

УДК 621.793.7

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ЯДРА В ПЛАКИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКЕ ЧАСТИЦ ПРИ НАПЫЛЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ

Шевченко А.В.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE SYNTHESIS OF INTERMETALLIDE DURING THE DEPOSITION OF THE CONGLOMERATE NICKEL – ALUMINIUM POWDERS

Shevchenko A.V.

*Разработана математическая модель процесса диффузионного растворения ядра в плакирующей оболочке частиц при напылении плакированных композиционных порошков. Предложен компьютерный вариант реализации разработанной математической модели. Ист. 4.*

**Ключевые слова:** термореагирующий порошок, гомодисперсный конгломерат, интерметаллиды, парофазное горение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, плазменное напыление, дистанция напыления.

В настоящее время для нанесения функциональных покрытий все большее применение находят композиционные порошки. В процессе движения частиц порошков в высокотемпературной газовой струе между компонентами, которые входят в состав частиц, может протекать диффузионное и химическое взаимодействие. Степень протекания такого взаимодействия зачастую определяет прочность сцепления, объемную прочность, микротвердость, износостойкость и другие свойства покрытий. К порошкам, в частицах которых при нагревании возможно протекание интенсивного диффузионного взаимодействия между отдельными компонентами, входящими в состав частиц, относятся плакированные и конгломератные композиционные порошки систем “Ni - TiC”, “Ni - WC”, “Ni - Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>”, “Ni - Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>”, “Ni - Ti”, “Ni - Al” [1]. Для плазменного и газопламенного напыления покрытий наиболее часто используются плакированные порошки. В частицах этих порошков никель выполняет роль плакирующей оболочки, а TiC, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Ti, Al – роль ядра. Толщина плакирующей оболочки составляет 5...15 мкм, диаметр ядра – 50...100 мкм.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что до настоящего времени не разработаны надежные инженерные методики,

позволяющие оценивать степень диффузионного взаимодействия между компонентами частиц композиционных порошков в зависимости от их температуры и агрегатного состояния [1 - 4].

Целью настоящей работы является разработка математической модели, позволяющей оценивать скорость растворения материала ядра в расплавленной плакирующей оболочке частиц при напылении плакированных композиционных порошков.

Кинетика растворения материала ядра в расплаве плакирующей оболочки относится к условиям внешней задачи. Суммарная скорость процесса растворения ядра может быть определена с помощью модифицированного уравнения Нернста - Шукарева [1]:

$$\frac{dc_{я}}{d\tau} = \frac{S_{я} \cdot D}{V_{об} \cdot \delta_{п}} \cdot (c_{к} - c_{я}), \quad (1)$$

где  $c_{я}$  – текущая концентрация материала ядра в расплавленной оболочке; в начальный момент времени ( $\tau = 0$ )  $c_{я} = 0$ ;

$\tau$  – время растворения;

$S_{я}$  – текущая площадь внешней поверхности ядра;

$V_{об}$  – текущий объем расплава оболочки;

$D$  – коэффициент диффузии;

$\delta_{п}$  – толщина пограничного слоя;

$c_{к}$  – конечная концентрация материала ядра в расплавленной оболочке.

Величина  $c_{к}$  обычно принимается равной исходной массовой доле ядра в частице. Например, для частицы композиционного порошка 20 % Ni - 80 % WC величина  $c_{к} = 0,8$ . При этом по уравнению (1) рассчитывается время, необходимое для полного растворения ядра из карбида вольфрама в никелевой оболочке.

Во время растворения ядра его диаметр уменьшается, соответственно уменьшается и площадь его внешней поверхности  $S_{я}$ . Объем расплава оболочки возрастает и достигает максимального значения (объема всей частицы) после полного растворения ядра ( $c_{я} = c_{к}$ ).

Запишем уравнение (1) в виде:

$$\frac{m_{об} \cdot \delta_n}{\rho_{об} S_{я} \cdot D \cdot (c_{к} - c_{я})} \cdot dc_{я} = d\tau, \quad (2)$$

где  $m_{об}$  – текущая масса расплава оболочки;

$\rho_{об}$  – плотность материала оболочки.

Концентрация материала ядра в расплавленной оболочке определяется как:

$$c_{я} = \frac{m_{яп}}{m_{яп} + m_{об(0)}}, \quad (3)$$

где  $m_{яп}$  – масса материала ядра, растворенная в оболочке;

$m_{об(0)}$  – масса расплава оболочки до начала процесса растворения в ней ядра.

Из уравнения (3) можно выразить массу материала ядра, растворенную в расплавленной плакирующей оболочке, через концентрацию материала ядра в оболочке:

$$m_{яп} = \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}}. \quad (4)$$

Очевидно, что масса расплава оболочки будет возрастать на величину  $m_{яп}$ :

$$m_{об} = m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}}, \quad (5)$$

а масса ядра будет уменьшаться на величину  $m_{яп}$ :

$$m_{я} = m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}}, \quad (6)$$

где  $m_{я0}$  – масса ядра до начала процесса растворения.

Площадь внешней поверхности ядра определяется как  $S_{я} = 4\pi \cdot r_{я}^2$ , где  $r_{я}$  – радиус ядра. Выразим изменение радиуса ядра через изменение его массы ( $m_{я}$ ):  $r_{я} = \sqrt[3]{\frac{3m_{я}}{4\pi}}$ . С учетом выражения (6)

радиус ядра в процессе его растворения будет изменяться по уравнению:

$$r_{я} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right)}{4\pi}}, \quad (7)$$

а площадь внешней поверхности ядра – по уравнению:

$$S_{я} = 4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) / 4\pi \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Подставляя (5) и (8) в (2), получим дифференциальное уравнение растворения материала ядра в расплавленной оболочке:

$$\frac{\left( m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) \cdot \delta_n}{4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) / 4\pi \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_{к} - c_{я})} \cdot dc_{я} = d\tau \quad (9)$$

Полученное уравнение учитывает изменение размеров ядра в процессе его растворения в оболочке и изменение площади поверхности, по которой происходит диффузионное взаимодействие между ядром и оболочкой. Вместо постоянного коэффициента диффузии  $D$  в уравнении (9) может быть задана его температурная зависимость  $D(T)$ , если известна зависимость температуры исследуемой системы от времени  $T(\tau)$ . Совмещением функций  $D(T)$  и  $T(\tau)$  находят функцию  $D(\tau)$  и подставляют ее в уравнение (9). Кроме этого, в уравнение (9) может быть введена зависимость коэффициента диффузии от разности концентраций ( $c_{к} - c_{я}$ ).

Поскольку в уравнении (9) произведено разделение переменных, его можно решить непосредственным интегрированием правой и левой частей. Время, необходимое для полного растворения ядра в расплавленной оболочке, определится как:

$$\tau = \int_0^{c_{к}} \frac{\left( m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) \cdot \delta_n}{4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) / 4\pi \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_{к} - c_{я})} \cdot dc_{я} \quad (10)$$

Величины начальной массы ядра  $m_{я0}$  и начальной массы расплава оболочки  $m_{об(0)}$  определяются согласно геометрическим параметрам частиц:

$$m_{я0} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_{я} (r_{я0})^3. \quad (11)$$

$$m_{об(0)} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_{об} \left( r_p^3 - r_{я0}^3 \right), \quad (12)$$

где  $r_p$  – радиус частиц.

Массовое содержание ядра в исходной частице до момента начала его растворения в плакирующей оболочке определяется как:

$$c_k = \frac{m_{я0}}{m_{я0} + m_{об(0)}}. \quad (13)$$

Для решения уравнения (10) следует использовать численные методы интегрирования, поскольку в аналитическом виде получить его решение крайне сложно. Для численных расчетов с использованием ЭВМ уравнение (10) более удобно представить в виде:

$$\tau_i = \int_0^{c_i} \frac{\left( m_{об(0)} + \frac{c_s \cdot m_{об(0)}}{1 - c_s} \right) \cdot \delta_n}{4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_s \cdot m_{об(0)}}{1 - c_s} \right) / 4\pi \right]^{2/3} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_k - c_s)} \cdot dc_s, \quad (14)$$

где  $i$  – номера элементов в массивах  $\tau_i$ ;  $c_i$  (нумерация элементов массивов начинается с нуля);

$c_i = c_{i-1} + \Delta c$ ,  $\Delta c$  – шаг изменения концентрации материала ядра в расплавленной оболочке.

Количество элементов массивов  $\tau_i$ ;  $c_i$  принимается в зависимости от шага изменения концентрации материала ядра ( $\Delta c$ ) в оболочке. С уменьшением  $\Delta c$  пропорционально возрастает число элементов в массивах  $\tau_i$ ;  $c_i$ .

Начальные условия для численного интегрирования уравнения (14):  $\tau_0 = 0$ ;  $c_0 = 0$ .

На основе полученного массива данных ( $\tau_i$ ;  $c_i$ ) можно построить зависимость концентрации материала ядра в расплавленной оболочке ( $c_s$ ) от времени диффузионного взаимодействия ( $\tau$ ). При  $c_i/c_k = 1$  материал ядра полностью растворяется в оболочке.

**Вывод.** Разработана математическая модель процесса диффузионного растворения ядра в плакирующей оболочке частиц при напылении плакированных композиционных порошков.

### Л и т е р а т у р а

1. Газо-термическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик., Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М. Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199с.
2. Production of Titanium Chromium Diboride Powders for Plasma Spraying / Nechiporenko A.S., Knyshev E.A., Klinskaya N.A. International Thermal Spray Conference. – Orlando, Florida. – 1992. – P. 12-18.
3. Клинская Н.А., Королева Е.Б., Петруничев В.А. Получение и свойства металлизированных боридных порошков // Физика и химия обработки материалов. – 1990. – № 5. – С. 42 - 47.

4. Нечипоренко А.С., Клинская Н.А., Степанова З.Г. Изучение взаимодействия диборида титана-хрома с жидкой металлической фазой при плазменном напылении // В сб. Бориды. – ИПМ им. Францевича. – Киев. – 1990. – С. 20 – 25.

### References

1. Gazo-termicheskoe napylenie kompozicionnyh poroshkov / A.Ya. Kulik., Ju.S. Borisov, A.S. Mnuhin, M. D. Nikitin. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 199s.
2. Production of Titanium Chromium Diboride Powders for Plasma Spraying / Nechiporenko A.S., Knyshev E.A., Klinskaya N.A. International Thermal Spray Conference. – Orlando, Florida. – 1992. – P. 12-18.
3. Klinskaja N.A., Koroleva E.B., Petrunichev V.A. Poluchenie i svojstva metallizirovannyh boridnyh poroshkov // Fizika i himija obrabotki materialov. – 1990. – № 5. – S. 42 - 47.
4. Nechiporenko A.S., Klinskaja N.A., Stepanova Z.G. Izuchenie vzaimodejstvija diborida titana-hroma s zhidkoj metallicheskoj fazoj pri plazmennom napylenii // V sb. Boridy. – IPM im. Francevicha. – Kiev. – 1990. – S. 20 – 25.

**Шевченко О.В. Математичне моделювання процесу синтезу інтерметалідів при напылюванні конгломератних нікель-алюмінієвих порошків.**

*Запропоновано математичну модель, що описує кінетику додаткового тепловиділення в частках композиційних гомодисперсних нікель-алюмінієвих порошків при їх плазмовому напылюванні. Модель дозволяє прогнозувати швидкість та ступінь хімічної взаємодії між нікелем та алюмінієм в умовах поверхневого горіння часток. Наведено технологічні рекомендації щодо вибору дистанції напылювання при нанесенні плазмових покриттів гомодисперсними нікель - алюмінієвими порошками.*

**Ключові слова:** терморезагуючий порошок, гомодисперсний конгломерат, інтерметаліди, парофазне горіння, високотемпературний синтез, що саморозповсюджується, плазмове напылювання, дистанція напылювання.

**Shevchenko A.V. A mathematical model of the synthesis of intermetallic compounds during the deposition of conglomerate nickel-aluminum powders.**

*Purpose. The creation of a mathematical model to predict the rate of exothermic reactions in the particles conglomerate powders during spraying.*

*Design/methodology/approach. A mathematical model describing the kinetics of the additional heat in the composite particles gomodispersnyh nickel - aluminum powder in their plasma spraying. The model predicts the rate and extent of chemical interaction between the nickel and aluminum in the surface combustion particles. Given technological advice on the choice of spraying distance when applied plasma coatings gomodispersnyymi nickel - aluminum powders.*

*Findings. The rate of the exothermic reaction in the particles conglomerate gomodispersnyh powders relatively weakly depends on their dispersion. This is due to the high moving speed of the combustion front in the particles. The optimal distance plasma coating conglomerate nickel - aluminum powder is 100 - 120 mm.*

*Originality/value. The production technology for manufacturing of hollow detail by direct extrusion with backpressure has been developed.*

**Key words:** *exothermic powder; the powder of the same particle size; intermetallic compounds; vapor-phase combustion; high-temperature synthesis, which is self-propagating; plasma spraying; spraying distance.*

**Шевченко Олександр Володимирович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної механіки та металургії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [shv.cmw@ukr.net](mailto:shv.cmw@ukr.net)

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 10.11.2015.