

КИНЕТИКА НУКЛЕАЦИИ ГАЗОФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПЫЛЕВЫХ ПЛАМЕНАХ

Полетаев Н. И.

Институт горения и нетрадиционных технологий Одесского национального университета имени И. И. Мечникова, Одесса, 65082, ул. Дворянская 2, incomb@ukr.net

В изотермическом приближении рассмотрены гомогенная и гетерогенная нуклеация продуктов горения частиц металлов ($d_{10} \sim 5$ мкм) в условиях ламинарного двухфазного факела. В предположении стационарности функции распределения зародышей по размерам определены скорости нуклеации (J) продуктов сгорания металлов в зависимости от степени пересыщения (S) в зоне конденсации горячей частицы. Основное внимание в работе уделено влиянию термической ионизации высокотемпературной двухфазной среды на процессы зародышеобразования. Показано, что при размерах и концентрации частиц конденсированной фазы в зоне конденсации частицы образуются классическая (дебаевская) плазма, в которой конденсированную фазу следует рассматривать как плазменную компоненту. Для определения скоростей гомогенной и гетерогенной нуклеации получено выражение для свободной энергии Гиббса:

$$\Delta G = 4\pi r_k^2 \sigma - \frac{4\pi k_B T_g \rho_k \ln S}{3m_k} r_k^3 + \frac{e^2(\epsilon_2 - 1)}{\epsilon_2} \left(\frac{\epsilon_2(1 - Z_k^2) - 1}{\epsilon_2 - 1} \cdot \frac{1}{r_k} - \frac{1}{a} \right) - Z_k I_1 \quad (1)$$

учитывающее размерную поправку к коэффициенту поверхностного натяжения (σ), электростатическую энергию заряженной капли, энергию иона при гетерогенной нуклеации на ионах, работу по ионизации зародыша в результате термоэлектронной эмиссии (W) и захвату электронов частицей (E). В (1) $I_1(r_k) = W_0 \pm \text{const}/r_k$ – потенциал ионизации нейтрального зародыша (знак плюс – эмиссия электронов, знак минус – захват электронов частицей), Z_k – зарядовое число зародыша, r_k и a – радиусы зародыша и иона.

Установлено, что все перечисленные поправки (кроме захвата зародышем электронов) приводят к уменьшению свободной энергии Гиббса, тем самым уменьшая потенциальный барьер нуклеации и способствуя переходу как гомогенной, так и гетерогенной нуклеации в безбарьерный режим при невысоких степенях пересыщения ($S \sim 1.2-1.5$).

Показано, что для всех исследованных металлов гомогенная нуклеация продуктов сгорания относится к «быстрому» типу. В качестве

критерия «быстроты» нуклеации выбрано отношению характерного времени образования зародыша ($\tau_z = f_1/J$) ко времени между столкновениями молекул мономеров ($\tau_c = (1/4\pi r_k^2 f_1 v_T)^{-1}$, f_1 – концентрация мономеров, v_T – средняя тепловая скорость движения молекул). Концентрация мономеров в зоне конденсации оценивалась по экспериментальным данным для соответствующего металла. Если безразмерное время нуклеации $\epsilon = \tau_z / \tau_c < 10^3$, то нуклеация является быстрой [1] и характеризуется выходом скорости нуклеации (J) на насыщение ввиду быстрого исчерпания молекул мономера (рис.1). Режим «быстрой» нуклеации позволяет пренебречь испарением зародышей, что делает не

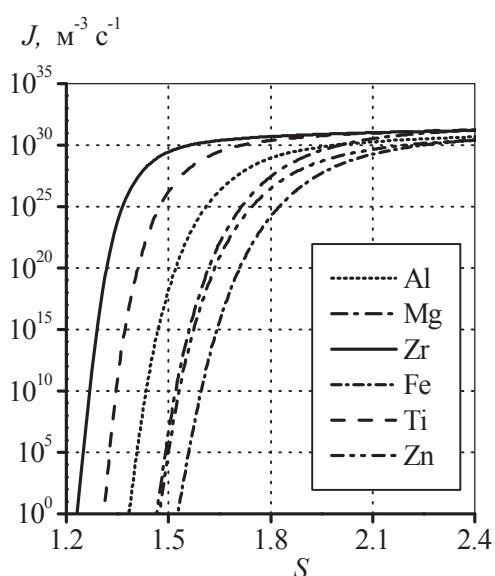


Рис.1. Зависимость скорости нуклеации от степени пересыщения для разных металлов

нужным детальным анализ зависимости свободной энергии Гиббса (1) от параметров системы. С другой стороны, быстрое изменение концентрации конденсирующихся паров делает неприменимым стационарный подход и требует решения нестационарной системы кинетических уравнений нуклеации. В этом случае на первый план выходит задача определения кинетики образования димера (начальное условие задачи) в результате, как правило, тройных столкновений молекул. Скорость гетерогенной нуклеации на ионах ($J \sim f_1 n_i$) для исследуемых систем становится сопоставимой со скоростью гомогенной нуклеации ($J \sim f_1^2$) для концентраций ионов $n_i \sim f_1$. Возможным является одновременное протекание гомогенной и гетерогенной нуклеации, что способствует «быстрой» нуклеации.

Литература

1. Лушников А. А., Сутугин А. Г. Современное состояние теории гомогенной нуклеации // Успехи химии. 1976. - Т. 45, вып.3. – С. 385-415.