

УДК 621.793

*Андрій Андрейцев
Ігор Смирнов*

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ЧАСТИНОК
ПЛАКОВАНОГО ПОРОШКУ Al_2O_3 ПРИ ПЛАЗМОВОМУ
НАПИЛЕННІ**

Розвинуто математичну модель нагріву частинок плакованого порошку в процесі плазмового напилення з урахуванням зміни температури плазмового струменя. Отримані графічні залежності температури поверхні частинки оксиду алюмінію плакованої шаром міді від часу перебування її в плазмовому струмені.

Развита математическая модель нагрева частиц плакированного порошка при плазменном напылении с учетом изменения температуры плазменной струи. Получены графические зависимости температуры поверхности частицы оксида алюминия плакированной слоем меди от времени ее пребывания в плазменной струе.

The mathematical model of heating the particles of clad powder during plasma spraying is improved taking into account change in temperature of a plasma jet. Graphic dependences of surface temperature alumina particle clated copper layer from the time of its stay in plasma jet are received.

Ключові слова: плазмове напилення, плакований порошок, математична модель, теплопровідність.

Постановка проблеми. Плазмово-порошкові покриття на основі Al_2O_3 широко застосовують для захисту деталей, що працюють в умовах тертя часто при додатковій дії агресивних середовищ та підвищених температур. Порошки оксиду алюмінію мають також відносно невисоку вартість, що обумовлює економічну ефективність їх використання.

Факторами, які впливають на якість покриття, є висока температура плавлення ($2040^{\circ}C$) і низька теплопровідність оксиду алюмінію. Це погіршує прогрів частинок порошку і призводить до формування напиленого шару підвищеної пористості з низькою міцністю зчеплення. Застосування плазмових розпилювачів з високою температурою та ентальпією, викликає дисоціацію оксидів, що також знижує експлуатаційні характеристики покриття.

© Андрейцев А. Ю., Смирнов И. В., 2011

Порошки оксиду алюмінію, плаковані шаром металу, зокрема міддю, значною мірою позбавлені таких недоліків і є більш перспективними для застосування. Мідь, завдяки високій теплопровідності, забезпечує хорошу передачу теплоти до частинки оксиду алюмінію і, поряд з тим, зменшує ступінь його дисоціації.

Аналіз публікацій по темі досліджень. Велику увагу застосуванню та фізико-хімічним аспектам напилення плакованих порошків приділено в [1, 2]. Детальне математичне моделювання та розгляд фізики процесів нанесення плазових покриттів з композиційних плакованих порошків проведено в [3, 4]. В даних роботах розв'язано задачу Стефана для випадку плавлення двошарової композиційної частинки при її транспортуванні в плазовому струмені сталої температури. Встановлено діапазон параметрів, що забезпечують проплавлення плакованої оболонки Ni і розігрів твердого ядра частинки карбиду титану-хрому.

При цьому нагрів частинок даних порошків в плазовому струмені повинен бути в певному інтервалі, щоб забезпечити з одного боку проплавлення тугоплавкого керамічного ядра, а з іншого боку не допустити випаровування металеві оболонки. Дані вимоги обумовлюють створення вдосконалених математичних моделей і проведення уточнених розрахунків з визначення розподілу температур в плакованих частинках при плазовому напиленні.

Мета статті полягала в аналітичному дослідженні особливостей нагріву частинок порошку Al_2O_3 плакованих шаром міді за допомогою математичних моделей процесів теплопровідності в двошаровій сферичній частинці в струмені змінної температури.

Основна частина. Якщо припустити, що частинки плакованого порошку мають сферичну форму, а усі термодинамічні коефіцієнти вважати сталими, то математичну модель можна сформулювати таким чином:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(rT)}{\partial t} &= a^2 \frac{\partial^2(rT)}{\partial r^2}, \text{ при } r \in [0, R] \\ \frac{\partial(rT_1)}{\partial t} &= a_1^2 \frac{\partial^2(rT_1)}{\partial r^2}, \text{ при } r \in [R, R_1] \\ T_1(R, t) &= T(R, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R} &= \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} &= \left[\alpha \left(\frac{H_{nl}}{C_r} - T_1 \right) - \varepsilon \sigma T_1^4 \right] \Big|_{r=R_1} \\ \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0, \\ T_1(r, 0) &= T(r, 0) = T_0 \end{aligned}$$

де $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$, $a_1^2 = \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1}$; λ , c , ρ та λ_1 , c_1 , ρ_1 – коефіцієнт теплопровідності, питома

теплоємність, густина матеріалу ядра і оболонки, відповідно; α – коефіцієнт теплообміну; H_{nl} – ентальпія плазового струменя; C_r – еквівалентна теплоємність; ε – коефіцієнт чорноти поверхні частинки; σ – стала Стефана – Больцмана; T_0 – початкова температура частинки; R_1 , R – зовнішній і внутрішній радіуси оболонки відповідно.

В [4] розподіл температури в тонкій оболонці знайдено у вигляді двох перших членів розкладу $T_1(t,r)$ в ряд по степенях $\frac{1}{r}$ і зведено задачу теплопровідності в плакованій частинці до наступної:

$$\frac{\partial(rT)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2(rT)}{\partial r^2}, \text{ при } r \in [0, R] \quad (1)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \left[\alpha_e (T_n - T) - c_1 \rho_1 h \left(1 - \frac{Bi_1}{6} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - c_1 \rho_1 h \frac{Bi_1}{6} \frac{\partial T_n}{\partial t} \right] \Big|_{r=R} \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (3)$$

$$T(r,0) = T_0 \quad (4)$$

де $Bi_1 = \frac{\alpha_e h}{\lambda_1}$; $\alpha_e = \frac{\alpha \lambda_1 R}{\lambda_1 R + \alpha h R_1}$; α – коефіцієнт теплообміну між частинкою порошку і газом; T_n – температура в незбуреному плазмовому потоці; h – товщина оболонки.

Температура в оболонці обчислюється за формулою:

$$T_1(r,t) = T(R,t) + \frac{a_e}{\lambda_1} R^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right) [T_n - T(R,t)] \quad (5)$$

В [4] розв'язок крайової задачі (1)–(4) знайдено за умови сталої температури плазмового потоку. Але, як було встановлено в [5] температура плазмового потоку навколо частинки досить точно апроксимується поліномом другого ступеня:

$$T_n = A + Bt + Ct^2. \quad (6)$$

Враховуючи апроксимацію зміни температури плазмового струменя від часу нагріву частинки поліномом другого ступеня розв'язок задачі (5) буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} T(r,t) = & A + Bt + Ct^2 - \frac{k_c''}{Bi} (B + 2Ct) - \sum_{n=1}^{\infty} A_n(r) \left[(A - 293) e^{-\frac{a^2 \mu_n^2 t}{R^2}} + \right. \\ & + B \left[\frac{R^2}{\mu_n^2 a^2} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_n^2 t}{R^2}} \right) - \frac{k_c''}{Bi} e^{-\frac{a^2 \mu_n^2 t}{R^2}} \right] + \\ & \left. + 2C \left[\frac{R^2 t}{\mu_n^2 a^2} - \frac{R^4}{\mu_n^4 a^4} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_n^2 t}{R^2}} \right) - \frac{k_c'' R^2}{Bi \mu_n^2 a^2} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_n^2 t}{R^2}} \right) \right] \right] \\ A_n(r) = & \frac{2R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{\mu_n r} \frac{Bi}{\mu_n \left[\left(1 + k_c' + \frac{Bi-1}{\mu_n^2} \right) \sin \mu_n + \left(k_c' \mu_n - \frac{Bi-1}{\mu_n} \right) \cos \mu_n \right]} \end{aligned} \quad (7)$$

де $Bi = \frac{a_e R}{\lambda}$; $k_c' = k_c \left(1 - \frac{Bi_1}{6} \right)$; $k_c'' = k_c \frac{Bi_1}{6}$; $k_c = \frac{c_1 \rho_1 h}{c \rho R}$

μ – корені трансцендентного рівняння $\cos \mu_n = \left(k_c' \mu_n + \frac{1 - Bi}{\mu_n} \right) \sin \mu_n$

Кількість членів ряду для обчислення приблизної температури частинок оксиду алюмінію з радіусом $R=25$ мкм приймали $n=26$. Корені трансцендентного рівняння визначали за допомогою пакету Mathematica. Таким чином, для отримання остаточного результату необхідно визначити коефіцієнти A , B і C в поліномі (6). Використовуючи дані отримані в [6] маємо для частинки Al_2O_3 — $B=-1,78 \cdot 10^6$; $C=3,798 \cdot 10^{10}$; $a^2=0,023$; $\lambda=0,019$ кал/см²·с·град). Як плазмоутворюючий газ використовувався аргон, для якого $\alpha=0,9$ кал/см²·с·град. Для типових параметрів роботи плазмотрону, температуру плазмового аргонового струменя на зрізі сопла приймали $T_g(0) \sim 10^4$ °С.

На рис. 1 наведено графічні залежності температур поверхонь частинок порошку чистого Al_2O_3 та плакованого оболонкою з міді різної товщини від часу перебування їх в струмені плазми.

На рис. 2 наведено результати розрахунку температури плакованої частинки Al_2O_3 радіусом 25 мкм залежно від відстані від центра частинки r та часу перебування частинки в плазмовому струмені t .

Зазначимо, що отриманий розв'язок також може бути використаний за умови лінійної залежності температури плазми навколо частинки, в цьому випадку $C=0$. Розв'язок (5) отриманий в [2] теж є частковим випадком (7).

У загальному випадку можливо побудувати відповідні розв'язки для будь-якої поліноміальної, а також експоненціальної залежності температури плазмового струменя від часу перебування частинки порошку в його потоці.

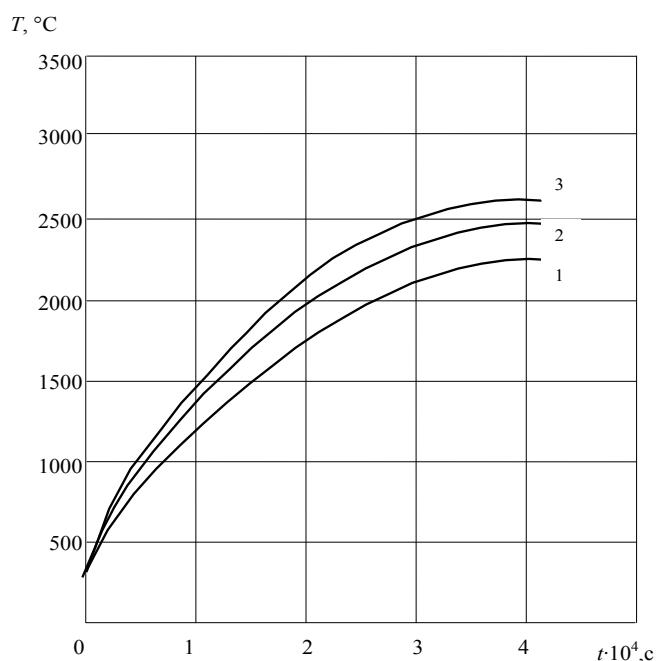


Рис. 1. Температура поверхні частинки Al_2O_3 радіусом $R=15$ мкм від часу перебування в струмені плазми:

1 – неплакованої; 2 – плакованої шаром міді товщиною 1 мкм; 3 – плакованої шаром міді товщиною 1,5 мкм

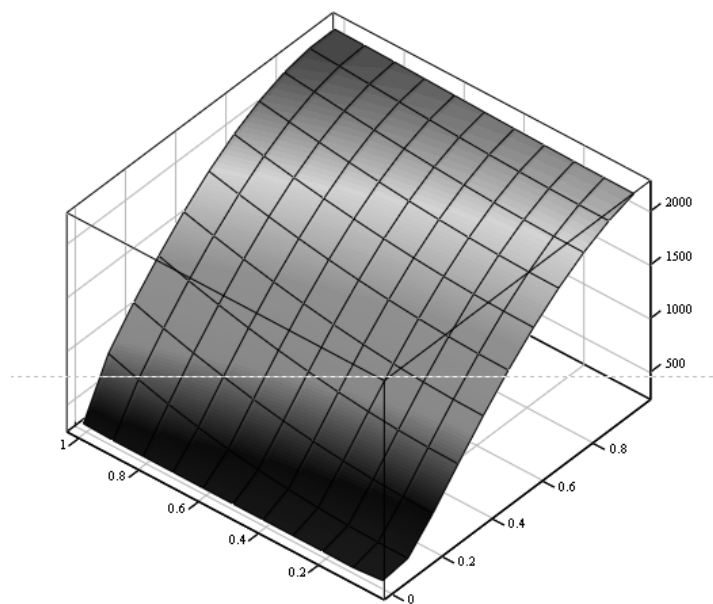


Рис. 2. Залежність температури частинки Al_2O_3 плакованої шаром міді від r та t

Висновки та результати подальших досліджень. На підставі проведених розрахунків за розробленими математичними моделями, встановлено вплив мідної оболонки на температуру нагріву поверхні напилюваної частинки, при цьому показано, що збільшення товщини оболонки на 1 мкм призводить до підвищення температури частинки більш ніж на $100^{\circ}C$.

Перспективами подальших досліджень є визначення впливу плакуючої оболонки на температурний режим плакованої частинки з урахуванням фазових перетворень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кулик А. Я., Борисов Ю. С., Мнухин А. С., Никитин М. Д. Газотермическое напыление композиционных порошков. – Л.: Машиностроение, 1985.– 199 с.
2. Анциферов В. Н., Шмаков А. М., Агеев С. С., Буланов В. Я. Газотермические покрытия / Под ред. В.Н. Анциферова. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 318 с.
3. Барвинок В. А., Богданович В.И., Докукина И.А., Китайкин В.Л., Плотников А.Н. Математическое моделирование нагрева порошкового композиционного материала в плазменной струе // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2001. – № 2.– С. 197-203.
4. Барвинок В. А., Богданович В. И., Докукина И. А., Плотников А. Н. Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков/ Международный центр научной и технической информации. – М., 1998.– 96 с.
5. Андрейцев А. Ю., Смирнов I.B. Моделювання процесів руху та нагріву частинки при плазовому напилюванні. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: Збірник наукових праць. – Київ – Кам’янець-Подільський, 2006. – С. 77-82.
6. Смирнов И. В., Андрейцев А. Ю., Черный А. В. Аналитическое определение скорости и температуры частиц оксидной керамики в процессе плазменного напыления // Вестник ХНТУ. — 2009. – № 2(35). – С. 403-410.