

УДК 621.793

А. Ю. Андрейцев¹, І. В. Смирнов²¹Державний економіко-технологічний університет транспорту²Національний технічний університет України "КПІ", м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАГРІВУ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ В УМОВАХ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЮВАННЯ

Запропонована математична модель нагріву частинки порошку в умовах плазмового напилювання з урахуванням зміни температури плазмового струменя. За допомогою метода відокремлення змінних отримано розв'язки побудованих крайових задач. Отримані графічні залежності зміни температури по перерізу частинок та від дистанції напилювання для керамічних та металевих порошків.

Ключові слова: теплопровідність, температура частинок, плазмовий струмінь, дистанція напилювання, крайова задача, метод Фур'є.

Постановка проблеми. Аналіз попередніх досліджень і публікацій. В техніці плазмового напилювання особлива увага приділяється визначенню температурного стану частинок порошку, що напилюються. При теплових потоках порядку 10^8 - 10^9 Вт/м², які реалізуються на практиці, температурні перепади в частинках досягають 10^7 - 10^9 К/м, в цьому випадку температура поверхні може перевищувати температуру плавлення, а в центрі частинка залишається твердою, що особливо виявляється в керамічних порошках через низьку теплопровідність.

Аналізу умов прогрівання поверхні і об'єму частинок присвячений ряд робіт, зокрема в [1, 2] розглядається нагрів і випаровування частинок тугоплавких матеріалів із заданими параметрами, що знаходяться в струмені плазми з температурою $\sim 10^4$ °С. Авторами роботи [3] отримано рівняння для визначення часу нагріву і плавлення частинок з урахуванням коефіцієнту двофазності плазмового потоку. Дані розрахунки досить складні через необхідність розгляду рівнянь теплопровідності при нелінійних граничних умовах.

При напилюванні багатокomпонентних порошкових сумішей, що містять тугоплавкі керамічні та відносно легкоплавкі металеві частинки слід враховувати можливість охолодження при випаровуванні, обумовленого різними температурами кипіння даних матеріалів. В цьому сенсі розмір вихідних частинок вибирається із можливості прогріву до необхідної температури.

Мета даної роботи полягала в математичному моделюванні процесу нагріву частинок порошку з різними розмірами і теплофізи-

чними властивостями та визначення залежності температури частинок на дистанції прискорення, що є необхідним при визначенні оптимальної дистанції напилювання та гранулометричного складу порошкової суміші.

Основна частина. При моделюванні процесу нагріву частинки в плазмовому потоці виходимо з наступних припущень:

1. Частинка має ідеальну сферичну форму. У [1] було показано, що час сфероїдизації частинки в потоці плазми $t_c \sim 10^{-8}$ с. Як буде показано далі, час розігрівання частинки перевищує 10^{-4} с. Отже, припущення про сферичну форму частинки є прийнятним.

2. Частинка є однорідним, ізотропним тілом.

3. Внутрішні джерела тепла відсутні.

В цих припущеннях нагрів частинки описується рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (1)$$

де $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$; λ – коефіцієнт теплопровідності частинки; c – теплоємність частинки; ρ – густина матеріалу частинки; R – радіус частинки

На поверхні частинки відбувається конвективний теплообмін з плазмою, температура якої $T_g(t)$ залежить від часу перебування частинки в потоці:

$$\lambda \frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = \alpha (T_g(t) - T(R, t)), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт теплообміну між частинкою порошку і газом.

До даної граничної умови додамо умову обмеженості температури в центрі частинки

$$T(0, t) < +\infty \quad (3)$$

і початкову умову

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

Крайова задача (1)-(4) описує процес нагріву частинки в плазмовому струмені. У [1] були розглянуті аналогічні задачі. Проте температура плазми вважалася сталою, що суттєво впливає на кінцевий результат і призводить до розбіжностей з експериментальними даними, особливо для тугоплавких частинок оксидів.

Розв'язок задачі (1)-(4) шукатимемо у вигляді

$$T = T_g(t) - \frac{U}{r}, \quad (5)$$

де $U \approx U(r, t)$ нова невідома функція. В цьому випадку задача (1)-(4) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} &= rT'_g(t); \\ \frac{\partial U(R,t)}{\partial r} &= \left(\frac{1}{R} - \frac{\alpha}{\lambda} \right) U(R,t); \\ U(0,t) &= 0; U(r,0) = r(T_g(0) - T_0). \end{aligned} \quad (6)$$

Застосовуючи до розв'язання задачі (6) метод Фур'є, з урахуванням (5), отримуємо розв'язок задачі (1)-(4)

$$\begin{aligned} T = T_g(t) - 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin k_i - k_i \cos k_i}{k_i - \sin k_i \cos k_i} \frac{\sin \frac{k_i r}{R}}{\frac{k_i r}{R}} \times \\ \times \left((T_g(0) - T_0) e^{-\frac{a^2 k_i^2 t}{R^2}} + \int_0^t T'_g(\tau) e^{-\frac{a^2 k_i^2 (t-\tau)}{R^2}} d\tau \right). \end{aligned} \quad (7)$$

де k_i – корені трансцендентного рівняння

$$tg k_i = \frac{k_i}{1 - Bi}, \quad (8)$$

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – число Біо, що визначає характер процесу теплопередачі на межі розділу тверде тіло – газ.

Таким чином, для отримання остаточного результату нам необхідно визначити $T_g(t)$. Використовуючи дані, отримані в [4] для визначення швидкості частинки в плазмовому струмені, ми встановили, що залежність температури плазми від часу перебування частинки в струмені на ділянці прискорення з досить високою точністю (кореляційне відношення $r_t = 0,998$) може бути апроксимована квадратичним поліномом

$$T_g(t) = At^2 + Bt + T_g(0). \quad (9)$$

Виходячи з розв'язку (7) та умови (9) наближене значення температури обчислюємо за формулою

$$\begin{aligned} T = At^2 + Bt + T_g(0) - 2 \sum_{i=1}^n \frac{\sin k_i - k_i \cos k_i}{k_i - \sin k_i \cos k_i} \frac{\sin \frac{k_i r}{R}}{\frac{k_i r}{R}} \left[(T_g(0) - T_0) e^{-\frac{a^2 k_i^2 t}{R^2}} + \right. \\ \left. + \frac{2AR^2}{a^2 k_i^2} t + \frac{R^2}{a^2 k_i^2} \left(B - \frac{2AR^2}{a^2 k_i^2} t \right) \left(1 - e^{-\frac{a^2 k_i^2 t}{R^2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Кількість членів ряду n для обчислення наближеної температури вибиралась так, щоб максимальна похибка складала не більше 10°C . Зазначимо, що розрахунки за формулами, наведеними в [1] для частинок Mo та W, для частинок Al_2O_3 з радіусом 15 мкм дають похибку на ділянці прискорення до 250°C , що є досить суттєвим.

Було встановлено, що для частинок з радіусом менше 50 мкм (частинки тугоплавкої кераміки більшого радіусу для напилювання як правило не застосовують) при $t < 10^{-3}$ с. похибка при обчисленні температури

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

Виходячи з цього для частинок нікелю з радіусом $R = 35$ мкм $n = 15$, а для частинок оксиду алюмінію з радіусом $R = 15$ мкм $n = 46$. Для частинки Ni маємо $(T_g(t) = -1,33 \cdot 10^{10} t^2 - 8,493 \cdot 10^5 t + 10^4)$, $a^2 = 0,147$, $\lambda = 0,14$ кал/см²сград), для частинки $\text{Al}_2\text{O}_3 - a^2 = 0,0185$ ($T_g(t) = -5,76 \cdot 10^{10} t^2 - 2,619 \cdot 10^6 t + 10^4$, $\lambda = 0,016$ кал/см²сград). Як плазмоутворюючий газ використовували аргон, для якого $\alpha = 0,9$ кал/см²сград.

Розрахунки в даній роботі проводилися саме для цих частинок з урахуванням результатів отриманих в [5] по оптимальному складу сумішей для напилювання. Обрані частинки з різними теплофізичними властивостями при визначених радіусах проходячи плазмовий струмінь досягають поверхні основи в розплавленому або пластичному стані без випаровування або з мінімальним випаровуванням.

На рис. 1, 2 наведено графічні залежності температур поверхонь частинок Al_2O_3 і Ni від часу перебування їх в струмені плазми.

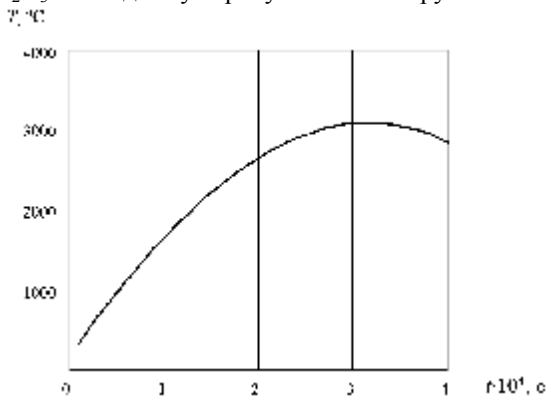


Рис. 1. Залежність температури поверхні частинки Al_2O_3 при $R = 15$ мкм від часу перебування в струмені плазми

На *рис. 3* наведено графік залежності температури частинки Al_2O_3 від r (відстані від центра частинки до поверхні) та t (часу перебування в плазмовому струмені).

З використанням результатів [4] по визначенню швидкості частинок побудовано залежність температури від дистанції напилювання (*рис. 4*).

Порівнюючи графіки на *рис. 1, 2* та *рис. 4* робимо висновок, що частинки Al_2O_3 досягнуть поверхні основи раніше, що є небажаним. Виходом з цієї ситуації може бути використання плакованих порошків, коли металева оболонка потрапляє на поверхню разом з керамічним ядром.

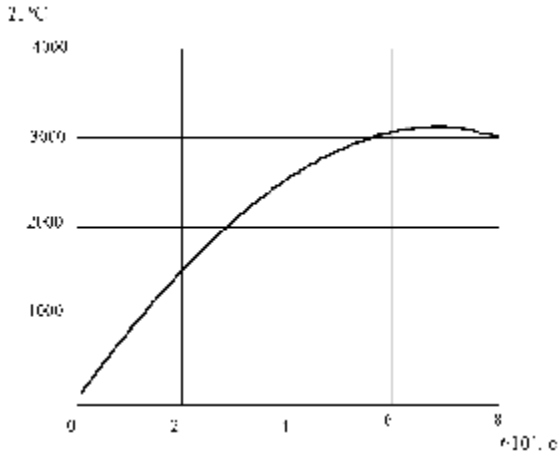


Рис. 2. Залежність температури поверхні частинки Ni при $R = 35$ мкм від часу перебування в струмені плазми

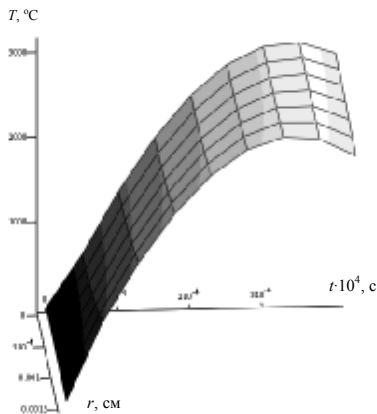


Рис. 3. Залежність температури частинки Al_2O_3 від r та t

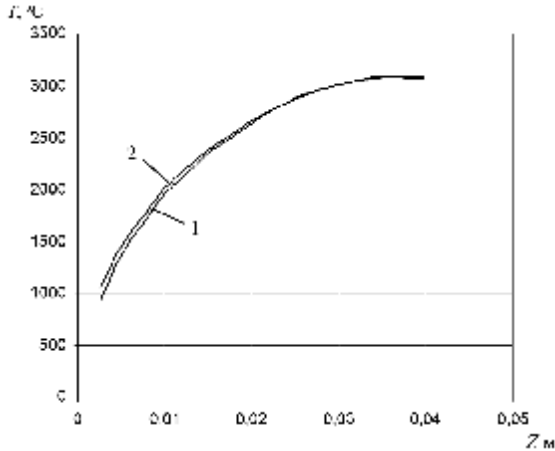


Рис. 4. Залежності температури поверхні частинок 1 – Al_2O_3 при $R = 15$, 2 – Ni при $R = 35$ мкм від дистанції напилювання Z м

В цьому випадку необхідно розв'язувати наступну задачу

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} - a_1^2 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = 0, \quad 0 \leq r < \rho;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} - a_2^2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) = 0, \quad \rho \leq r < R;$$

$$T_1(r, 0) = T_2(r, 0) = T_0;$$

$$T_1(0, t) < +\infty;$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(R, t)}{\partial r} = \alpha (T_g(t) - T_2(R, t));$$

$$T_1(\rho, t) = T_2(\rho, t);$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\rho, t)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(\rho, t)}{\partial r}.$$

Зауважимо, що квадратична апроксимація $T_g(t)$ справедлива лише на ділянці від нуля до 3,5-4 см, тобто на ділянці прискорення частинки (див. [5]). На ділянці гальмування характер залежності температури плазми від часу перебування частинки в струмені змінюється. Тому виникає проблема розв'язання іншої задачі.

З рис. 3 видно, що в кінці ділянки прискорення температура всієї частинки стає практично однаковою. Тому задача знаходження температури на ділянці гальмування співпадає з задачею (1)-(4), але з іншими $T_g(t)$ та T_0 . Розв'язанню цієї задачі будуть присвячені наступні роботи.

Висновки. За результатами проведених розрахунків можна зробити наступні висновки відносно використання побудованої моделі. По-перше, дана модель є універсальною, тобто може бути використана для розрахунку гранулометричного складу багатокомпонентних сумішей. По-друге, дана модель може бути використана і на ділянці гальмування для чого необхідно лише мати апроксимацію функції $T_g(t)$. По-третє, дослідження даної моделі показало недоліки напилювання механічних сумішей, що призводить до необхідності дослідження аналогічної моделі при напилюванні плакованих порошків.

Список використаних джерел:

1. Лохов Ю. Н., Петруничев В. А., Углов А. А., Швыркова И. И. Нагрев и испарение частиц в струе низкотемпературной плазмы // Физ. и хим. обраб. материалов. – 1974. – №6. – С.52-56.
2. Саксельцев В. Г., Лоскутов В. С., Пузырьков А. Ф. Прогрев порошковых материалов в плазменных струях аргона и азота // Изв. вузов. Машиностроение. – 1972. – №1. – С.127-131.
3. Углов А. А., Иванов Е. М. Теплофизика плазменной обработки мелко-дисперсных частиц // Физ. и хим. обраб. материалов. – 1985. – №2. – С.13-21.
4. Андрейцев А. Ю., Смирнов И. В. Моделювання процесів руху та нагріву частинки при плазмовому напилюванні // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: Збірник наукових праць. – Київ – Кам'янець-Подільський, 2006. – С.77-82.
5. Смирнов И. В., Андрейцев А. Ю., Чорный А. В., Копылов В. И. Моделирование процесса нагрева частиц порошка в плазменной струе при напылении композиционных покрытий // Вестник ХНТУ. – 2008. – №3. – С.219-224.

The mathematical model of heating of particles of a powder in the conditions of a plasma spraying taking into account change of temperature of a plasma jet is offered. By means of a method of division of variables decisions of the constructed regional problems are received. Graphic dependences of change of temperature on section of particles and from a distance of a dusting for ceramic and metal powders are constructed.

Key words: *heat conductivity, temperature of particles, a plasma jet, a spraying distance, method Fourier.*

Отримано: 02.06.2008