

УДК 621.793

А. Ю. Андрейцев

І. В. Смирнов

М. А. Долгов

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ
ТА РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ
МІДНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЮВАННІ
ПЛАКОВАНОГО ПОРОШКУ Al_2O_3**

Розглянуто особливості температурного режиму при плазмовому напилюванні плакованих порошків. Розвинуто математичну модель нагріву частинок плакованого порошку з урахуванням зміни температури плазмового струменя. Проведене узгодження температури плазмового потоку з часом перебування в ньому частинок порошку та отримано аналітичний розв'язок. Визначено оптимальну товщину мідної оболонки для частинки Al_2O_3 радіусом 25 мкм.

Рассмотрены особенности температурного режима при плазменном напылении плакированных порошков. Развита математическая модель нагрева частиц плакированного порошка при плазменном напылении с учетом изменения температуры плазменной струи и получено аналитическое решение. Проведено согласование температуры плазменного потока со временем пребывания в нем частиц порошка. Определена оптимальная толщина медной оболочки для частиц Al_2O_3 радиусом 25 мкм.

The features of temperature during plasma spraying plated powders is studied. The mathematical model of heating the particles of plated powder during plasma spraying is improved taking into account change in temperature of a plasma jet and the analytical solution is founded. Coordination of temperature plasma jet with a staying time of particles in the jet is carried out. The optimal thickness of the copper shell Al_2O_3 particle radius of 25 μm is defined.

Ключові слова: теплопровідність, температурний режим, плакована керамічна частинка, плазмовий струмінь, крайова задача.

Актуальність проблеми. При плазмовому напилюванні велика увага приділяється встановленню оптимального температурного режиму частинок порошку, що напилюється. Цей режим залежить від низки факторів, пов'язаних у першу чергу з кінетичними й теплофізичними параметрами, як плазмового струменя, так і напилюваного матеріалу.

© Андрейцев А. Ю., Смирнов І. В., Долгов М. А., 2013

Завдання ускладнюється при використанні для напилювання керамічних порошків через їх специфічні фізичні властивості й термодинамічну нестійкість. Навіть термодинамічно стійкі оксиди схильні до значної дисоціації при температурі нагріву частинок, близької до температури плавлення.

На розвиток температурних процесів, і як наслідок фазових перетворень значно впливає металева оболонка, яка огортає керамічну частинку. Змінюючи умови теплообміну за допомогою плакувальної оболонки, можна зближувати або розділяти процеси нагріву, плавлення та випаровування частинок при напилюванні [1].

Аналіз публікацій. Теоретичні й експериментальні дослідження температурного режиму частинок, що напилюються, у плазмовому струмені проводилися багатьма вченими [2,3]. При цьому, недостатньо враховувалися температурно-часові залежності, що узгоджують температуру плазмового струменя й час перебування частинки у високотемпературній зоні. Існуючі залежності можна використовувати лише на початковому етапі перебування частинки в плазмовому струмені, коли різниця температур і швидкостей струменя й частинки досить велика.

Комплексне комп'ютерне моделювання, як плазмового струменя, так і процесу напилювання, реалізоване в численних програмних пакетах [4]. Однак обмеженість використовуваних у даних пакетах баз даних матеріалів та параметрів плазмотронів не дозволяє моделювати процес напилювання в нестандартних умовах за межами пропонованих діапазонів, у тому числі при використанні композиційних (плакованих) порошків.

Детальний аналіз фізико-хімічних аспектів напилювання й застосування плакованих порошків проведено в [5]. Математичне моделювання температурних процесів при нанесенні плазмових покриттів з плакованих порошків проведено в [6], де показано, що температура двошарової частинки в плазмовому струмені повинна знаходитись в певному діапазоні, для забезпечення з одного боку проплавлення тугоплавкого керамічного ядра, а з іншого скорочення втрат металевої оболонки за рахунок випаровування.

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених плазмовому напилюванню, відсутні дані про вплив товщини металевих оболонок на температурний режим частинок в плазмовому струмені.

Мета роботи полягала в дослідженні впливу плакувальної мідної оболонки на нагрів частинок оксиду алюмінію у плазмовому струмені за допомогою аналітичних розв'язків математичних моделей теплопровідності.

В загальному випадку нагрів частинок при напилюванні описується рівнянням, що містить конвективну та радіаційну складові. Однак для частинок діаметром менш ніж 100 мкм для будь-якого часу нагріву та діаметром менш ніж 3 мкм при часі нагріву не більш ніж 3 мс, радіаційну складову в рівнянні енергії можна не враховувати. У цьому випадку рівняння енергії для частинки зводиться до рівняння теплопровідності, конкретний вигляд якого залежить від будови й форми частинки.

При моделюванні процесу нагріву частинки в плазмовому потоці виходили з таких припущень: частинка має сферичну форму й розподіл температури у ній має сферичну симетрію; частинка є однорідним, ізотропним тілом; внутрішні джерела тепла відсутні.

У припущенні сталості всіх термодинамічних коефіцієнтів на певному етапі польоту частинки в плазмовому струмені математичну модель можна сформулювати в такий спосіб:

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

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1}$; λ , c , ρ і λ_1 , c_1 , ρ – коефіцієнт теплопровідності, питома теп-

лоємність, густина матеріалу ядра й оболонки, відповідно; α – коефіцієнт теплообміну; T_{nl} – температура плазмового струменя; T_0 – початкова температура частинки; R_1 , R – зовнішній і внутрішній радіуси оболонки відповідно.

У [6] дану задачу було зведено до крайової задачі теплопровідності в ядрі у припущенні лінійного радіального розподілу тепла в оболонці, та отримано аналітичний розв'язок за умови сталої температури плазми. Однак припущення щодо сталості температури плазми виправдане лише у каналі та на зрізі сопла плазмотрона. Надалі температура струменя досить швидко змінюється з часом.

Залежності температури плазмового струменя вздовж дистанції напилювання є відомими. У [7] отримано формули для визначення швидкості частинки вздовж дистанції напилювання. Але, оскільки, швидкості потоку та частинок суттєво відрізняються (особливо на початку дистанції), потрібно узгодити температуру плазми біля поверхні частинки з часом перебування її в струмені. Для цього визначаємо температуру в ряді точок дистанції напилювання z_1, z_2, \dots, z_n . Після чого знаходимо час польоту частинки до досягнення z_i із співвідношення:

$$t_1 = \int_0^{z_i} \frac{dz}{W(z)}$$

Тоді $T_{nl}(t_i) = T_{nl}(z_i)$ і буде визначати температуру плазми в околі частинки, залежно від часу її перебування в струмені.

За отриманими даними проводимо поліноміальну апроксимацію температури плазми біля поверхні частинки.

Наведені обчислення були виконані для частинок Al_2O_3 радіусом 25 мкм, плакованих мідною оболонкою товщиною від 0,5 до 5 мкм. В результаті показано, що на початковому етапі розгону та розігріву частинки температура плазми біля її поверхні досить добре апроксимується поліномом другого степеня $T_{nl} = A + Bt + Ct^2$ з коефіцієнтом імовірності апроксимації R не менше ніж 0,99.

Враховуючи дану апроксимацію у припущенні (див. [6]), що температура в оболонці визначається за формулою:

$$T_1(r, t) = T(R, t) + \frac{a_e}{\lambda_1} R^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right) [T_{ni} - T(R, t)], \quad \alpha_e = \frac{\alpha \lambda_1 R}{\lambda_1 R + \alpha h R_1},$$

температура ядра:

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

де $Bi_1 = \frac{\alpha_e h}{\lambda_1}$; h – товщина оболонки; $k_c' = k_c \left(1 - \frac{Bi_1}{6} \right)$; $k_c'' = k_c \frac{Bi_1}{6}$; $k_c = \frac{c_1 \rho_1 h}{c \rho R}$;

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

Корені трансцендентного рівняння визначали за допомогою пакета Mathematica. Кількість членів ряду n для обчислення температури частинок вибиралася таким чином, щоб максимальна похибка становила не більш ніж 10°C . Похибку обчислення оцінювали із залежності:

$$\varepsilon < \frac{4Bi(T_g(0) - T_0)}{6n - 3}$$

Як було зазначено раніше, температура поверхні частинок не повинна перевищувати температури випаровування оболонки. Наприклад, для порошку оксиду алюмінію, плакованого міддю температура частинок не повинна перевищувати температуру випаровування міді, тобто 2500°C . У цьому зв'язку, для встановлення необхідного температурного режиму, була проведена побудова серії графіків залежності температур поверхні частинок порошку чистого (не плакованого) Al_2O_3 різних діаметрів від часу перебування їх у струмені плазми [8], де встановлено оптимальний радіус частинок – 25 мкм.

Таким чином, для одержання остаточного результату треба визначити коефіцієнти A , B і C у поліномі для певного розміру частинки й необхідні температурні коефіцієнти.

З урахуванням цих значень, побудовано графік зміни температури даних частинок Al_2O_3 , плакованих мідною оболонкою товщиною від 0,5 до 5 мкм, тобто при незмінному радіусі ядра та різній товщині оболонки (рис. 1).

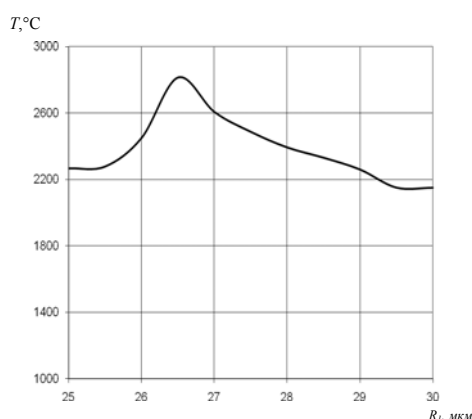


Рис. 1. Залежність температури частинки оксиду алюмінію радіусом 25 мкм плакованою мідною оболонкою від її зовнішнього радіуса

З рис. 1 випливає, що наявність мідної оболонки товщиною 1,5 мкм сприяє максимальному збільшенню температури ядра, а при товщині оболонки більш ніж 4 мкм, частинка оксиду алюмінію може не розплавитися. Задаючись різними діаметрами плакованої частинки при незмінному діаметрі ядра, можна встановити вплив товщини оболонки на час досягнення плакованою частинкою необхідної температури, наприклад, температури плавлення ядра.

Рис. 2 схематично пояснює існування оптимальної товщини оболонки. На ньому наведені графіки зміни температури частинок до моменту досягнення ними найвищої температури та плазми біля їх поверхні залежно від часу перебування в плазмовому струмені при товщині оболонки 1, 1,5 і 3 мкм. З рисунка видно, що в даному інтервалі існує максимум.

Існування максимуму найвищої температури, що досягається частинкою, залежно від її маси пояснюється так. Час перебування частинки з невеликою масою в високотемпературній зоні незначний (крива 1). На рисунку ми бачимо, що температура плазми біля її поверхні швидко спадає з часом. З іншого боку, хоча масивна частинка досить довго перебуває у високотемпературній зоні, вона потребує багато більшого тепловкладення (крива 3). Тому на момент урівноваження її температури з температурою плазми, остання значно зменшилась. Ділянки спадання температури для частинок 1, 2, 3 не наведені, щоб не захащувати рисунок.

Висновки та результати подальших досліджень. Таким чином, розвинена математична модель нагріву частинки порошку з оболонкою при плазмовому напилюванні на основі узгодження температури плазмового струменя й частинки в часі. Отриманий аналітичний розв'язок, на основі якого встановлено вплив товщини оболонки на прогрів ядра плакованої частинки. У результаті визначена оптимальна товщина мідної оболонки на рівні 1,5 мкм для частинки оксиду алюмінію діаметром 50 мкм, при якій досягається максимальний прогрів тугоплавкого керамічного ядра, що сприяє одержанню якісних плазмових покриттів.

Перспективами подальших досліджень є побудова та аналіз математичних моделей, що враховують зміну агрегатних станів оболонки та ядра в процесі газотермічного напилювання плакованих частинок.

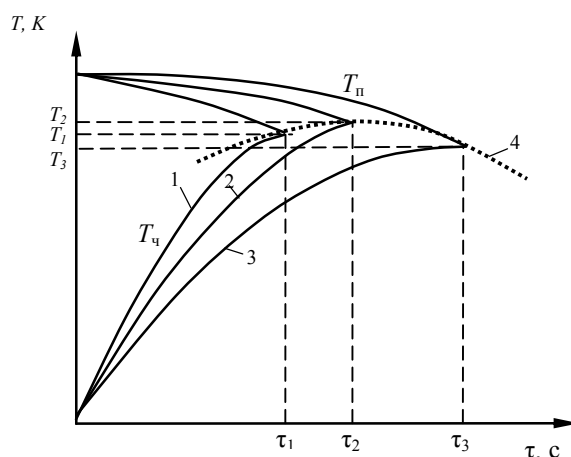


Рис. 2. Зміна температури плазмового струменя $T_{пл}$ і температури плакованої частинки $T_{ч}$ у часі:

1, 2, 3 – температура частинки при товщині оболонки 1, 1,5, 3 мкм відповідно;
4 – крива, що проходить через точки максимумів температур частинок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Газотермическая обработка керамических оксидов [Текст] / М. Н. Бодяко, Ф. Б. Вурзель, Е. В. Кремко и др.; Под ред. О. В. Романа. – Мн.: Наука и техника, 1988.–223 с.
2. Нанесение покрытий плазмой [Текст] / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др.– М.: Наука, 1990. – 406 с.
3. Solonenko O. P. Complex investigation of thermophysical processes in plasma-jet spraying [Text]/ O.P. Solonenko // Pure and Applied Chemistry. – Vol. 62, 1990. – № 9. - P. 1783 -1800.
4. Формирование газотермических покрытий: теория и практика [Текст] / А. Ф. Ильюшенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас, Б. Форманек /Под общей ред. д.т.н., проф. А. Ф. Ильюшенко – Мн.: Бест-принт, 2002. – 480 с.
5. Газотермические покрытия [Текст] / В. Н. Анциферов, А. М. Шмаков, С. С. Агеев, В. Я. Буланов. / Под ред. В. Н. Анциферова. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 318 с.
6. Математическое моделирование нагрева порошкового композиционного материала в плазменной струе [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, И. А. Докукина, В. Л. Китайкин, А. Н. Плотников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.– 2001. – № 2.– С. 197 – 203.
7. Андрейцев А. Ю. Моделювання процесів руху та нагріву частинки при плазмовому напилюванні [Текст] / А. Ю. Андрейцев, І. В. Смирнов // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: Збірник наукових праць. – Київ – Кам'янець-Подільський, 2006. – С. 77 – 82.
8. Андрейцев А. Ю. Моделювання та розрахунок температури частинок плакованого порошку Al_3O_3 при плазмовому напиленні [Текст] / А. Ю. Андрейцев, І. В. Смирнов, А. В. Чорний // Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 19.– К., 2011. – С. 99 – 104.