

к.т.н. Сергієнко С.М.,
доц. Бірюкова Т.В.,
Алексєєва М.Ю.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВОГО ДИСПЕРГУВАННЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОРОШКІВ

Наведені результати теоретичних досліджень, математичних розрахунків, отримані залежності, які описують процес плазмового диспергування тугоплавких порошків.

Ключові слова: плазма, диспергування, частинка, математична модель, радіальні та дотичні напруги.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.

Однією з найбільш поширених областей плазмової технології є обробка дисперсного матеріалу в плазмових струменях і потоках.

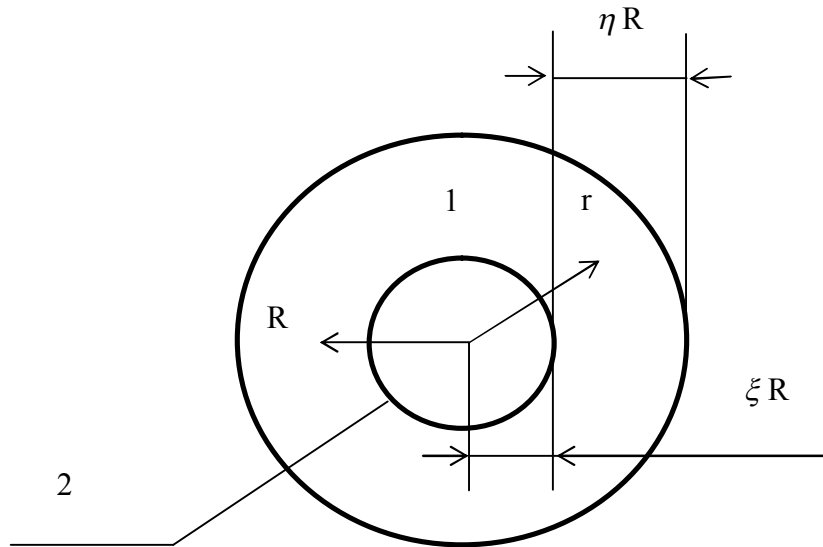
У процесі знаходження дисперсного матеріалу в плазмовому струмені його частки піддаються тепловому впливу струменя. У процесі теплообміну струменя і частинки відбувається ряд спільно проходять процесів, що призводять до зміни форми і розміру частинки: нагрівання; плавлення; випаровування; механічної руйнації. Вказані процеси призводять до зміни дисперсності частинок [1].

За останні роки неухильно зростає інтерес до обробки в плазмі дисперсних матеріалів, що мають різні теплофізичні властивості та склад. Плазмовому впливу піддаються матеріали від найпростіших до складних металів, таких як композиційні і руди. В даний час проведено досить великий аналіз впливу температури плазмового струменя, величини теплоємності газу, співвідношення витрат газу і порошку на процеси нагрівання, плавлення і перегріву розплавлених частинок. Диспергування розплавів плазмовим потоком газу - високопродуктивний процес, який легко здійснити за безперервною схемою і автоматизувати, він економічний і екологічний. Цим методом отримують порошки металів і сплавів Fe, Al, Cu, Pb, Zn, Ti, W та ін. Тому, для отримання нових унікальних влас-

тливостей порошків с заданими характеристиками це питання є актуальним.

Постановка задачі. У роботах[1-3] проведені теоретичні дослідження взаємодії частинки у плазмовому струмені. Механізм руйнування сферичних частинок в потоці плазми можна представити у вигляді декількох процесів, що проходять незалежно один від одного, описаних нижче.

У певний момент часу ($t \neq 0$) на поверхні частинки виникають температури, які викликають дотичні і радіальні термопружні напруги, що перевищують межу міцності матеріалу частинки. Це супроводжується руйнуванням частинки. Під дією теплового потоку струменя відбувається розплавлення поверхні частинки. За час польоту частинки відбувається просування межі плавлення вглиб частинки. Частка може повністю проплавитись під дією теплового потоку, матеріал може нагрітись до температури випаровування і полинути з її поверхні. Розплавлена частка може затверднути. Рух межі розділу походить від поверхні вглиб частинки, що в свою чергу викликає напруги. Наростання напруг може привести до руйнування частинки. Ці процеси викликають зміну геометричних розмірів часток. Нехай частка має сферичну форму і являє собою кулю радіуса R . Початкова температура кулі дорівнює T_0 .



η – товщина рідкого прошарку; R – радіус частинки; r – поточний радіус; ξ – межа твердої фази; 1 – зона рідини.

Рисунок 1 – Розрахункова схема плазмотрона

У момент часу ($t = 0$) куля поміщається в середу з постійною температурою T_c . Визначимо розподіл температури всередині кулі в момент часу, коли температура на поверхні кулі стане рівною температурі плавлення. Вважаємо, що ізотермічні поверхні представляють собою концентричні сфери.

Виклад матеріалу і його результати. Рівняння теплопровідності для шару може бути записано у вигляді:

$$T(r, \tau) = T_c + 2(T_o - T_c) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i)}{(\mu_i - \sin \mu_i \cos \mu_i)} \cdot \frac{\sin \mu_i \cdot \frac{r}{R}}{\mu_i \cdot \frac{r}{R}} \cdot e^{-\mu_i^2 F_o} \quad (1)$$

Одним з технологічних параметрів процесу диспергування є час нагрівання частинки до температури плавлення, а також час, необхідний на плавлення. Нехай є куля з заданим законом розподілу

температур $T(r, \tau_o)$. Тут – τ_o визначає час нагрівання поверхні кулі до температури плавлення. Починаючи з моменту τ_o , температура поверхні кулі весь час нагрівається при $T_c > T(R, \tau_o)$. На поверхні кулі утворюється розплавлений шар рідини товщиною η (рисунок 1).

Якщо знехтувати теплотою, направленою на нагрів твердого ядра, порівняно з теплотою плавлення, то для спрощення задачі можна припустити, що температура твердого ядра всюди однакова і дорівнює температурі $T_{пл}$. Це справедливо, оскільки температура твердого ядра за час нагріву τ_o , близька до температури плавлення, тобто,

$$T(r, \tau) = T_{пл}, \quad (2)$$

$$\tau > \tau_o.$$

Тоді математичне формулювання завдання виглядає як:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi_1 \tau)}{\partial r} = Q_{нл} \cdot \rho \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (3)$$

де λ_1 – теплопровідність рідкої фази;

$Q_{нл}$ – теплота плавлення матеріалу;

ρ – густина рідкої фази.

Температура на поверхні кулі після часу нагріву, що дорівнює τ_0 , мало відрізняється від температури навколишньої частки плазмового струменя, тому розподіл температури в полуму шарі з розплаву приймаємо відповідним законом стаціонарного розподілу температури та після інтегрування знаходимо:

$$\tau = \frac{Q_{нл} \rho (R^3 - 3R\xi^2 + 2\xi^3)}{6\lambda_1 (T_1 - T_{нл}) R}. \quad (4)$$

Тоді час повного розплавлення шару є ($\xi = 0$):

$$\tau = \frac{Q_{нл} \rho R^2}{6\lambda_1 (T_1 - T_{нл})}. \quad (5)$$

Загальний час, за яке частинка відчуває термічну взаємодію плазмового струменя: $\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_m$.

Задачу теплової обробки частинки в неізотермічному потоці низькотемпературної плазми вирішують виходячи з умов завдання руху та нагріву термічно "тонкої" частинки (критерій Біо $Bi < 1$) у потоці низькотемпературного газу.

Розшарування теплообміну між фазами (частинки і газ) враховує співвідношення між внутрішніми і зовнішніми термічними опорами, зв'язок між якими встановлює число Біо:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda_{нл}}, \quad (6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

R – характерний розмір тіла;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу частинки.

При знаходженні в плазмовому струмені частинки можуть дробитися дією газового потоку. Це враховує показник Вебера.

$$We = \frac{\rho_g d_r (\omega_g - \omega_r)}{\sigma}, \quad (7)$$

де ρ_g – щільність газу;

d_r – діаметр частинки;

ω_g – швидкість газу;

ω_r – швидкість частинки;

σ – поверхневий натяг розплаву частинки. Цей показник характеризує можливість виникнення зазначеного явища.

Випаровування дисперсних частинок в потоці плазми враховує вираз для Нусельта через відносну пружність пари і молекулярну масу:

$$Nu = 2 + 0,03 Pr^{0,33} \cdot Re^{0,54} + 0,35 Pr^{0,36} Re^{0,58}. \quad (8)$$

Модель нагрівання частинки в плазмі. Для вирішення теплової задачі про нагрівання сферичної частинки в плазмі, ґрунтуючись на аналітичних розрахунках [1-3] була розроблена математична модель в середовищі MATLAB. Використовуючи вказані залежності та необхідні константи для частинки діоксиду цирконія ZrO_2 [4-6], отримаємо залежності, які приведені на рисунках:

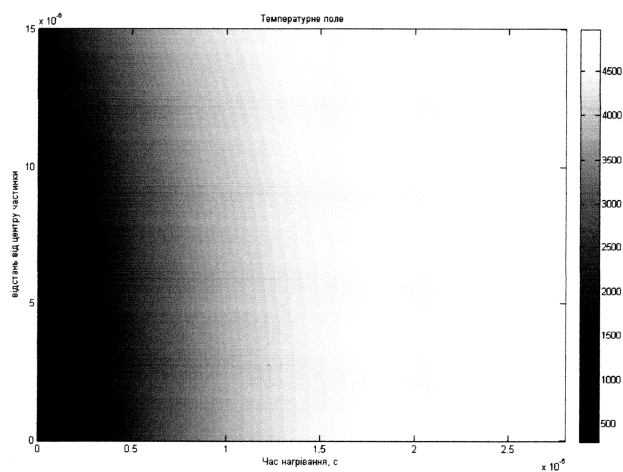


Рисунок 2 – Розподіл температур по радіусу частинки з часом

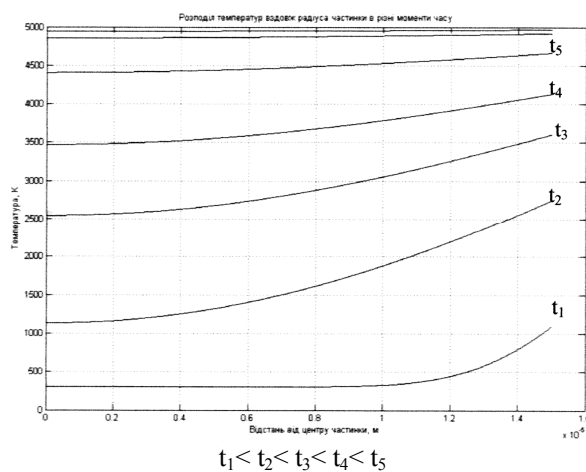


Рисунок 3 - Розподіл температур вздовж радіуса частинки у різні моменти часу

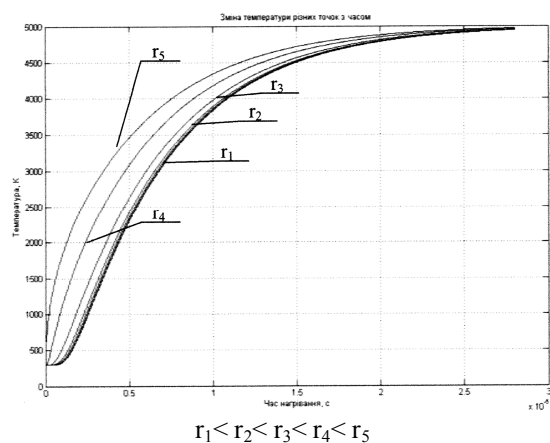


Рисунок 4 - Нагрів точок з часом

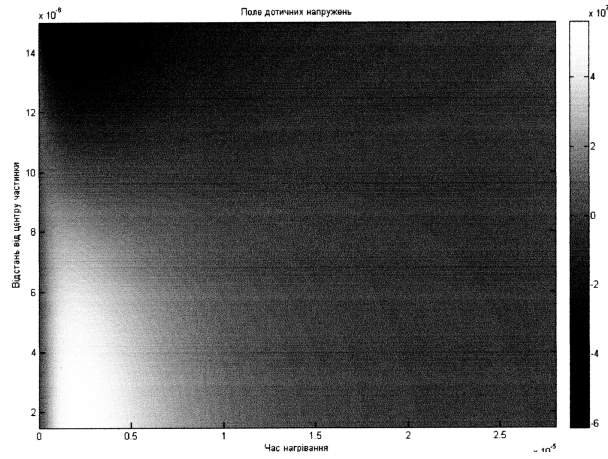


Рисунок 5 - Розподіл дотичних напруг по радіусу частинки з часом

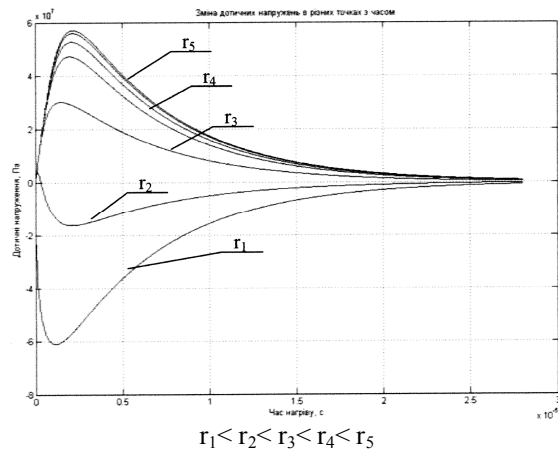


Рисунок 6 - Зміна дотичних напруг в різних точках з часом

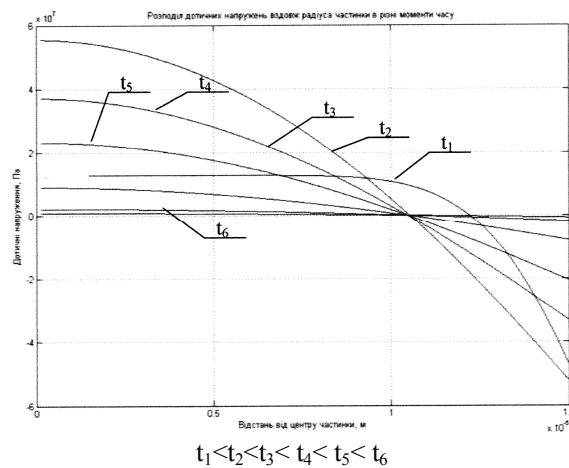


Рисунок 7 - Розподіл дотичних напруг вздовж радіуса частинки в різні моменти часу

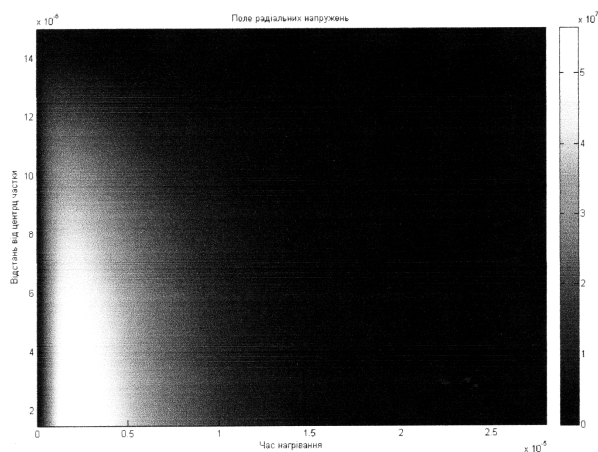


Рисунок 8 – Розподіл радіальних напруг по радіусу частинки з часом

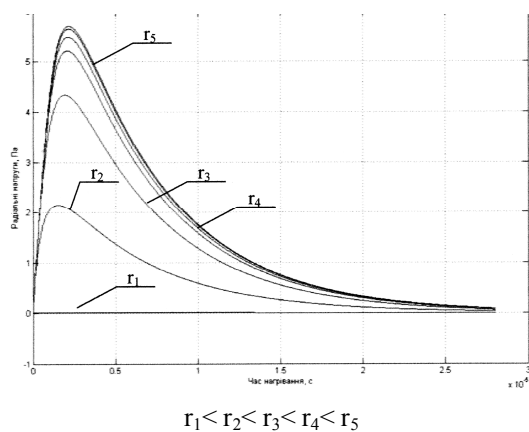


Рисунок 9 – Зміна радіальних напруг в різних точках з часом

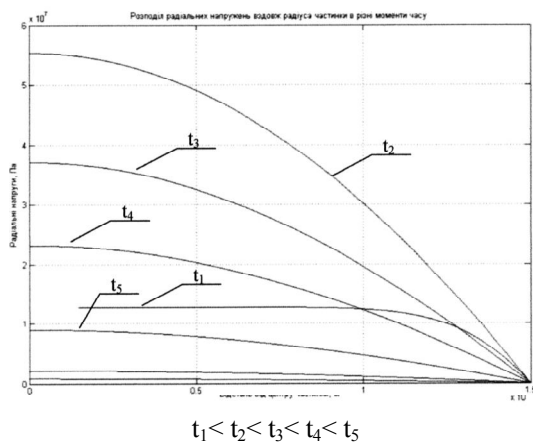


Рисунок 10 – Розподіл радіальних напруг вздовж радіуса частинки в різні моменти часу

Висновки і напрямки подальших досліджень. Математична модель, розрахована нами відносно нагріву частинки в активній зоні струї, є найбільш простою і достатньо добре описує процес нагріву частинки та напруг до температури плавлення матеріалу та дозволяє для різних порошків оцінити характеристики та якість отриманого на виході з плазмового струменя порошку.

Диспергування перегрітих розплавів, у яких міжатомні зв'язки дуже слабкі, призводить до утворення досить однорідних як за складом, так і за розмірами частинок,

ступінь кристалічності яких можна варіювати, змінюючи швидкість їх охолодження. У різних плазмових технологічних процесах матеріали досягають різної глибини і ступеня фізико - хімічних перетворень, тому можна отримати різні порошки з заданими властивостями, які можна використовувати у металургійній промисловості. Виявлено, що плазмове диспергування тугоплавких порошків є більш простим і достатньо економічним процесом одержання порошків порівняно із традиційними методами.

Бібліографічний список

1. Дзюба В.Л. *Физико-химические основы плазменного получения тугоплавких кислородных и бескислородных порошков* / В.Л. Дзюба, О.Н.Ключник, С.Н. Сергиенко. – Алчевск, ДонГТУ, 1993.– 113с.
2. Полак Л.С. *Исследование взаимодействия частиц порошка с потоком лазмы в сопле* / Л.С. Полак, Н.С. Суворов //Физика и химия обраб. материалов. – 1969. – №2. - С.19– 29.
3. Иванов Е.М. *Инженерный расчет теплофизических процессов при плазменном напылении* / Е.М. Иванов. – Саратов: Изд- во ун- та, 183. - 137 с.
4. Исаченко В. П. *Теплопередача: справочник* / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. - 1975. - 314с.
5. *Физические свойства металлов и сплавов* / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Ливнецкий. - М.: Металлургия 3. - 1989. – 120.с.
6. *Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей; 2-е изд., доп. и перераб* / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

Рекомендована до друку д.т.н., проф. Заблодським М.М.

Стаття надійшла до редакції 27.06.13.

к.т.н. Сергиенко С.Н., Бирюкова Т.В., Алексеева М.Ю. (ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОРОШКОВ

Приведены результаты теоретических исследований, математических расчетов, получены зависимости, описывающие процесс плазменного диспергирования порошков.

Ключевые слова: *плазма, диспергирование, частица, математическая модель, радиальные и касательные напряжения.*

Sergienko S.N., Biriukova T.V., Alekseeva M.Y. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

STUDY OF THE PLASMA DISPERSION OF REFRACTORY POWDERS

The results of theoretical research, mathematical calculations, the dependences describing the process of the plasma dispersion powders.

Key words: *plasma, dispersion, particle, the mathematical model, the radial and tangential stresses.*