

**СОВМЕСТНЫЕ VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ «ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ» И
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ»
16 – 18 сентября 2015 г., Алматы, Казахстан**

Горение наночастиц алюминия. Обзор механизмов.

В.Е. Зарко

*Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН, 630090
Новосибирск*

Горение частиц металла находит применение в различных приложениях, включая космическую отрасль, подводное реактивное движение, взрывные работы, пиротехнику, а также при получении водорода. Частицы нано алюминия используются в различных комбинациях, включая горючие нано жидкости, гелеобразные и твердые ракетные топлива, а также термиты. В данной работе представлен обзор последних достижений в изучении горения нано-алюминиевых частиц. Цель работы состоит в обобщении результатов достигнутого прогресса в понимании процесса горения частиц нано алюминия и в описании основных тенденций исследований.

Вначале исследована правомочность допущения модели сплошной среды путём сравнения размера частицы и свободной длины пробега молекул газа. Изучено влияние числа Кнудсена на тепло- и массообмен частиц. Выделены недостатки модели сплошной среды. В нано масштабах допущение сплошной среды нарушается, что ведёт к завышению выделяемой энергии и интенсивности тепло- и массообмена. Определены ключевые физико-химические процессы при горении частиц микронных и нано размеров и проведено сравнение соответствующих временных масштабов, чтобы сформулировать механизмы горения для частиц различного размера и при различных давлениях. Исследованы структура пламени и механизмы горения частиц алюминия для различных размеров частиц. Экспериментальные данные из различных источников суммированы для объяснения влияния размера частиц на температуру пламени частиц алюминия. Для частиц с диаметром больше критического значения скорость горения определяется диффузией в газовой фазе. Критическое значение диаметра снижается со 100 до 1 мкм при увеличении давления с 1 до 100 атм. Можно полагать, что горение нано частиц алюминия контролируется химической кинетикой во всём практическом диапазоне давлений (1-100

атм). Для микронных частиц алюминия температура пламени примерно равна адиабатической. Газофазные реакции характерны для кислородсодержащей среды, в то время как гетерогенные реакции характерны для паров воды и углекислого газа. Реальная температура пламени частиц nano алюминия значительно ниже адиабатической из-за тепловых потерь в окружающий газ.

Из анализа данных по времени горения nano частиц алюминия следует, что время их горения - экспоненциальная функция температуры. Время горения зависит от размера частиц по формуле $t = \text{const} \cdot D^n$, где показатель степени n изменяется в диапазоне 0.15-0.34, значительно меньшем единицы.

Данные экспериментальных измерений времени горения частиц nano алюминия до настоящего времени очень скудные. Возможно, из-за фрактальной природы поверхности частиц и/или спекания частиц время горения уменьшается только в четыре раза при уменьшении размера частиц с 1 мкм до 10 нм. В результате слабой зависимости времени горения от размера частиц потенциальные выгоды применения nano частиц алюминия не удаётся полностью реализовать. Этим обосновывается необходимость проведения дальнейших исследований.

Зависимость времени горения nano частиц алюминия от давления также не до конца изучена. При температурах газа ниже 1600 К время горения уменьшается в три раза при увеличении давления в 4 раза. При более высоких температурах давление оказывает слабое влияние на время горения. Этот вопрос должен быть подробнее исследован в дальнейшем, особенно для водяного пара и углекислого газа. При температуре 1500 К время горения частиц алюминия размером 80 нм в углекислом газе в четыре раза больше, чем в кислороде. При температурах, превышающих 2000 К, времена горения в кислороде и в углекислом газе сравнимы между собой. Прямое сопоставление имеющихся в литературе времён горения nano частиц алюминия в парах воды и кислороде невозможно, так как они соответствуют различным давлениям.

Задачи будущих исследований включают создание большого банка экспериментальных данных и разработку более глубокого теоретического понимания кинетики горения частиц алюминия в различных окислительных средах. Это необходимо для построения прогностических моделей горения nano частиц алюминия. Важно также получить данные по температурам пламени для давлений, превышающих 32 атм. Такие данные позволят оценить возможности осуществления парофазного горения nano частиц алюминия при высоких давлениях.