

УДК 621.793.7

В.В. Кустов¹, М.В. Маковійчук², Л.Я. Роп'як¹¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу²Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України**ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТА НАГРІВАННЯ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ В ПРОЦЕСІ НАПИЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ**

Досліджено процес руху та зміну температури частинок порошку, введених у потік розпилюючого газу при напиленні композиційних покриттів. Систему диференціальних рівнянь, що описують рух та нагрівання частинки порошку для випадку неоднорідних полів швидкості та температури газового потоку розв'язано чисельним методом Рунге-Кутта. Проаналізовано залежність отриманих розв'язків для різних матеріалів частинок порошку (алюміній, титан, залізо, молибден, карбід вольфраму) від технологічних параметрів процесу електродугового напилення композиційних покриттів. Встановлено характер зміни температури та швидкості частинок порошку вздовж дистанції напилення. Показано, що температура частинки порошку, яка досягла поверхні деталі є дещо менша від температури частинки, утвореної розпиленням суцільних дріт-електродів із того ж матеріалу.

Ключові слова: частинка порошку, дроти-електроди, електродугове напилення, композиційне покриття, температура нагріву, швидкість частинки порошку.

Форм. 12. Табл. 1. Рис. 5. Літ. 14.

В.В. Кустов, Н.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ПРОЦЕССЕ НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ**

Исследован процесс движения и изменения температуры частиц порошка, введенных в поток распыляющего газа при напылении композиционных покрытий. Система дифференциальных уравнений, которые описывают движение и температуру частицы порошка для случая неоднородных полей скорости и температуры газового потока решена численным методом Рунге-Кутта. Проанализирована зависимость полученных решений для различных материалов частиц порошка (алюминий, титан, железо, молибден, карбид вольфрама) от технологических параметров процесса электродугового напыления покрытий. Установлен характер изменения температуры и скорости частиц вдоль дистанции напыления. Показано, что температура частицы порошка, которая достигла поверхности детали несколько меньше температуры частицы, образованной распылением сплошных проволок-электродов из того же материала.

Ключевые слова: частица порошка, проволоки-электроды, электродуговое напыление, композиционное покрытие, температура нагрева, скорость частицы порошка.

V.V. Kustov, M.V. Makoviichuk, L.Ya. Ropiak**RESEARCH OF MOTION AND HEATING OF PARTICLES OF POWDER IN PROCESS OF SPRAY COATING BY ELECTRIC-ARC METHOD**

The motion and thermal change of powder particles in the stream of gas at spray coating process are studied. The system of differential equations that describe motion and temperature of powder particle in the case of the heterogeneous speed and temperature fields of gas stream is solved with the numerical Runge-Kutta method. Dependence of the solutions on the technological parameters of coating arc spraying is analyzed for different materials of powder particles (aluminium, titanium, iron, molybdenum, tungsten carbide). The type of thermal change and speed of powder particles are determined along the distance of spraying. It is shown that the temperature of powder particle, which reached the surface of detail, is somewhat less than the one of the particle produced by spraying of continuous wires-electrodes made of the same material.

Key words: particles of powder, wires-electrodes, electroarc coating, composite coating, heating temperature, speed of powder particles.

Вступ. Для виготовлення нових та відновлення зношених деталей машин, робочі поверхні яких повинні мати задані фізико-механічні, трибологічні та електрохімічні властивості застосовують функціонально-орієнтовані технології [1]. У цих технологіях важливе місце займають технологічні процеси формування покриттів, які наносять газотермічним напиленням (газополуменевим, газоелектричним). При газополуменевому напиленні покриттів джерелом тепла є факел полум'я утворений при згорянні суміші горючий газ – кисень. При газоелектричних методах напилення для нагрівання матеріалу використовується тепло електричної дуги, індукційного високочастотного нагрівання, електродного плазмового струменя. Серед вказаних методів напилення покриттів слід виділити електродуговий метод, який володіє високою тепловою ефективністю (до 57 %) у порівнянні з плазмовим (17 %) і газополуменевим (13 %) [2].

При електродуговому напиленні покриття наносять з дріт (суцільних або порошкових) [3–5] або додатково вводять частинки порошку в металоповітряний потік для отримання композиційних покриттів із заданою концентрацією компонентів у покритті [6].

© В.В. Кустов, М.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливим показником у процесі напилення покриттів є температура та швидкість частинок у момент досягнення ними поверхні деталей, оскільки від цих показників суттєво залежить якість покриттів. Автори [3–5] проводили експерименти з дослідження швидкості частинок за допомогою швидкісної кінокамери та визначення їх температури калориметричним методом. Розрахунок швидкостей є трудомістким, а отримані значення температури є усередненими. У роботі авторів [7] запропоновано методику оптимального вибору початкових умов руху (початкової швидкості та положення дозуючої трубки), з метою виведення кінцевих точок траєкторій частинок порошку на вісь сопла і тим самим забезпечити їх потрапляння у центр області напилення без врахування теплообміну із струменем розпилюючого повітря.

Відомі також результати експериментальних досліджень розподілу температури в повітряному струмені і напилюваній основі при металізації електродуговим методом [8]. В роботі [9] здійснена аналітична оцінка нагріву і переміщення частинок в однорідному плазмовому потоці зі сталими фізичними параметрами. Розрахунок температури і траєкторій частинок порошку у плазмовому струмені із заданими профілями швидкостей та температури з урахуванням кута введення частинок в канал здійснено в праці [10]. Результати досліджень [8–10] стосуються плазмового напилення покриттів і їх неможна безпосередньо застосувати для моделювання процесу напилення композиційних покриттів електродуговим методом, так, як відмінною особливістю цього методу є високоградієнтний розподіл температури струменя повітря в околі зосередженого джерела тепла (електричної дуги).

Метою даної роботи є дослідження руху та зміни температури частинок порошку за різних початкових умов їх уведення в потік розпилюючого повітря при електродуговому методі напилення для оптимізації технології нанесення композиційних покриттів.

Формулювання задачі та припущення моделі. Дослідження руху та зміни температури частинок порошку, введених у струмінь газу здійснюємо за таких модельних припущень: 1) радіальна швидкість поширення газового струменя є значно менша від його осьової швидкості, тому її значенням нехтуємо (приймаємо рівною нулю); 2) поля температури та швидкостей газового струменя вважатимемо стаціонарними, тобто незмінними в часі; 3) унаслідок малих розмірів частинок порошку та швидкий перебіг процесу поширення тепла у металах, фактичний розподіл температури у об'ємі частинки не враховуємо і вважаємо, що температура змінюється одночасно для всієї частинки; 4) під час руху частинки порошку не змінюють форму та розміри; 5) концентрація частинок порошку в струмені повітря незначна та їх присутність не впливає на параметри металогазового потоку.

При електродуговій металізації для формування композиційних покриттів уведення частинок порошку у конус повітряного струменя здійснюється у радіальному напрямку. За таких умов вважаємо, що задача володіє осьовою симетрією, тобто рух частинки характеризується двома координатами і відбувається у вертикальній площині, яка проходить через вісь сопла електродугового металізатора та дозуючої трубки порошкового живильника. Дослідження проводимо в системі координат Ox з початком в полюсі газового струменя, спрямувавши вісь Ox вздовж осі сопла в напрямку поверхні на яку напилюють покриття, а вісь Oy – вертикально вгору (рис. 1). При цьому вважатимемо, що частинки порошку рухаються під дією власної ваги G і сили аеродинамічного опору $F_{оп}$. Всі інші сили, що можуть виникати у процесі руху частинки порошку, наприклад за рахунок нерівномірного розподілу градієнтів тиску та швидкості струменя повітря, та запізнення відклику середовища на зміну її швидкості, вважаються такими, що мають незначний вплив унаслідок малості часу руху та розмірів цієї частинки.

З метою визначення кінематичних та теплових характеристик процесу електродугового напилення композиційних покриттів запишемо диференціальні рівняння руху та нагріву твердої частинки введеної у повітряний струмінь і дослідимо залежність їх розв'язків від вихідних технологічних параметрів процесу та початкових умов.

Диференціальні рівняння руху. Рух та нагрівання частинок порошку в струмені газу в рамках прийнятих припущень описується системою диференціальних рівнянь

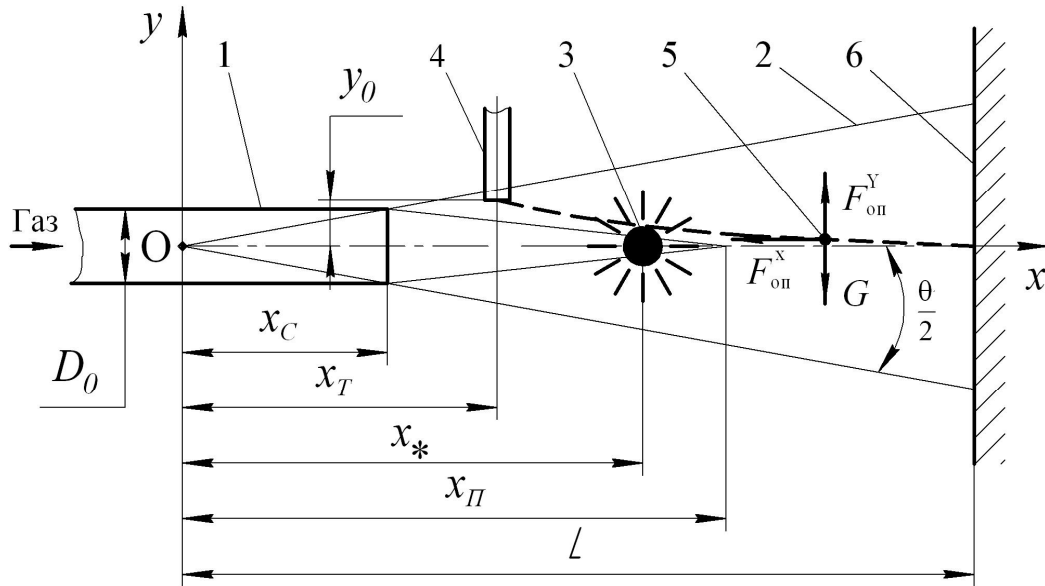


Рис. 1. Схема введення частинок порошку в струмінь розпилюючого повітря при електродуговому напilenні композиційних покриттів: 1 – сопло; 2 – повітряний струмінь; 3 – електрична дуга (точкове джерело тепла); 4 – дозуюча трубка живильника; 5 – частинка порошку; 6 – поверхня на яку напильється покриття

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_d S_{mid} \rho_g |\vec{V}_g - \vec{V}_p| (\vec{V}_g - \vec{V}_p) + m_p \vec{g},$$

$$c_p m_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p S_{surf} (T_g - T_p),$$
(1)

де

m_p – маса частинки порошку, кг;

V_p – швидкість частинки порошку, м/с;

V_g – швидкість струменя розпилюючого газу, м/с;

T_p – температура частинки порошку, °С;

T_g – температура струменя розпилюючого газу, °С;

ρ_g – густина газу, кг/м³;

c_p – питома теплоємність матеріалу частинки порошку, Дж/(кг·°С);

d_p, r_p – діаметр та радіус сферичної частинки порошку відповідно, м;

S_{mid} – площа міделевого січення частинки порошку, м².

Коефіцієнт лобового опору частинки порошку C_d та її коефіцієнт тепловіддачі α_p визначаються із критеріальних співвідношень згідно емпіричних залежностей [9]

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}), \quad \alpha_p = Nu \frac{\lambda_g}{d_p};$$
(2)

$$Re = \frac{\rho_g d_p |\vec{V}_g - \vec{V}_p|}{\mu_g}, \quad Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr = \frac{\mu_g c_g}{\lambda_g}.$$
(3)

Тут Re, Nu, Pr – числа Рейнольдса, Нуссельта та Прандтля відповідно;

μ_g – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с;

λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·°С);

c_g – питома теплоємність газу, Дж/(кг·°С).

Площа поверхні, площа міделевого січення та маса частинки порошку сферичної форми визначаються відповідно за формулами

$$S_{surf} = \pi d_p^2, \quad S_{mid} = \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad m_p = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6}.$$

Для обчислення значень горизонтальної складової швидкості $V_{g,x}(x, y)$ (за припущенням $V_{g,y}(x, y) \equiv 0$), а також температури $T_g(x, y)$ струменя повітря, розглянемо його спрощену схему, що складається з початкової ділянки з сталою осью швидкістю та основної частини, де осьова швидкість є змінною. Встановлено, що для турбулентних газових струменів поперечні профілі обезрозмірених величин горизонтальної швидкості та температури у межах основної ділянки ($x > x_{\Pi}$) мають універсальний вигляд [11]

$$\frac{V_{g,x}(x, y)}{V_{g,x}(x, 0)} = \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)} \right)^2 \right)^2, \quad \frac{T_g(x, y) - T_H}{T_g(x, 0) - T_H} = 1 - \left(\frac{y}{b(x)} \right)^2.$$

Спадання швидкості та температури газу вздовж осі струменя ($y = 0$) на основній ділянці ($x > x_{\Pi}$) здійснюється за гіперболічним законом [11]

$$\frac{V_{g,x}(x, 0)}{V_{g,x}^0} = \frac{x_{\Pi}}{x} = \frac{\frac{a}{R_0} x_{\Pi}}{\frac{a}{R_0} (x_c + s)} = \frac{0,96}{0,29 + \frac{as}{R_0}}, \quad (4)$$

$$\frac{T_g(x, 0) - T_H}{T_{g\Pi} - T_H} = \frac{x_{\Pi}}{x} = \frac{\frac{a}{R_0} x_{\Pi}}{\frac{a}{R_0} (x_c + s)} = \frac{0,7}{0,29 + \frac{as}{R_0}}. \quad (5)$$

Тут $b(x) = tg \frac{\theta}{2} \cdot x$ – змінний радіус струменя повітря; $R_0 = D_0 / 2$ – радіус сопла; $a \approx 0,07$ – коефіцієнт турбулентності, який визначається емпірично за розмірами сопла [7]; s – координата із початком відліку на зрізі сопла; $x_c = 0,008$ м – глибина полюса струменя ($x_c = x - s$); x_{Π} , x_{Π} – координати перехідних перерізів профілів швидкості та температури; $T_{g\Pi}$, T_H – значення температури повітря у перехідному перерізі струменя та у навколишньому середовищі; $V_{g,x}^0$ – швидкість повітря у початковому перерізі струменя (на зрізі сопла).

Із виразів (4), (5) видно, що перехідний переріз профіля температури знаходиться дещо ближче до початку струменя ніж перехідний переріз профіля швидкості ($x_{\Pi} = 0,02$ м, $x_{\Pi} = 0,027$ м). На початковій ділянці струменя ($x_c \leq x \leq x_{\Pi}$) швидкість струменя вздовж осі не міняється і дорівнює початковому значенню на зрізі сопла $V_{g,x}(x, 0) = V_{g,x}^0 = \text{const}$.

Щодо визначення поля температури на початковій ділянці і врахування високих температурних градієнтів у безпосередній близькості до електричної дуги, використаємо модель точкового джерела тепла, сталої потужності q (Вт) у рухомому середовищі. Вважатимемо, що джерело тепла розміщене в точці $(x_*, 0)$, а середовище рухається з постійною швидкістю $V_{g,x}^0$ у додатному напрямку осі Ox . Таким чином, у рамках припущень про усталені режими струменя повітря та поширення тепла, стаціонарне поле температури у межах початкової ділянки ($x_c < x < x_{\Pi}$) у площині Oxy опишемо формулою [12]

$$T_g(x, y) = \frac{q}{4\pi\lambda_g R_*} \exp \left[-\frac{V_{g,x}^0}{2k^2} (R_* - (x - x_*)) \right].$$

Тут $R_* = \sqrt{(x-x_*)^2 + y^2}$ – відстань до точкового джерела тепла, м; $k^2 = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g}$ – коефіцієнт

температуропровідності повітря, м²/с.

Унаслідок ідеалізації моделі, пов'язаною із заміною електричної дуги певних розмірів, точковим джерелом тепла, у місці його розташування $(x_*, 0)$ виникає сингулярність поля температури. З метою усунення фізичного протиріччя, на значення температури накладемо обмеження $T_g(x, y) < T_{\max}$, де T_{\max} – максимально допустима температура електричної дуги. Згідно даних [4, 13] температура електричної дуги міняється в межах $T_{\max} = 5800 \dots 6200$ °С.

Потужність електричної дуги q , що впливає на градієнт температури середовища поблизу дуги визначимо за формулою

$$q = IU,$$

де I – сила струму, А; U – напруга, В. Для електродугового наплення залежно від матеріалу та діаметрів дровів-електродів $D = 0,0015 \dots 0,002$ м ці параметри знаходяться в межах: $I = 70 \dots 150$ А; $U = 25 \dots 35$ В [14].

Остаточні формули для інженерного розрахунку поля температури від точкового джерела тепла та горизонтальної складової швидкості у довільній точці газового струменя представимо у вигляді:

$$T_g(x, y) = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\lambda_g R_*} \exp\left[-\frac{v}{2k^2}(R_* - (x-x_*))\right], & x_c \leq x < x_{\text{пт}}; \\ T_H + (T_{g\text{пт}} - T_H) \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right) \frac{x_{\text{пт}}}{x}, & x_{\text{пт}} \leq x < x_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

$$V_{g,x}(x, y) = \begin{cases} V_{g,x}^0 \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right)^2, & x_c \leq x < x_{\text{пт}}; \\ V_{g,x}^0 \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right)^2 \frac{x_{\text{пт}}}{x}, & x_{\text{пт}} \leq x < x_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Результати обчислення температури та швидкості за формулами (6), (7) показані на рис. 2.

Спроектвавши векторне рівняння руху з системи (1) на осі координат та враховуючи вирази (2), (3), отримаємо систему взаємопов'язаних рівнянь, що описують рух та нагрівання частинки порошку в струмені розпилюючого газу

$$\begin{aligned} \frac{dV_{p,x}}{dt} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{0,687}\right) (V_{g,x} - V_{p,x}), \\ \frac{dV_{p,y}}{dt} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{0,687}\right) (V_{g,y} - V_{p,y}) - g, \\ \frac{dT_p}{dt} &= \frac{6\lambda_g}{d_p^2 \rho_p c_p} \left(2 + 0,6 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{1/2} \left(\frac{\mu_g c_g}{\lambda_g}\right)^{1/3}\right) (T_g - T_p). \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $V = \sqrt{(V_{g,x} - V_{p,x})^2 + (V_{g,y} - V_{p,y})^2}$ – модуль відносної швидкості частинки порошку у струмені розпилюючого повітря.

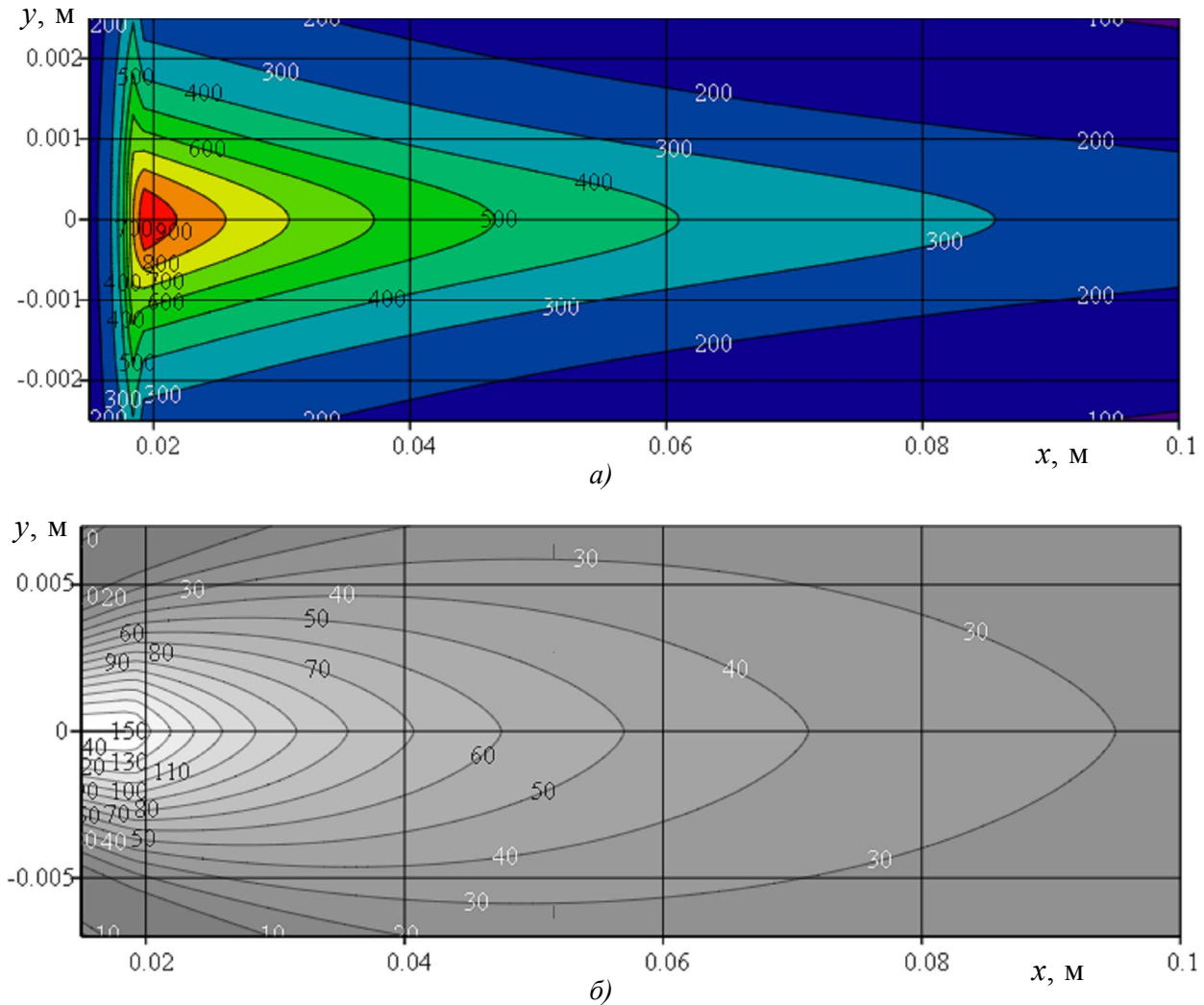


Рис. 2. Поле температури $T_g(x, y)$ (а) та поле горизонтальної складової швидкості $V_{g,x}(x, y)$ (б) в осьовому перерізі струменя розпилюючого повітря

Розв'язок системи рівнянь (8) визначатиме зміну швидкості та температури частинки порошку в часі. Наявність у останньому рівнянні величини V відображає очевидний факт, що температура частинки порошку залежатиме від її відносної швидкості, а тим самим і від часу перебування у потоці повітря.

Для визначення закону руху частинки порошку $x_p = x_p(t)$, $y_p = y_p(t)$ та побудови її траєкторії систему (8) потрібно доповнити залежностями

$$\frac{dx_p}{dt} = V_{p,x}(t), \quad \frac{dy_p}{dt} = V_{p,y}(t). \quad (9)$$

Варто зазначити, що у випадку стаціонарного розподілу полів швидкостей \vec{V}_g та температури T_g розпилюючого газу система рівнянь (8) явно не міститиме часову змінну t . У такому разі можна отримати незмінні у часі, координатні залежності швидкості та температури частинки безпосередньо вздовж траєкторії, що мають більшу наочність та є зручними для аналізу і практичного використання. Для цього у похідних від швидкостей перейдемо до диференціювання за координатами

$$\frac{dV_{p,x}}{dt} = \frac{dx_p}{dt} \frac{dV_{p,x}}{dx_p} = V_{p,x} \frac{dV_{p,x}}{dx_p}, \quad \frac{dV_{p,y}}{dt} = \frac{dy_p}{dt} \frac{dV_{p,y}}{dy_p} = V_{p,y} \frac{dV_{p,y}}{dy_p},$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{dx_p}{dt} \frac{dT_p}{dx_p} = V_{p,x} \frac{dT_p}{dx_p}.$$

Після підстановки вищенаведених виразів систему рівнянь (8) запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} V_{p,x} \frac{dV_{p,x}}{dx_p} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{0,687} \right) (V_{g,x} - V_{p,x}), \\ V_{p,y} \frac{dV_{p,y}}{dy_p} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{0,687} \right) (V_{g,y} - V_{p,y}) + g, \\ V_{p,x} \frac{dT_p}{dx_p} &= \frac{6\lambda_g}{d_p^2 \rho_p c_p} \left(2 + 0,6 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_g c_g}{\lambda_g} \right)^{1/3} \right) (T_g - T_p). \end{aligned} \quad (10)$$

Для визначення складових параметрів руху частинок порошку у потоці розпилюючого повітря отримані рівняння слід розв'язувати задавши для системи (8), (9) умови у початковий момент часу:

$$V_{p,x}|_{t=0} = V_{p,x}^0, \quad V_{p,y}|_{t=0} = V_{p,y}^0, \quad x_p|_{t=0} = x_p^0, \quad y_p|_{t=0} = y_p^0, \quad T_p|_{t=0} = T_p^0, \quad (11)$$

а для системи (10) умови у початковій точці руху:

$$V_{p,x}|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = V_{p,x}^0, \quad V_{p,y}|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = V_{p,y}^0, \quad T_p|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = T_p^0. \quad (12)$$

Результати дослідження. Числовий розв'язок систем нелінійних диференціальних рівнянь (8) та (10) з відповідними початковими умовами (11), (12) отримали за допомогою алгоритму Рунге-Кутта 4-го порядку.

Обчислення проводили для частинок порошку з таких матеріалів: алюміній, титан, залізо, молібден, карбід вольфраму середньої грануляції ($d_p = 50 \cdot 10^{-6}$ м), за початкових умов введення: $x_0 = 0,01$ м, $y_0 = 0,002$ м, $V_{px}^0 = 0$ м/с, $V_{py}^0 = 0,5$ м/с і значень фізичних параметрів повітряного струменя: $V_{gx}^0 = 150$ м/с, $T_p^0 = T_H = 20$ °С, $\rho_g = 0,277$ кг/м³, $\mu_g = 49 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м², $\lambda_g = 8,07 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·°С), $c_g = 1,185 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С).

Зміну температури частинки порошку різних матеріалів вздовж горизонтального переміщення ілюструє рис. 3. Для порівняння також наведено температуру повітряного потоку вздовж кожної з траєкторій. Розрахунок температури частинок порошку здійснювали виходячи з умови, щоб максимальна температура нагріву не перевищувала температуру плавлення. Дана умова забезпечується вибором місця введення частинок у потік повітря відносно точкового джерела тепла, а також початковою швидкістю їх руху.

Як видно з графіків, наведених на рис. 3, температура частинок порошку різко зростає практично до температури плавлення в момент введення у зоні дії точкового джерела тепла (електричної дуги). Далі відбувається поступове зниження температури у потоці повітря, залишаючись при цьому досить високою на момент досягнення поверхні напилення. Слід відзначити, що спадання температури частинок порошку відбувається швидше для матеріалів із більшою температурою плавлення. Порівняно із температурою частинок, утворених розпиленням із суцільних дротів-електродів, в кінці дистанції напилення [3–5, 14], температура частинок порошку введених у струмінь розпилюючого повітря згідно із запропонованим способом [6] є дещо менша але цілком достатня для формування якісних композиційних покриттів.

Залежність горизонтальної складової швидкості частинок порошку різних матеріалів від переміщення подано на рис. 4. З рисунка видно, що фактично відразу ж після моменту введення у потік повітря швидкість частинок зростає до певної величини і далі в процесі руху практично не міняється. Також є очевидним факт, що частинки порошку матеріалів меншої питомої густини досягають більших швидкостей.

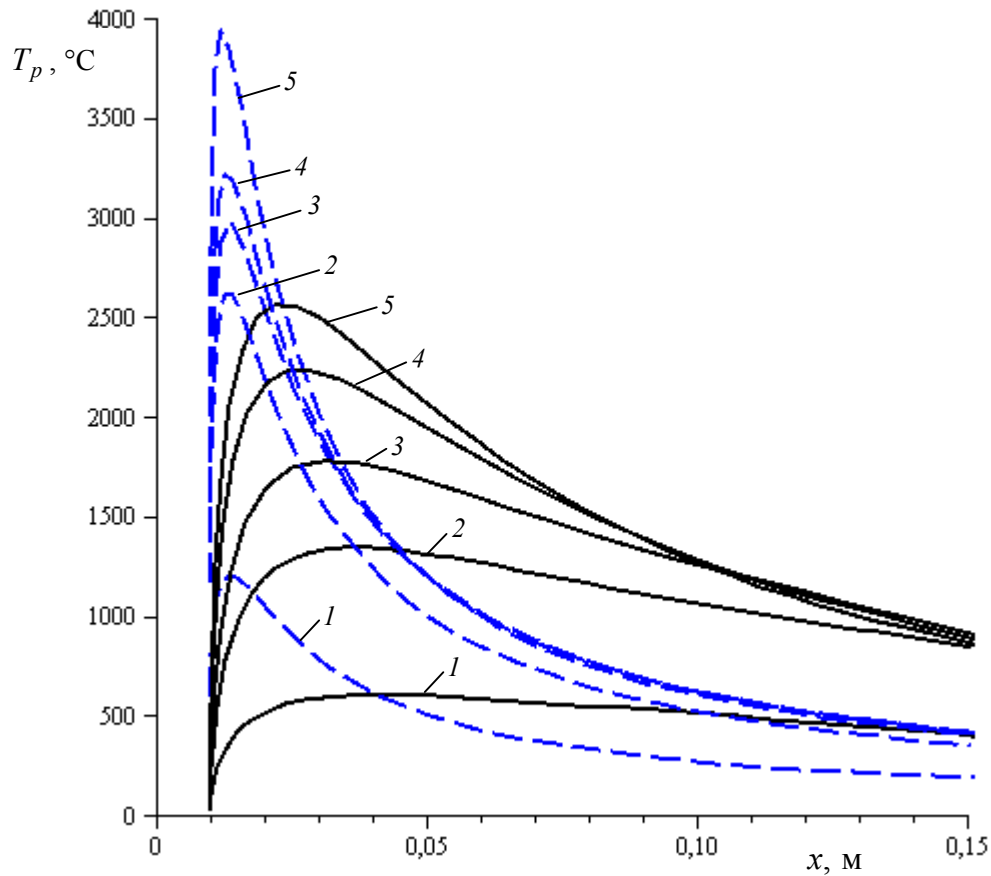


Рис. 3. Залежність температури частинок порошку від переміщення (суцільні лінії) та температура розпилюючого повітря вздовж відповідних траєкторій частинок (штрихові лінії): 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму

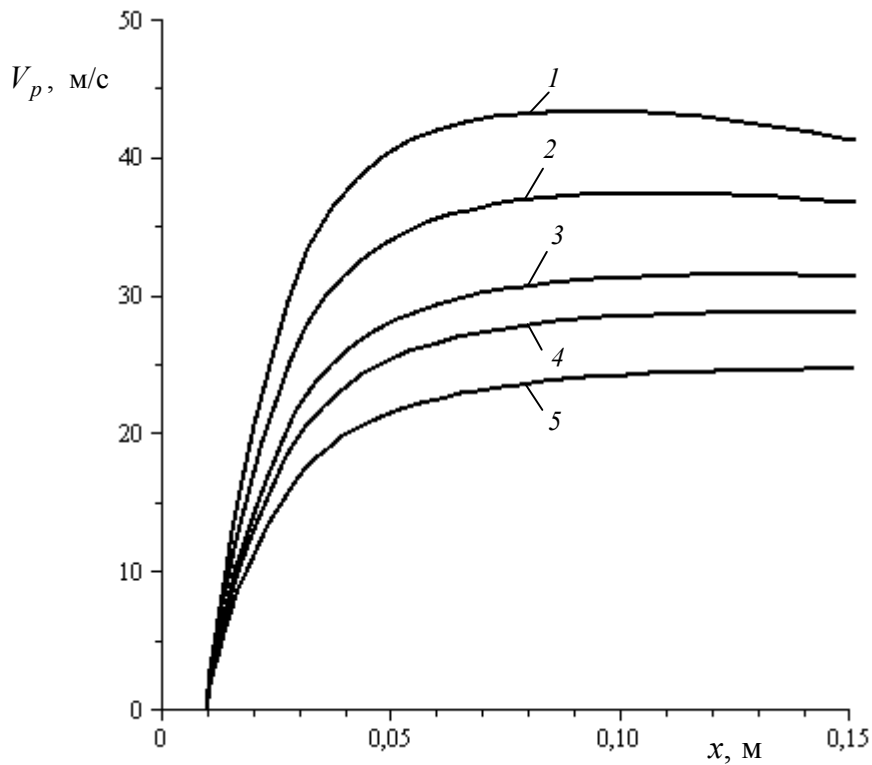


Рис. 4. Залежність горизонтальної швидкості частинок порошку від переміщення: 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму

Траєкторії руху частинок порошку різних матеріалів, які розраховані за однакових початкових умов руху, зображено на рис. 5.

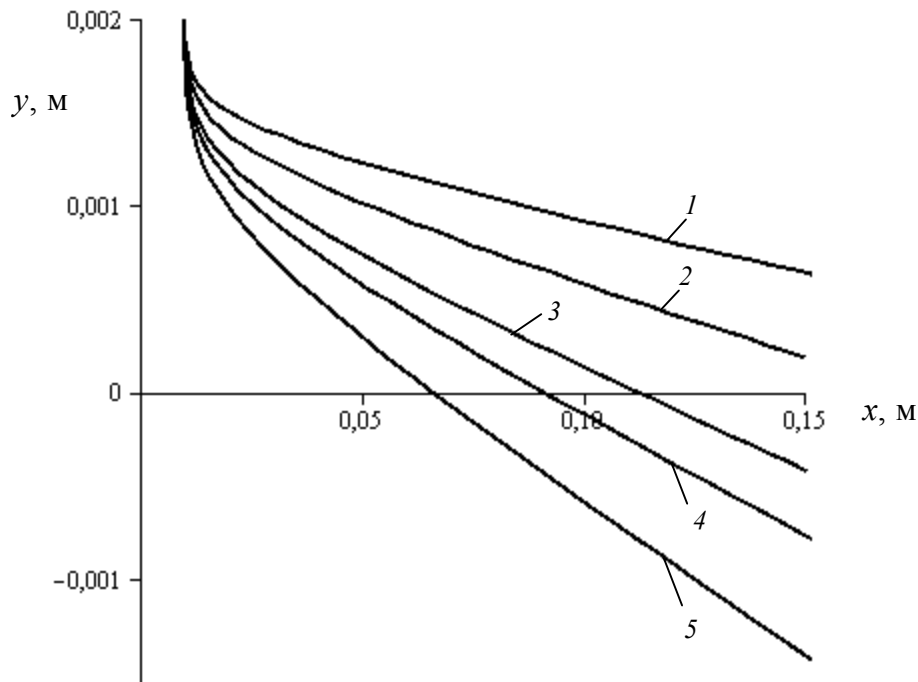


Рис. 5. Траєкторії руху частинок порошку для значень $x_p^0 = 0,01$ м, $y_p^0 = 0,002$ м, $V_{px}^0 = 0$ м/с, $V_{py}^0 = 0,5$ м/с: 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму

За однакових початкових умов руху траєкторії частинок важчих матеріалів значно відхилятимуться від частинок аналогічних розмірів меншої питомої густини. З метою, забезпечення попадання основної маси частинок порошку у центр області напилення, згідно запропонованого способу нанесення композиційних покриттів [7], для кожного матеріалу необхідно підібрати початкові умови введення його частинок у повітряний струмінь, так, щоб у кінці дистанції напилення, траєкторії вийшли на вісь симетрії повітряного потоку. Особливістю такого підбору є те, що у неоднорідному полі швидкостей вигляд траєкторій руху залежатиме також і від місця введення частинок порошку у потік повітря. Таким чином для кожних конкретних вихідних фізичних та геометричних параметрів задачі потрібно узгоджувати початкові умови руху – для заданого початкового положення кінця дозуючої трубки слід підбирати відповідну початкову швидкість введення частинок порошку в потік. Оптимальні початкові умови за дистанції напилення $L = 0,15$ м для частинок порошку вибраних матеріалів та прийнятих фізичних параметрів задачі наведено у таблиці.

Таблиця 1. Рекомендовані умови введення частинок порошку в потік розпилюючого повітря

Матеріал порошку	Алюміній	Титан	Залізо	Молібден	Карбід вольфраму
Умови введення					
Місце введення $(x_p^0; y_p^0)$, м	(0,01; 0,002)	(0,01; 0,002)	(0,01; 0,015)	(0,01; 0,015)	(0,01; 0,001)
Швидкість введення V_{py}^0 , м/с	0,8	0,6	0,4	0,25	0,15

У подальших дослідженнях планується дослідити теплову взаємодію введених частинок порошку із металоповітряним потоком, що містить краплини металу дротів-електродів у процесі наплення композиційних покриттів електродуговим методом.

Висновки. Встановлено залежності параметрів руху та температури частинок порошку, введених у потік розпилюючого повітря з неоднорідним розподілом швидкостей та температур, від технологічних параметрів при напленні композиційних покриттів електродуговим методом.

Для досліджуваних матеріалів частинок порошку (алюміній, титан, залізо, молібден, карбід вольфраму) визначено оптимальні початкові умови введення їх у неоднорідний потік розпилюючого повітря для забезпечення потрапляння цих частинок у центр області наплення.

Згідно з умовами запропонованого способу наплення температура частинки порошку в кінці дистанції є дещо менша від температури частинок утворених розпиленням із суцільних дротів-електродів, але цілком достатня для забезпечення формування якісних композиційних покриттів.

1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Герасименко В.М. Перспективные методы получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий газотермическим напылением / В.М. Герасименко. – К., 1985. – 64 с. (Обзор. информ. / УкрНИИТИ). Сер. 9. Технология и оборудование сварочного производства.
3. Хасуй А. Техника напыления / Пер. с японского С.Л. Масленникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
4. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с японского В.Н. Попова. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
5. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів, Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – 2005. – 192 с. + вклейка 8 с.
6. Патент на винахід України № 40784 МПК С 23 С 4/04, 26/02, 28/00 Установа для наплення композиційних покриттів електродуговим методом [Текст] / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010333; заявл. 20.01.00; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12. – 3 с.
7. Кустов В.В. Моделювання руху частинок порошку при напленні покриттів електродуговим методом / В.В. Кустов, М.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. Вип. 41. С. 188 – 196.
8. Воропай Н.М. Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации / Н.М. Воропай, О.И. Мажейка, С.И. Маркович // Автоматическая сварка, 2004. № 5. – С. 18–21.
9. Бороненко М.П. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе / М.П. Бороненко, И.П. Гуляев, А.Е. Серегин // Вестник Югорского гос. ун-та, 2012. – Выпуск 2 (25). – С. 7–15.
10. Хрусталева Т.Р. Расчет температуры и траектории частиц в неизотермической струе газа / Т.Р. Хрусталева, С.А. Панфилов, А.И. Друговский // Физика и химия обработки материалов, 1979. № 2. – С. 70–74.
11. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович / Репринтное воспроизведение издания 1960 г. — М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
12. Маргинсон Л.К., Малов Ю.И. Дифференциальные уравнения математической физики: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 368 с.
13. Макаров А.Н., Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Ч. 2. Теплообмен в факельных печах, топках, камерах сгорания: монография / А.Н. Макаров. – Тверь: ТГТУ, 2009. – 152 с.
14. Катц Н.В. Металлизация распылением / Н.В. Катц, Е.В. Антошин, Д.Г. Вадивасов, Г.Д. Вольперт, Г.Д. Камионский. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.

Стаття надійшла до редакції 31.12.2013.