

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Шалль. Физика быстротекущих процессов. Т. 2. М., «Мир», 1971.
2. J. H. Blackburn, R. J. Reithel. Exploding Wires, vol. 3, N. Y., Plenum, Press, 1964.
3. Н. А. Фот. Проблемы прочности, 1970, 11, 111.
4. А. П. Байков, В. А. Белаго и др. ФГВ, 1973, 9, 2.
5. А. П. Байков, А. М. Искольдский и др. ПТЭ, 1970, 6.
6. А. Е. Войтенко, А. Д. Демчук, Б. И. Куликов. ПТЭ, 1970, 1, 250.

УДК 662.58

ПРЕДЕЛ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В СМЕСИ ДВУХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ

Г. К. Ежовский, Е. С. Озеров, А. А. Юринов
(Ленинград)

Если скорость гетерогенного окисления металла не зависит от массы образованного окисла, то уравнение для скорости окисления имеет вид

$$k_s = k_0 e^{-E/RT} \rho_0^\nu n_{\text{Ок}_0}^\nu = k^* n_{\text{Ок}_0}^\nu, \quad (1)$$

где ρ_0 и $n_{\text{Ок}_0}$ — плотность газа и относительная массовая концентрация окислителя у поверхности металла; ν — порядок реакции; T — температура поверхности металла. Скорость окисления зависит от рода окислителя и, например, для магния и бериллия [1, 2] эта скорость в водяном паре больше, чем в кислороде. Предполагается, что различие в скоростях окисления металла этими двумя окислителями связано со свойствами образуемого окисла, (возможно, прилегающего к поверхности металла подслоя окисла, толщина которого весьма мала и остается постоянной во времени [1, 2]). В соответствии с этим можно заключить, что поверхность, покрытая гидроокисью (в результате окисления металла водяным паром), обладает более высокой реакционной способностью (например, большей проводимостью или меньшей толщиной подслоя окисла), чем поверхность, покрытая окисью металла. Это означает, что в выражении для скорости окисления (1) множитель k^* при окислении металла водяным паром больше, чем при окислении кислородом.

Предполагается, что при одновременном воздействии двух окислителей металл покрывается окислами двух типов, занимающими перемежающиеся микроучастки поверхности. На микроучастках каждого из окислов реагирование идет с обоими окислителями, причем на любом (одном) микроучастке для них значение множителя k^* в уравнении скорости реакции (1) принимается одинаковым.

В описываемой модели на части поверхности окисел одного типа замещает окисел второго типа (только в слое, примыкающем к поверхности металла), в то время как на другой части поверхности происходит обратная замена. При этом доли поверхности частицы, занятые окислом каждого из двух типов, считаются постоянными во времени и предполагается, что они пропорциональны массовым долям соответствующих окислителей от общей массы окислителя в среде (индекс «с»)

$$\sigma_1 = \frac{\bar{n}_{1c}}{n_{1c} + n_{2c}}; \quad \sigma_2 = 1 - \sigma_1.$$

Здесь n_{1c} , n_{2c} — относительные массовые концентрации окислителей в среде.

В принятых предположениях уравнение для суммарной скорости окисления (по массе расходуемого окислителя) примет вид:

$$k_s = k_1^* \sigma_1 (n_{10}^{\nu_1} + n_{20}^{\nu_2}) + k_2^* \sigma_2 (n_{10}^{\nu_1} + n_{20}^{\nu_2}), \quad (2)$$

где n_{10} , n_{20} — содержание соответствующих окислителей у поверхности частицы. В уравнении теплового баланса сферической частицы металла пренебрегаем влиянием стефановского потока, но учитываем потери тепла излучением и расход тепла на испарение металла [3]:

$$\frac{1}{6} \delta c_m \rho_m \frac{dT}{d\tau} = k_1^* \sigma_1 (n_{10}^{\nu_1} q_1 + n_{20}^{\nu_2} q_2) + k_2^* \sigma_2 (n_{10}^{\nu_1} q_1 + n_{20}^{\nu_2} q_2) - \left[\frac{\text{Nu} \lambda}{\delta} (T - T_c) + \frac{\text{Nu} \lambda}{c_p \delta} n_{\text{H}_2\text{O}} l + \frac{\epsilon \sigma^*}{10^8} (T^4 - T^{*4}) \right]. \quad (3)$$

Здесь принято, что число Льюиса $Le=1$, паров металла в среде нет. Используются обозначения: τ — время, c_m , ρ_m — теплоемкость и плотность металла, δ — диаметр частицы, T , T_c , T^* — температура частицы (одинаковая по объему), среды и стенок канала соответственно, Nu — критерий Нуссельта, λ , c_p — коэффициент теплопроводности и теплоемкость газа, ε — степень черноты окиси металла, σ^* — константа Стефана — Больцмана, l — теплота парообразования металла, $n_{п_0}$ — относительная массовая концентрация паров металла у его поверхности.

Связь между параметрами на пределе воспламенения находится из условий Семенова

$$Q_1 = Q_2; \frac{dQ_1}{dT} = \frac{dQ_2}{dT}, \quad (4)$$

где Q_1 — сумма первых четырех слагаемых (тепловыделение), а Q_2 — сумма в квадратных скобках (теплотери) в правой части уравнения (3). Значения концентраций компонент на поверхности частицы находятся из условий баланса массы:

$$\frac{Nu \lambda}{c_p \delta} (n_{2c} - n_{20}) = n_{20}^{v_2} (k_2^* \sigma_2 + k_1^* \sigma_1), \quad (5)$$

$$\frac{Nu \lambda}{c_p \delta} (n_{1c} - n_{10}) = n_{10}^{v_1} (k_1^* \sigma_1 + k_2^* \sigma_2). \quad (6)$$

В общем случае порядок реакции может быть отличным от единицы и конечные уравнения с использованием (5) и (6) оказываются весьма громоздкими. В качестве первого приближения полагаем, что концентрации окислителей у поверхности металла равны концентрациям в среде $n_{10} = n_{1c} = n_1$, $n_{20} = n_{2c} = n_2$. В этом случае заведомо несколько преувеличивается скорость реакции и преуменьшается предел воспламенения.

Условия (4) совместно с (3) приводят к уравнениям

$$\frac{q_1 n_1^{v_1} + q_2 n_2^{v_2}}{(n_1 + n_2) Nu \lambda} \delta (k_1^* n_1 + k_2^* n_2) = T - T_c + \frac{l}{c_p} n_{п_0} + \frac{\varepsilon \sigma^* \delta}{Nu \lambda} 10^{-8} (T^4 - T^{*4}), \quad (7)$$

$$\frac{q_1 n_1^{v_1} + q_2 n_2^{v_2}}{(n_1 + n_2) Nu \lambda} \delta \left(k_1^* n_1 \frac{E_1}{RT^2} + k_2^* n_2 \frac{E_2}{RT^2} \right) = 1 + \frac{l}{c_p} \frac{dn_{п_0}}{dT} + \frac{4\varepsilon \sigma^* \delta}{Nu \lambda} 10^{-8} T^3. \quad (8)$$

Здесь пренебрегли зависимостью физических констант от температуры. Концентрацию паров металла у поверхности находим по давлению паров на линии насыщения с использованием условий

$$n_n + n_{п_1} + n_1 + n_2 = 1,$$

$$p_n + p_{п_1} + p_1 + p_2 = p$$

и уравнения состояния идеального газа (индексом «н» обозначен нейтральный газ, p — давление, μ — молекулярный вес):

$$n_{п_0} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\mu_n}{\mu_1}\right) n_1 - \left(1 - \frac{\mu_n}{\mu_2}\right) n_2}{1 + \frac{\mu_n}{\mu_{п_1}} \left[\frac{p}{p^*} \exp\left(\frac{l}{RT}\right) - 1 \right]}. \quad (9)$$

Отсюда

$$\frac{dn_{п_0}}{dT} = \frac{n_{п_0} \frac{p}{p^*} \frac{\mu_n}{\mu_{п_1}} \frac{l}{RT^2} \exp\left(\frac{l}{RT}\right)}{1 + \frac{\mu_n}{\mu_{п_1}} \left[\frac{p}{p^*} \exp\left(\frac{l}{RT}\right) - 1 \right]}. \quad (10)$$

При решении задачи сначала из (8) методом последовательных приближений находится температура частицы T . Затем по (7) вычисляется соответствующее значение температуры среды при заданной температуре стенок T^* .

Опытным путем определяли предел воспламенения сферических частиц магния размером 1,05 мм, подвешенных на державке с помощью петли из вольфрамовой проволоки диаметром 50 мк. Частица вводилась в поток продуктов сгорания смеси кислорода с водородом, выходящей из плоскопламенной горелки [4]. Состав среды рассчитывался по расходам компонент, температура среды измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. В измеренные значения температур вводились поправки на излучение путем экстраполяции зависимости показаний термопар от размера сая к нулевому значению этого размера. Такие измерения позволили также во всех случаях рассчитывать эффективную температуру стенок канала T^* . Погрешность измерения собственно пределов воспламенения не превышала $\pm 3^\circ$, а их изменения — $\pm 1^\circ$.

В опытах при нормальном давлении получены пределы воспламенения частиц магния в смеси кислорода с водяным паром. При измерениях оставалось постоянным суммарное объемное содержание C кислорода («к») и водяного пара («вп»), но изменялось содержание каждого из окислителей (см. таблицу). Здесь критерий Рейнольдса Re рассчитывался по средней расходной скорости v , критерий Nu — по формуле Маршалла-Ранца

| $C_{вп}$ | C_k | $T_c, ^\circ C$ | $v, \text{см/с}$ | Re | Nu |
|----------|-------|-----------------|------------------|------|------|
| 0,285 | 0,000 | 634 | 114 | 10,4 | 3,94 |
| 0,230 | 0,055 | 603 | 138 | 11,1 | 4,0 |
| 0,190 | 0,095 | 600 | 114 | 11,4 | 4,05 |
| 0,142 | 0,143 | 616 | 272 | 25 | 5,0 |
| 0,000 | 0,285 | 627 | 70 | 6,2 | 3,5 |

$$Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

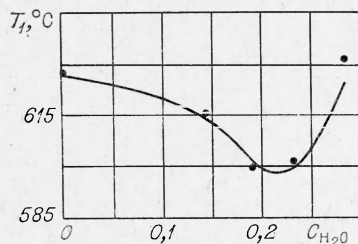
(Pr — критерий Прандтля). Опытные точки даны на рисунке.

При расчетном построении этой же зависимости по изложенной выше схеме использовались уравнения для скорости гетерогенного окисления частиц магния, найденные обработкой опытов по воспламенению частиц магния в водяном паре и кислороде [3]:

$$k_{с_{вп}} = 0,254 \cdot 10^8 \rho_0^{0,5} n_{вп_0}^{0,5} \exp\left(-\frac{40470}{RT}\right) \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}\right],$$

$$k_{с_k} = 0,200 \cdot 10^8 \rho_0^{0,5} n_{ок_0}^{0,5} \exp\left(-\frac{142600}{RT}\right) \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}\right].$$

В расчете использованы физические константы: $p = 10^5$ ата, $c_a = 0,345$ кал/(г·град), $\lambda = 178 \cdot 10^{-6}$ кал/(см·град·с); $\rho_0 = 0,305 \cdot 10^{-3}$ г/см³; $\epsilon = 0,35$; $q_{вп} = 4700$ кал/г; $q_k = 9180$ кал/г; $l = 31600$ кал/моль, $R = 2$ кал/моль, $\sigma^* = 0,0136$ кал/(см²·с·град). Расчетная кривая нанесена на рисунке (в объемных концентрациях). Отметим, что в среде, содержащей только кислород или только водяной пар, расчетная кривая располагалась ниже опытных точек вследствие использования условий



$$n_{к_0} = n_{к_c}; \quad n_{вп_0} = n_{вп_c}.$$

На основании приведенных результатов можно заключить, что при рассмотренном здесь механизме окисления зависимость предельной температуры от содержания одного из окислителей при постоянном суммарном содержании окислителя в среде должна иметь минимум, если

$$k_1^* q_1 \approx k_2^* q_2.$$

Поступила в редакцию
19/XI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Р. Эванс. Коррозия и окисление металлов. М., Машгиз, 1962.
2. J. L. Blumental, M. J. Santy. 11-th symposium (Int.) on combustion., N. Y., 1967.
3. Г. К. Ежовский, А. С. Мочалова и др. III Всесоюзн. симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черноголовка, 1971.
4. В. П. Грачухо, Е. С. Озеров, А. А. Юринов. ФГВ, 1972, 7, 2.

УДК 662.311.681.2.08

ИЗМЕРЕНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВВ

В. Ф. Михеев, С. М. Борин
(Новосибирск)

В исследованиях процессов горения твердых ВВ одной из фундаментальных характеристик является скорость горения. Известные методы измерения линейных скоростей горения твердых ВВ [1] применимы для измерения только средних скоростей ста-