

СИНТЕЗ НАНООКСИДОВ

УДК 536.46

В ДВУХФАЗНЫХ ЛАМИНАРНЫХ ПЛАМЕНАХ

А. Н. Золотко, Я. И. Вовчук, Н. И. Полетаев,
А. В. Флорко, И. С. Альтман

Одесский государственный университет им. И. И. Мечникова,
270100 Одесса, Украина

В работе рассмотрен метод получения нанопорошков оксидов тугоплавких металлов при сжигании исходных порошков металлов в ламинарном дисперсном факеле. Метод назван газодисперсным синтезом. Экспериментально исследована структура зоны горения ламинарных диффузионного дисперсного факела и факела на предварительно перемешанных горючем и окислителе. Получена информация о температуре газообразных продуктов сгорания и ее пространственном распределении, температуре горящих частиц и конденсированных продуктов сгорания, режимах горения частиц металлов. Исследуется зависимость свойств получаемых оксидов от параметров факела и зоны горения, а также механизма горения частиц. На основе полученных результатов сделана попытка восстановить механизмы образования и роста конденсированной фазы в условиях ламинарных диффузионных факелов. Проведена расчетная оценка среднемассового размера частиц порошков оксидов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия изучение процессов горения в дисперсных системах металл (частицы, газовзвеси, засыпки) — газообразный окислитель велось для решения прикладных проблем энергетики, пожаро- и взрывобезопасности. При этом основное внимание уделялось выяснению механизмов воспламенения, горения, распространения пламени в дисперсных системах с целью оптимизации режимов их сжигания в силовых установках или обеспечения условий пожаробезопасности работы с металлическими порошками. Иными словами, исследуемые металлы (Mg, В, Al, Zr и т. д.) рассматривались прежде всего как мощные источники тепловыделения. Вопросы, связанные с образованием конденсированной фазы при горении, с ее количеством, составом и свойствами, интересовали в основном в плане решения проблем двухфазных и радиационных потерь в камерах сгорания.

В последние годы актуальным стал новый аспект горения металлов — технологический, т. е. возникли задачи получения не столько тепла, сколько продуктов сгорания. Мощным толчком в развитии технологического горения стал метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1], с помощью которого удалось получить широкий спектр целевых продуктов сгорания — ценных и сравнительно дешевых материалов.

Однако СВС-технология имеет и ряд недостатков. Так, получение ультрадисперсных дезагрегированных порошков сферических частиц (например, оксидов разных металлов) в

непрерывном режиме традиционным СВС-методом крайне затруднено. В то же время такие материалы имеют весьма широкую сферу применения: это компоненты перспективных видов керамики, в том числе гибкой, стекол, материалов электронной и вычислительной техники, красителей, абразивов, биофильтров, компаундов, люминофоров, адсорбентов, катализаторов, термостойких антикоррозионных и оптических покрытий и т. д.

Традиционно порошкообразные материалы получают следующими (обычно многостадийными) способами: кристаллизацией солей, зольно-гельными процессами, криохимическими технологиями, переконденсацией материалов при лазерном или плазмохимическом воздействии. Чаще всего это полидисперсные порошки с широким спектром частиц неправильной формы (размер частиц от 0,5 до 50 мкм) и чистотой до 99 % [2–9]. Однако известно, что наиболее надежные изделия из порошкообразных материалов-оксидов получают на основе нанофазных порошков, т. е. высокодисперсных, хорошо дезагрегированных, обладающих узким гранулометрическим составом порошков частиц сферической формы и размерами $< 0,1\text{--}0,3$ мкм [10]. Порошки, близкие по свойствам к нанопорошкам, получают плазменным путем — это чистые оксиды с размером сферических частиц в сотни ангстрем. Но этот метод располагает слабыми возможностями по вариации дисперсного состава, требует больших энергозатрат и не является непрерывным.

В этой связи интерес представляет разработанный метод прямого получения нанопорошков оксидов металлов как продуктов сжигания исходных порошков металлов в ламинарном дисперсном факеле [11–13]. Этот метод, названный газодисперсным синтезом, сулит выгоды в экономическом и экологическом отношении и позволяет получать в непрерывном режиме высококачественные оксиды любых металлов, для которых возможно создать стабилизированный ламинарный факел [13]. Речь идет о стационарном двухфазном двухкомпонентном факеле (порошок металла и газообразный окислитель) без пламени-сопроводителя.

Экспериментальная установка, позволяющая получать и исследовать ламинарные стационарные пылевые факелы, работает как при отдельной подаче дисперсного горючего и газообразного окислителя, так и при подаче предварительно перемешанной горючей смеси [14]. Применявшиеся исходные порошки металлов имели практически одинаковую дисперсность $d_0 \approx 4 \div 6$ мкм.

В работе основное внимание уделялось анализу свойств и физических причин возникновения конденсированных продуктов сгорания.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

В процессе экспериментов со всеми металлами оказалось возможным получить две резко отличающиеся по дисперсности фракции конденсированных оксидов: крупную, с размером сферических частиц, близким к размеру частиц, нанооксидов следующих структурных модификаций: Al_2O_3 — высокотемпературная γ -модификация, ZrO_2 — смесь кубической и моноклинной модификаций, Fe_2O_3 — смесь гематита и магелита. Образование крупных фракций оксидов наблюдается на диффузионных факелах. Нанооксиды всех исследованных металлов получены на богатых кислородом, высокотемпературных факелах предварительно перемешанной смеси. Исключение составляет алюминий, нанооксиды которого возможно получать и в диффузионном факеле.

Типичные фотографии порошков различных металлов представлены на рис. 1 для

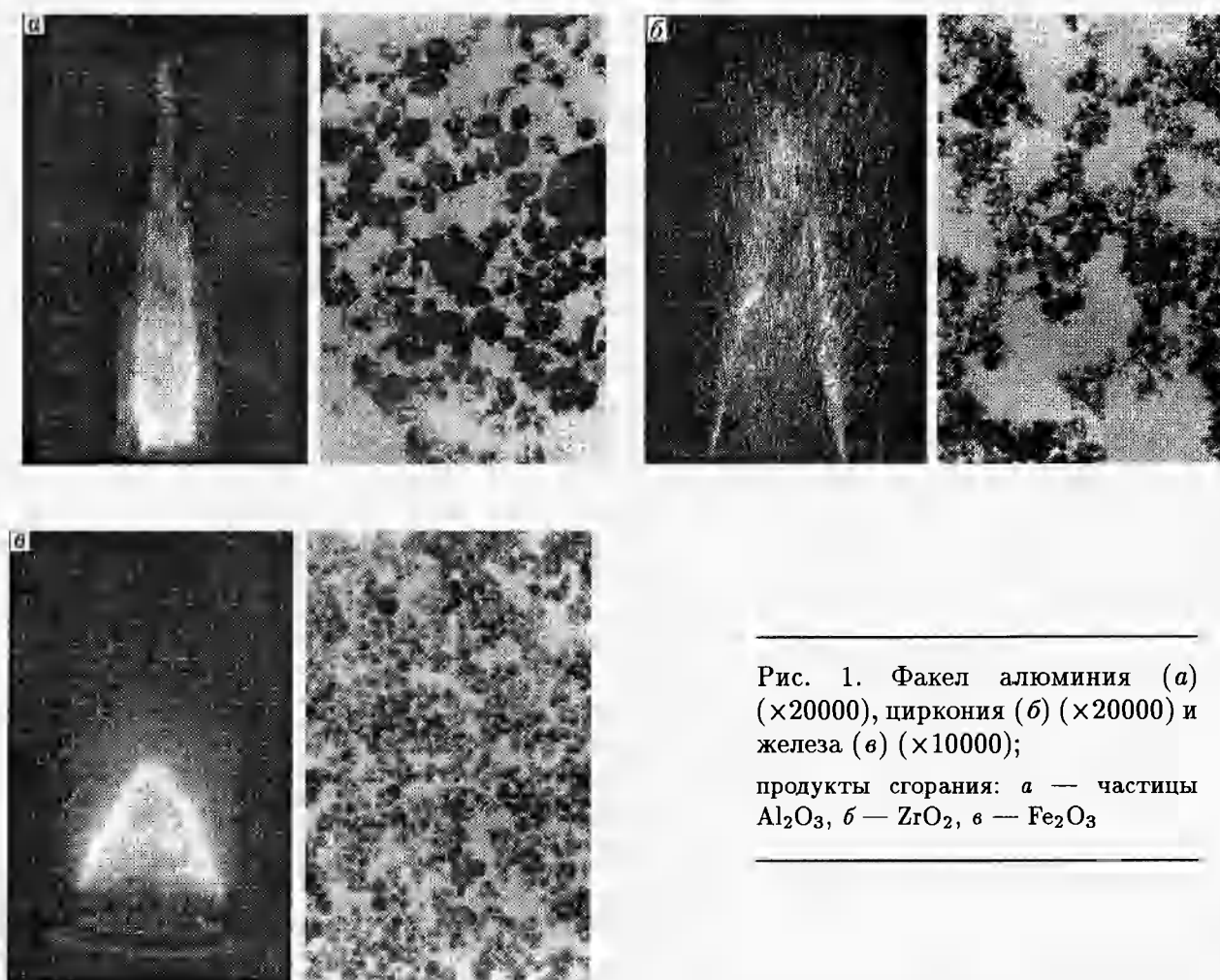


Рис. 1. Факел алюминия (а) ($\times 20000$), циркония (б) ($\times 20000$) и железа (в) ($\times 10000$);

продукты сгорания: а — частицы Al_2O_3 , б — ZrO_2 , в — Fe_2O_3

Al, Zr, Fe. Здесь же приведен внешний вид частиц наноксидов¹. Их распределение по размерам представлено на рис. 2.

Статистическая обработка экспериментальных данных по свойствам полученных наноксидов и влияния условий синтеза на их дисперсный состав позволила сформулировать следующие характерные особенности синтеза.

1. Дисперсности наноксидов различных металлов близки, наиболее вероятные размеры частиц лежат в диапазоне 0,03–0,10 мкм.

2. Выход наноксидов при сгорании металлов в факеле предварительно перемешанной смеси составляет $\sim 95\text{--}98\%$ при чистоте продукта $> 99\%$ (при технологическом синтезе крупная фракция отсеивается с помощью циклона).

3. Вариация концентрации окислителя и горючего и его дисперсности слабо влияет на величину наиболее вероятного размера частиц наноксидов, но несколько меняет кривую распределения этих частиц по размерам.

Для понимания причин образования высокодисперсных продуктов сгорания, слабой чувствительности их свойств к внешним воздействиям следует ответить на следующий

¹Седиментационный анализ продуктов сгорания проводился В. И. Шевцовым (ИХФ РАН, Черногловка). Дисперсный анализ продуктов сгорания проводился на электронном микроскопе В. И. Шевцовым, В. В. Богдановой (НИИФХП БГУ, Минск) и Д. Г. Нижнером (НИИФ ОГУ, Одесса).

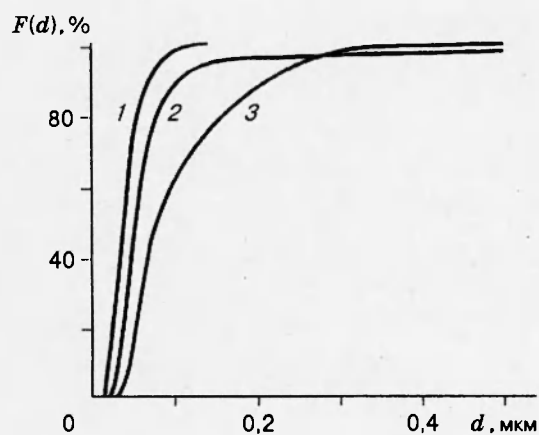


Рис. 2. Распределение частиц по размерам:

1 — частицы ZrO_2 , 2 — Al_2O_3 , 3 — Fe_2O_3

вопрос: какие физические или химические факторы определяют образование и рост конденсированной фазы (к-фазы)? Применительно к горящим одиночным частицам металла (алюминия, магния) эта проблема решалась в теоретических работах [15, 16]. В работе [15] на примере алюминия была заложена идея химической конденсации: капля металла горит с образованием неполного газообразного окисла (субокисла), который в объеме вокруг капли адсорбируется на центрах конденсации, где затем доокисляется до полного продукта. Скорость роста частицы к-фазы пропорциональна числу ударов молекул субокисла о поверхность растущей частицы конденсата. Такая схема образования к-фазы при горении непротиворечива, не привязана к существованию паров окисла (как, например, модель гомогенной конденсации [16]) и может быть применена к любому металлу, образование конденсированного оксида которого идет через промежуточный газообразный окисел.

Однако привлечение расчетной схемы [15] к объяснению полученных результатов вызывает ряд вопросов. Во-первых, предсказать из схемы какие-либо функциональные связи дисперсности к-фазы с макропараметрами системы (что необходимо для управления свойствами конечного продукта) крайне сложно. Во-вторых, дисперсность к-фазы, полученная по модели [15] ($l \sim 1$ мкм), значительно ниже наблюдаемой в эксперименте ($l \approx 0,07$ мкм).

Причина такого расхождения, возможно, в том, что модель не учитывает факторов взаимовлияния горящих частиц при факельном сжигании газозвесей частиц горючего и (это, видимо, главное) электрофизических аспектов их горения.

Для того, чтобы грамотно интерпретировать результаты факельного эксперимента с привлечением модели химической конденсации, следует получить дополнительную информацию о структуре зоны горения факела.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ ФАКЕЛА

Изучение ламинарного диффузионного дисперсного факела проводилось оптико-спектральными методиками, подробно изложенными в работах [17–21]. Ниже приведены результаты измерений структуры фронта горения факела Al.

Видно, что горение частиц Al следует рассматривать как коллективное: на ширине фронта горения факела одновременно реагируют ~ 10 частиц, и их взаимовлияние проявляется двояко. В тепловом отношении — это саморазогрев системы, что интенсифицирует процесс горения. В то же время заметным становится выгорание окислителя с

соответствующим торможением процесса.

О механизме горения индивидуальной частицы можно сказать следующее: реагирование алюминия происходит парофазно с образованием промежуточного газообразного оксида в зоне горения частицы и последующим его доокислением до полного оксида (конденсированного) на центрах конденсации. Об этом свидетельствуют измеренная температура частицы, совпадающая с температурой кипения металла, и наличие в спектрах излучения атомарных линий паров алюминия и молекулярных полос (зафиксированы полосы AlO).

Роль центров конденсации, на которых происходит рост конденсированного оксида Al_2O_3 , играют, по-видимому, отрицательные ионы O_2^- , концентрация которых совпадает с концентрацией частиц оксида и на один-два порядка превосходит концентрацию всех прочих ионов.

Массовая концентрация горючего	$4 \cdot 10^{-4}$	г/см ³
Скорость течения газа во фронте факела	60 ± 10	см/с
Ширина фронта	$0,12 \pm 0,02$	см
Концентрация частиц алюминия во фронте	$(1,7 \pm 0,9) \cdot 10^6$	см ⁻³
Среднее расстояние между частицами	0,008	см
Температура частиц алюминия	2850 ± 100	К
Температура зоны реакции частицы	3500 ± 150	К
Температура к-фазы	3100 ± 100	К
Температура газа в объеме фронта	3150 ± 150	К
Радиус зоны реакции частицы алюминия	$(6-8) \cdot 10^{-4}$	см
Диаметр частицы алюминия $(\langle d^2 \rangle)^{1/2}$	5,2	мкм
Время горения*	$5 \cdot 10^{-4}$	с
Концентрация частиц Al_2O_3	$(2 \pm 1) \cdot 10^{11}$	см ⁻³
Равновесная концентрация ионов O_2^-	$(1-2) \cdot 10^{11}$	см ⁻³
Размер частиц Al_2O_3 : наиболее вероятный d	0,07	мкм
среднемассовый $(\langle d^3 \rangle)^{1/3}$	0,14	мкм
Зарядовое число (+) частиц Al_2O_3 , Z	20	

* Расчетное значение, полученное из диффузионной модели горения частицы с учетом выгорания окислителя.

ОЦЕНКА ДИСПЕРСНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

Опираясь на результаты анализа структуры зоны горения факела, проведем оценку дисперсности нанопродуктов сгорания изучаемых металлов. Рассмотрим простейшую схему образования к-фазы в следующих предположениях.

1. Горение индивидуальных частиц всех исследованных металлов протекает в диффузионном режиме газофазно, через промежуточный газообразный окисел. Этот тезис подтверждается результатами спектрального анализа и данными [22-29].

2. Кинетика адсорбции молекул субоксида на поверхности и химической реакции доокисления не лимитирует процесса роста частицы.

В пользу второго предположения свидетельствует тот факт, что полученные в богатых кислородом высокотемпературных факелах наноксиды разных металлов, частицы которых сгорают по разным химическим схемам, имеют близкую дисперсность. Это дает основание предполагать, что не химические, а физические процессы в пламенах ответственны за образование субдисперсной к-фазы. Вероятно, что таковыми являются электрофизические процессы.

3. Взаимовлияние частиц газозвеси при горении учитывается следующим образом: каждая частица металла горит в присоединенном объеме газа, величина которого определяется содержанием окислителя в исходной газозвеси. Присоединенный объем адиабатичен и непроницаем для газовых потоков.

4. Химическая конденсация одновременно протекает во всем присоединенном объеме.

5. Рост частиц к-фазы происходит в течение времени горения частицы металла.

6. Горящая система рассматривается как низкотемпературная плазма с конденсированной дисперсной фазой. Заряженные частицы являются активными центрами гетерогенной конденсации. Частицы к-фазы приобретают положительный заряд за счет термоэлектронной эмиссии.

С учетом всего сказанного рост частицы оксида можно рассматривать следующим образом. Диффузионно горящая частица металла поставляет продукты сгорания в присоединенный объем газа, условно разбитый на элементарные ячейки с характерным размером последней, близким к дебаевскому радиусу экранирования по электронной компоненте. В каждой ячейке находится одна растущая оксидная частица, потребляющая субокислы. Такой подход позволяет оценить число конденсированных частиц в присоединенном объеме, а следовательно (из уравнения массового баланса), и характерный размер частиц оксида.

Обоснуем количественно предлагаемый подход, базируясь на результатах экспериментов [30]. В соответствии с такой моделью отношение радиуса Дебая r_D к среднему расстоянию между частицами $N_k^{-1/3}$ должно быть порядка единицы (N_k — концентрация частиц к-фазы). Значение $r_D/N_k^{-1/3} = 1,1 \pm 0,30$, полученное по данным экспериментов для частиц Al_2O_3 , отвечает в пределах ошибок рассматриваемой модели.

Обратимся к системе уравнений, позволяющей провести оценки концентрации N_k , зарядового числа Z и среднемассового размера частиц оксида r :

$$N_k = \frac{1}{r_D^3} = \left(\frac{4\pi N_k Z e^2}{kT} \right)^{3/2}, \quad (1)$$

$$B \equiv N_k r^3 = \frac{3C_m \nu}{4\pi \rho_{ox}}, \quad (2)$$

$$Z \equiv r \frac{kT}{e^2} \ln \frac{K}{ZN_k}, \quad (3)$$

где

$$K \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{W}{kT} \right);$$

C_m — массовая концентрация металла в несущем газе, ν — стехиометрический коэффициент реакции окисления металла до полного оксида, ρ_{ox} — плотность оксида, W — работа выхода с поверхности к-частицы.

Уравнение (2) выражает условие массового баланса. Формула (3), полученная в [31], позволяет связать средние зарядовые числа к-частиц с их размером. Совместно с уравнением (1), отражающим концепцию модели, уравнения (2) и (3) образуют замкнутую систему для нахождения N_k , Z , r . В результате получаем среднемассовый радиус

$$r = A^{-1/2} B^{1/3} \exp \left(\frac{1}{8\pi B^{1/3}} \right), \quad (4)$$

Оксиды	$N_k \cdot 10^{-17}, \text{м}^{-3}$		Z		$((d^3))^{1/3}, \text{мкм}$		$T_k, \text{К}$ (эксперим.)	$T_{ad}, \text{К}$ (расчет)
	расчет	эксперим.	расчет	эксперим.	расчет	эксперим.		
Al_2O_3	2,9	2	22	20	0,09	0,14	3100 ± 100	3300
ZrO_2	15	—	10	—	0,03	0,05	2900 ± 100	3500
Fe_2O_3	4	—	5	—	0,04	0,05	1850 ± 100	2300

Примечание. Исходные характеристики газозвесей металлов Al, Zr, Fe: $C_m \cdot 10^3 = 0,42, 0,8, 0,8 \text{ г/см}^3$ и $((d_m^2))^{1/2} = 5,2, 4,5, 4,5 \text{ мкм}$ соответственно.

где

$$A \equiv K \frac{4\pi e^2}{kT}.$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных, приведенных в таблице, показывает их удовлетворительное согласование. К этому добавим следующее. Достаточно обширный эксперимент с порошками Al показал, что вариация макропараметров взвеси ($C_m = 0,22 \div 0,68 \text{ мг/см}^3$, $d_0 = 4 \div 14 \text{ мкм}$, мольная доля O_2 в несущем газе $m_{\text{O}_2} = 0,5 \div 25 \%$) практически не меняет наиболее вероятного размера частиц и крайне слабо влияет на величину среднемассового размера. Наиболее заметно воздействие добавки кислорода в несущий газ: дисперсные распределения становятся меньше, $((d^3))^{1/3} = 0,14 \div 0,08 \text{ мкм}$ при $m_{\text{O}_2} = 0,5 \div 25 \%$. Причина столь слабой роли макропараметров в изменении дисперсности оксидной к-фазы заключается, видимо, в том, что основные процессы, определяющие образование к-фазы, происходят вблизи горящих частиц металла, в микропламенах. Повлиять же существенно на структуру микропламен изменением внешних параметров в условиях газозвеси, где силен эффект коллективного теплового взаимодействия, не удастся.

На рис. 3 представлена зависимость среднекубического размера частиц оксида алюминия от температуры и концентрации металла, рассчитанная по формуле (4). Как видно из рис. 3, наиболее существенным фактором процесса является температура частиц к-фазы, на которых идет доокисление субокислов. Роль параметра C_m слаба, концентрация окислителя, давление и размер частиц горючего в явном виде в формулу (4) не входят, и их влияние на дисперсность к-фазы проявляется опосредованно, через температуру горения. Однако спектральные измерения температуры конденсированных продуктов вблизи горящих частиц металлов дают в разных экспериментах отличия, не выходящие за пределы точности измерений. Оценка (по расчетной модели) дисперсности оксида алюминия при изменении температуры в пределах точности эксперимента ($2950 \div 3250 \text{ К}$) дает значения размера частиц $0,14 \div 0,07 \text{ мкм}$ соответственно. Все имеющиеся опытные данные по дисперсности оксидов попадают в этот интервал. Максимальная дисперсность к-фазы для оксида алюминия может быть достигнута при температуре частиц оксида, равной температуре его кипения (3240 К). Оценка в этом случае дает $((d_m^3))^{1/3} = 0,07 \text{ мкм}$, что неплохо согласуется с данными по влиянию на размеры частиц добавок O_2 в несущий газ (при $m_{\text{O}_2} = 25 \%$ значение $T_{ad} \approx 3500 \text{ К}$).

С позиций электрофизики влияние температуры на дисперсность к-фазы проявляется через термоэмиссию электронов с поверхности растущих оксидных частиц. Рост T увеличивает концентрацию электронов в присоединенном объеме и соответственно уменьшает радиус Дебая. Тогда число ячеек в объеме растет, масса продуктов сгорания, приходящаяся на одну ячейку, уменьшается, что приводит к росту дисперсности оксида. Таким же

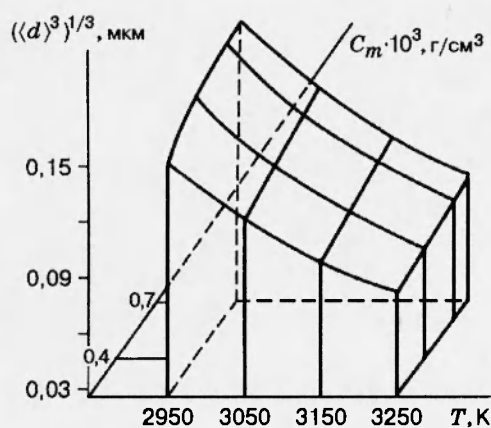


Рис. 3. Расчетная дисперсность оксида алюминия

образом можно объяснить слабое уменьшение дисперсности оксида с ростом концентрации горючего в факеле (остальные параметры остаются неизменными). Рост C_m дает уменьшение присоединенного объема и соответственно числа ячеек. При этом масса продуктов сгорания, приходящаяся на одну ячейку, растет, что приводит к росту частицы к-фазы до большего размера.

Естественно, столь упрощенная модель не дает возможности оценить влияние внешних параметров на распределение частиц оксидов по размерам. Однако легко предположить, что малая дисперсия распределения обусловлена ламинарным режимом факела, обеспечивает приблизительно одинаковые условия для большей части горящих частиц металла. Появление крупных частиц (> 1 мкм) обусловлено, по мнению авторов, турбулизацией вершины факела и, возможно, гетерогенным режимом горения отдельных частиц.

Подводя итог изложенным выше результатам, можно сказать, что метод газодисперсного синтеза весьма перспективен для получения уникальных по своим свойствам наноксидов различных металлов и может быть применен для получения шпинелей, халькогенидов, галогенидов, а при некотором усовершенствовании, и нитридов металлов. Достигнуто понимание, по крайней мере на качественном уровне, сущности процессов образования конденсированных оксидов в зоне горения дисперсного ламинарного факела. Однако очевидно, что в полной мере эти процессы еще не изучены, и необходимы последующие шаги к более глубокому пониманию всей совокупности физических и химических факторов, определяющих образование конденсированной фазы при горении металлов.

Можно очертить круг задач, решение которых является, на взгляд авторов, первоочередным. К ним следует отнести: учет неравновесности состояния конденсирующейся системы и нестационарности процессов, что определит влияние градиентов температуры и концентрации компонентов и их эволюции во времени в пространстве вокруг горячей частицы; роль конечных скоростей активированных процессов, протекающих при образовании и росте конденсированных продуктов сгорания. Открытым остается вопрос и о причинах формирования конкретного фазового состава наноксидов и о возможности его регулирования. Более совершенная модель процесса должна снять сделанные допущения и ограничения и дать количественную картину процесса образования нанофазных продуктов сгорания металлов.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность сотрудникам лаборатории и коллегам В. Г. Шевчуку, И. В. Шарфу, Л. В. Бойчук, Ю. Л. Шошину, Т. А. Яковлевой за помощь, оказанную при выполнении работы, и полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез // Физическая химия. Современные проблемы. М.: Химия, 1983. С. 6–45.
2. А. с. № 1175871, СССР. Способ получения ZrO_2 .
3. А. с. № 255225, СССР. Способ получения красной окиси Fe.
4. А. с. № 1330923, СССР. Способ получения Al_2O_3 .
5. Заявка № 56-9448, Япония. Способ получения Al_2O_3 для производства керамики.
6. Экономический патент № 232907, ГДР. Способ получения порошкообразного оксида циркония.
7. Заявка № 2578241, Франция. Стабилизированный диоксид циркония, способ его получения и применение в керамических составах.
8. Заявка № 1520756, Великобритания. Способ получения $\gamma = Fe_2O_3$.
9. Патент № PS 2455034, ФРГ. Способ получения диоксида титана.
10. Браун А. С. Керамику учат гнуться, но не ломаться // Аэрокосм. техника. 1991. № 3. С. 132.
11. Агеев Н. Д., Вовчук Я. И., Горошин С. В. и др. Способ получения ультрадисперсного порошка оксида металла. Положительное решение на заявку № 4936888/26(041343) от 16 мая 1991 г.
12. Агеев Н. Д., Буйновский С. Н., Вовчук Я. И. и др. Ламинарный диффузионный двухфазный факел // Первый Всесоюз. симпоз. по макрокинетике и химической газодинамике. Алма-Ата, 1984. Т. 2, ч. 1. С. 353.
13. Shevchuk V. G., Boychuk L. V., Goroshin S. V., Kostyshin Yu. N. Comparative research of the flame propagation in boron and Al, Mg, Zr, Fe, dust clouds // Second Int. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion. Lampoldshausen, Germany, 1991.
14. Агеев Н. Д., Вовчук Я. И., Горошин С. В. и др. Стационарное горение газозвесей твердых горючих. Ламинарный диффузионный двухфазный факел // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 54–62.
15. Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И. Модель горения мелких капель металла с учетом образования конденсированного окисла // Горение и взрыв. М.: Наука, 1977. С. 329–335.
16. Лукин А. Я., Степанов А. М. Теоретическое исследование процессов образования конденсированных продуктов при горении частиц металла // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 45–49.
17. Флорко А. В., Золотко А. Н., Каминская Н. В., Шевчук В. Г. Спектральные исследования горения частиц магния // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 1. С. 17–22.
18. Флорко А. В., Козицкий С. В., Золотко А. Н., Головкин В. В. О механизме переноса конденсированных продуктов сгорания на поверхность горячей частицы магния // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 6. С. 24–29.
19. Белинский Н. И., Козицкий С. В., Флорко А. В. Скоростной спектральный прибор для исследования излучательных характеристик дисперсных продуктов сгорания // Физика аэродисперсных систем. 1985. Т. 28. С. 38–42.
20. Флорко А. В., Головкин В. В., Скогарев В. Г. Коэффициенты эффективности рассеяния и поглощения частиц MgO при температурах горения // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 28–32.

21. Флорко А. В., Головки В. В., Охрименко Н. А., Шевчук В. Г. Структура зоны горения частиц магния. 1. Оптико-спектральные исследования // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 37–42.
22. Маркштейн Г. Анализ разбавленного диффузионного пламени, поддерживаемого гетерогенной реакцией // Гетерогенное горение. М.: Наука, 1967. С. 182–206.
23. Zolotko A. N. The ignition and combustion of boron dust systems // Second Int. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion. Lampoldshausen, Germany, 1991.
24. Zolotko A. N., Kiro S. A., Vovchuk Ja. I., Bobreshov I. A. The mechanisms of ignition and combustion of ash-rich coal // 23th Int. Symp. on Combustion: Abstracts of Symposium Papers. Orlean, France, 1990. P. 278.
25. Клячко Л. А. Горение неподвижной частицы легкокипящего металла // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 3. С. 404–413.
26. Kashireninov O. E. Mechanism and model of magnesium vapor oxidation in Oxygen // 23th Symp. on Combustion: Abstracts of Symposium Papers. Orlean, France, 1990. P. 436.
27. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. М., 1969.
28. Бржустовский Т., Глассмен И. Спектроскопическое исследование горения металлов // Гетерогенное горение. М.: Наука, 1967. С. 57–90.
29. Каширенинов О. Е., Червонный А. Д., Пивень В. А. Об обнаружении и термодинамических характеристиках AlO_2 . Черногловка, 1979. (Препр. / АН СССР. ОИХФ).
30. Флорко А. В., Головки В. В. Особенности зарождения и роста к-фазы при горении частиц магния // Материалы Междунар. школы-семинара. Реофизика и теплофизика неравновесных систем. Минск, 1991. Ч. 2. С. 103–106.
31. Аршинов А. А. Мусин А. К. Равновесная ионизация в дисперсных системах // Радиотехника и электроника. 1962. № 5. С. 890–899.

*Поступила в редакцию 22/IV 1994 г.,
в окончательном варианте — 28/XI 1995 г.*
