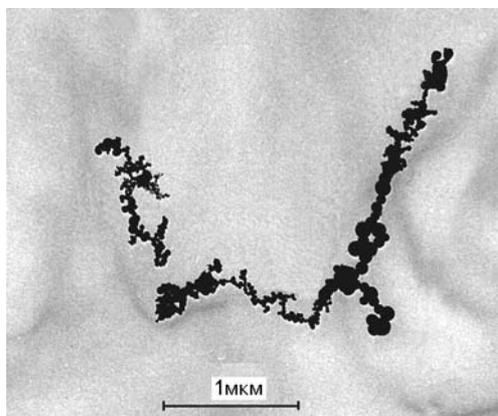


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение агрегатов  $\text{Al}_2\text{O}_3$

во внешнем электрическом поле использовали установку для видеорегистрации в реальном времени, состоящую из следующих основных узлов.

1. Специальная аэрозольная кювета, аналогичная описанной в [5] с оптическим рабочим объемом, находящимся между металлическими плоскопараллельными электродами. Кювета имеет окна для прохода лазерного луча и регистрации рассеянного на аэрозолях под углом  $90^\circ$  излучения.

2. Осветительная часть, состоящая из гелий-неонового лазера (мощностью 1 мВт) с фокусирующей оптикой.

3. Черно-белая видеокамера с микрообъективом, рисующим на светочувствительной матрице изображение участка рабочего объема с увеличением приблизительно в 15 раз. Общее пространственное разрешение системы «микрообъектив + ПЗС-матрица» составляет  $\approx 2$  мкм, глубина резкости — около 40 мкм, визуализируемое поле зрения в рабочем объеме кюветы — приблизительно  $300 \times 400$  мкм.

Для оценки величины и знака электрических зарядов на аэрозольных частицах оксида алюминия проводили видеорегистрацию их движения под действием постоянного однородного электрического поля напряженностью 160 В/см.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведены типичные электронно-микроскопические изображения агрегатов оксида алюминия. Как видно, агрегаты состоят из первичных сферических частиц размером

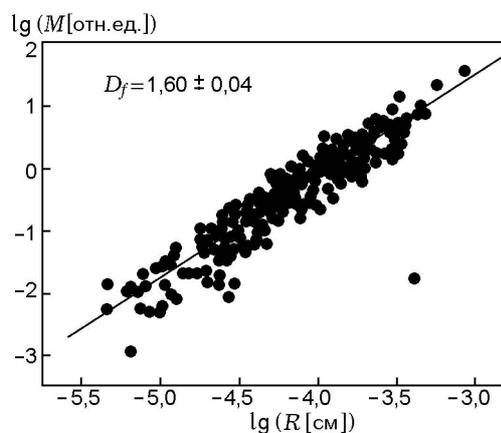


Рис. 2. Зависимость  $\lg M$  от  $\lg R$

от единиц до сотен нанометров. Размер агрегатов находится в диапазоне от десятых долей до нескольких микрометров. Для каждого агрегата определяли его эффективный радиус согласно выражению  $R = 0,5\sqrt{LW}$ , где  $L$  — максимальная длина,  $W$  — максимальный размер агрегата в направлении, перпендикулярном  $L$ . Путем детальной обработки снимков определяли общее число и распределение по размерам составляющих его «первичных» (сферических) частиц. На основе этих данных рассчитывали массу агрегата.

Структурные свойства подобных агрегатов принято характеризовать в терминах фрактальной размерности  $D_f$ . В соответствии с подходом [6] масса агрегата  $M$  связана с его размером  $R$  степенной зависимостью  $M \propto R^{D_f}$ . На рис. 2 представлена зависимость  $\lg M$  от  $\lg R$ . Видно, что экспериментальные точки удовлетворительно аппроксимируются прямой с наклоном  $D_f = 1,60 \pm 0,04$ . Это значение фрактальной размерности заметно ниже величины 1,8, которая соответствует модели агрегации кластер — кластер, лимитируемой

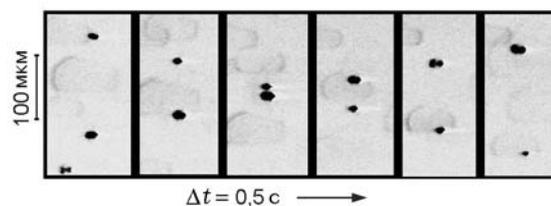


Рис. 3. Видеокадры движения двух агрегатов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в вертикальном электрическом поле: положительно заряженный агрегат движется вниз

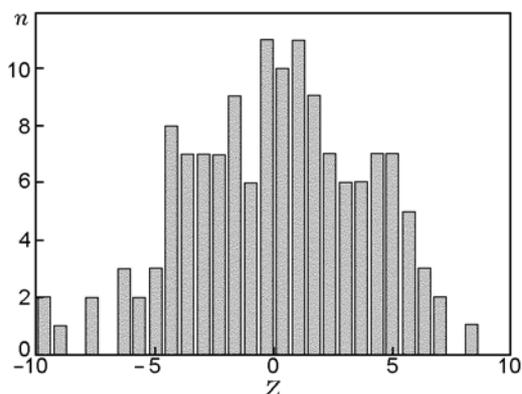


Рис. 4. Гистограмма распределения зарядов на агрегатах ( $n$  — количество агрегатов)

броуновской диффузией [6]. Можно предположить, что коагуляция изучаемых аэрозольных частиц происходит с участием дальнедействующих сил, например, электрической природы. Как известно [6], это может приводить к формированию «цепочечных» агрегатов.

Анализ результатов изучения движения частиц (рис. 3) в электрическом поле показал, что большинство частиц-агрегатов имеют электрические заряды, причем около половины заряжены положительно, а оставшаяся часть — отрицательно. На рис. 4 приведено распределение зарядов на агрегатах. Величину заряда агрегата оценивали, исходя из скорости его движения в электрическом поле при стоксовском законе обтекания. Оценку проводили по формуле  $EeZ = 6\pi k\eta Rv_E$ , где  $E$  — напряженность электрического поля,  $e$  — заряд электрона,  $Z$  — число элементарных зарядов на агрегате,  $\eta$  — динамическая вязкость воздуха,  $v_E$  — установившаяся скорость движения под действием поля,  $k$  — поправочный множитель, учитывающий морфологию агрегатов [3].

При оценке величины заряда в качестве размера агрегата использовали средний размер, определенный с помощью электронной микроскопии. Таким образом, полученное распределение по зарядам является приблизительным и может быть использовано лишь для первичной оценки величины заряда агрегата. Как следует из рис. 4, характерный заряд агрегата по абсолютной величине составляет несколько элементарных зарядов.

В опытах было зарегистрировано вращение отдельных крупных агрегатов при смене полярности поля. Следовательно, некоторые

агрегаты являются диполями, и по характеру вращения можно будет оценить распределение зарядов на них.

Отметим, что полученные данные соответствуют аэрозолю оксида алюминия с временем жизни около 6 мин. В работе [4] представлены результаты исследования свойств высокодисперсного оксида алюминия, полученного в результате горения исходных частиц металла размером  $4 \div 6$  мкм в ламинарном дисперсном факеле. Найдено, что частицы оксида имеют размеры  $0,07 \div 0,14$  мкм и положительный заряд величиной 20 элементарных единиц. Предполагается, что эти параметры аэрозольной фазы соответствуют высокотемпературной зоне газодисперсного факела. Очевидно, что прямое сравнение данных, полученных в настоящей работе и работе [4], затруднено из-за существенного различия в условиях проведения опытов. Поэтому для исследования эволюции высокодисперсного оксида алюминия во времени и получения более полной информации о механизме трансформации спектра размеров требуется проводить эксперименты в специальной постановке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бахир Л. П., Левашенко Г. И., Таманович В. В. Влияние химического состава металлизированных топлив на дисперсный состав, оптические характеристики частиц окислов и излучательную способность пламени // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 6. С. 10–16.
2. Bucher P., Ernst L., Dryer F. L. et al. Detailed studies on the flame structure of aluminum particle combustion // Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 185 / Ed. by P. Zarchan. Reston, Va: AIAA Inc., 2000. Ch. 2.19. P. 689–722.
3. Onischuk A. A., di Stasio S., Karasev V. V. et al. Evidence for long-range Coulomb effects during formation of nanoparticle aggregates from pyrolysis and combustion routes // J. Phys. Chem. A. 2000. V. 104. P. 10426–10434.
4. Золотко А. Н., Вовчук Я. И., Полетаев Н. И. и др. Синтез нанооксидов в двухфазных ламинарных пламенах // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 24–33.
5. Фукс Н. А., Петрянов И. В. Определение размера и заряда частиц в туманах // Журн. физ. химии. 1933. Т. 4. С. 567–571.
6. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991.