

УДК 621.793.7.001.5

DOI:10.18372/0370-2197.4(101).18092

В. М¹. ЛОПАТА, Є. К. СОЛОВИХ², С.Є. КАТЕРИНИЧ², А.Є. СОЛОВИХ²¹Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна²Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна

ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЕННЯ СКЛОЕМАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

На підставі виконання аналізу газодинамічної моделі двофазного потоку в терморозпилюючих установках, оцінено температуру газу і часток, а також аналіз процесу теплообміну в системі «подовжений факел-частки порошку з низькою теплопровідністю», теоретично була доведена можливість напилення емалей газополуменевим методом за рахунок збільшення довжини факела. Дана аналітична оцінка теплового стану емалевих часток у факелі і у момент контакту з основою. Теоретично визначені значення температур частинок склоемалі і газової фази уздовж вісі факелу. Встановлено, що частинки склоемалі не можуть бути розм'якшені в полум'ї відомих терморозпилювачів внаслідок малої довжини високотемпературної зони факела. Теоретичний аналіз процесу теплообміну в системі "факел-частинки порошку з низькою теплопровідністю" (на прикладі порошків склоемалей) показав, що для їхнього розм'якшення необхідно збільшити тривалість перебування порошку у факелі. Розроблено спосіб газополуменевого напилювання подовженим факелом, заснований на формуванні вторинного факела за рахунок використання ефекту горіння з відривом. Аналітична оцінка теплового стану емалевих частинок у факелі пальника й у момент контакту з основою показала можливість напилювання порошків з матеріалів з низькою теплопровідністю газополуменевим методом за рахунок збільшення довжини факела. Для збільшення довжини факела запропоновано утворювати вторинний факел на відстані від сопла терморозпилювача і теоретично визначена дистанція формування вторинного факелу.

Ключові слова: склоемалеві частинки, тепла енергія, газополуменеве напилювання, рівняння теплообміну, напилення склоемалю газополуменевим методом.

Вступ. Існуючі теоретичні розробки, присвячені розрахунку часу нагрівання часток порошків при газотермічному напиленні, не враховують теплопровідність напилюваного матеріалу і справедливі для матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності не менше 10 Вт/м·К. В основу теоретичного аналізу покладена методика розрахунку, що розглядає теплообмін між нагрітим газом і частками порошку у факелі. При цьому вважали, що температура газу залишається постійною (відсутній теплообмін між факелом і навколишнім середовищем). Оскільки аналіз публікацій не дозволяє однозначно відповісти на питання - чи можна отримати якісне склоемалеве покриття традиційним газополуменевим способом, необхідно виконати аналітичну оцінку теплового стану емалевих частинок в факелі терморозпилювача в момент контакту з основою.

Виклад основного матеріалу. Будемо вважати, що високоцільні шари можна отримати тільки укладанням частинок, нагрітих до температури розм'якшення склоемалі. Складемо рівняння енергетичного балансу частки емалі, що рухається в факелі і вдаряються об поверхню основи:

$$E_k + E_m = E_n + E_o + Q_d + \Delta E_n + E_y \quad (1)$$

де E_k - кінетична енергія частинки; E_m - накопичена теплова енергія частинки; E_n - енергія, що випромінюється нагрітою часткою; E_o - теплова енергія, передана в основу; Q_d - теплова енергія, що виділяється при деформації частинки; ΔE_n - зміна поверхневої енергії частинки при деформації; E_y - енергія пружних коливань.

Вираз (1) можна переписати у вигляді:

$$E_k + E_m = E_n + E_o + A \quad (2)$$

де A - повна робота, витрачена на деформацію частинки.

На першому етапі аналізу оцінимо величину можливої теплової енергії, що додається часткою при її ударі об основу.

Рішення завдання про вимір температури, викликане зіткненням тіл, викладено в роботі [1]. Рішення базується на узагальненні інтегродиференціальних рівнянь Г. Герца, що впливають з теореми про взаємність робіт, поширеною В. Мейзелем на випадок деформування нагрітих тел. При цьому процес нагріву припускають локально адіабатичним в зв'язку з короткочасністю зіткнення. Кільчевським Н.А. [1] отримано вираз, який досить точно визначає температуру нагрівання при взаємному ударі двох пружних тіл [13]. Однак для наближеної оцінки температури можна використовувати більш простий підхід.

Припустимо, що:

$$E_k = Q_d + \Delta E_n + E_y \quad (3)$$

де $\Delta E_n = a_n \cdot \Delta S$ (a_n - поверхневий натяг; ΔS - зміна площі при деформації).

З огляду на радіус частинки r до удару і представляючи частинку після удару у вигляді циліндра висотою h , виразу для зміни площі поверхні і потенційної енергії надають вигляд:

$$\Delta S = 4\pi r^2 \left(\frac{2r}{3h} + \sqrt{\frac{h}{3r} - 1} \right) \quad (4)$$

$$\Delta E_n = 4\pi a_n r^2 \left(\frac{2r}{3h} + \sqrt{\frac{h}{3r} - 1} \right) \quad (5)$$

Зважаючи на малий часу взаємодії можна знехтувати величиною втрат енергії. Приймаючи, що енергія пружних коливань переходить в теплову, отримаємо:

$$\frac{mV^2}{2} = cm\Delta T_d + 4\pi a_n r^2 \left(\frac{2r}{3h} + \sqrt{\frac{h}{3r} - 1} \right) \quad (6)$$

де V - швидкість частинки, м/с; c - питома теплоємність емалі, Дж кг · град; ΔT_d - температура нагріву за рахунок деформації, град.

Звідки:

$$\Delta T_d = \frac{V^2}{2c} - \frac{3a_n \left(\frac{2r}{3h} + \sqrt{\frac{h}{3r} - 1} \right)}{c\rho r} \quad (7)$$

де ρ - щільність емалі, кг/м³.

З огляду на те, що радіус напилюємих частинок становить 50 ... 100 мкм, а $h = 5 \dots 15$ мкм, можна з похибкою до 15% допустити, що

$$\Delta T_d \approx \frac{V^2}{2c} \quad (8)$$

Швидкість, необхідна для нагрівання частинок емалі до точки плавлення визначається як:

$$V_1 = \sqrt{2cT_{пл}} \quad (9)$$

Швидкість необхідна для розплавлення частинок:

$$V_2 = \sqrt{2(cT_{пл} + \lambda)} \quad (10)$$

де λ - питома теплота розм'якшення склоемалі, Дж/кг.

На рис 1 показана залежність температури нагрівання частинок склоемалі при ударі об основу від швидкості їхнього польоту. Для порівняння наведено дані про температуру частинок бронзи, що має ту ж температуру плавлення, що і температура розм'якшення склоемалі.

Виходячи з отриманих результатів видно, що динамічна складова, що входить в загальну енергію рухомої в факелі частки, практично не впливає на температуру, оскільки скільки-небудь помітне виділення тепла при ударі об основу спостерігається при швидкостях понад 300 м/с.

Оцінимо величину теплової енергії, одержуваної частки склоемалі від полум'я факела.

З огляду на той факт, що частка при контакті з основою повинна бути розплавлена, завдання в загальному вигляді формулюється так: знайти час τ знаходження частинки в факелі, за яке вона нагрівається до температури плавлення і розплавиться.

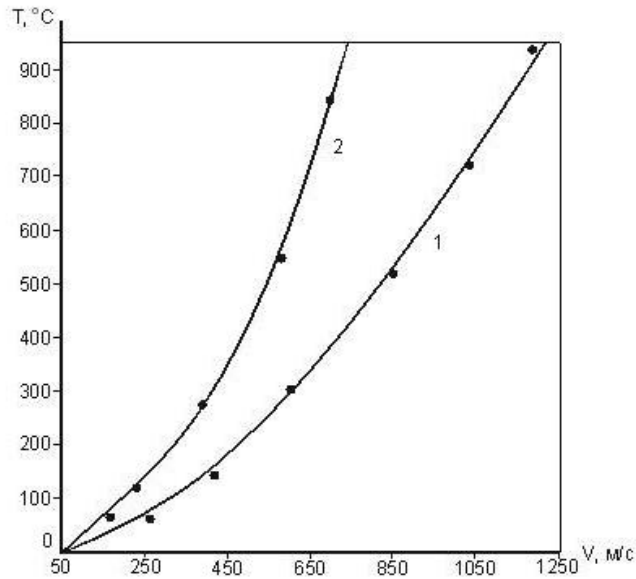


Рис. 1. Залежність температури нагріву частинок склоемалі (1) і олов'янистої бронзи (2) при ударі об основу від швидкості їхнього польоту.

Багато публікації, що стали класичними, присвячені розрахунку часу нагріву частинок порошків при газотермічному напиленні, що не враховують теплопровідність матеріалу, що напилюється [2-7]. Рикалін М.М. [3] пояснював це тим, що характерний час зміни температури частинки в наслідок теплообміну з факелом виявляється на багато більше часу вирівнювання температури по об'єму частинки. Однак це справедливо для матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності на понад 10 Вт/м · град. Оскільки теплопровідність склоемалі на порядок менше, необхідно виконати розрахунки, що враховують теплофізичні характеристики матеріалу, що напилюється.

В основу теоретичного аналізу покладено методику розрахунку, запропоновану в роботі [8] що розглядає теплообмін між нагрітим газом і частинками порошку. При цьому будемо вважати, що температура газу залишається постійною, тобто відсутній теплообмін між факелом і навколишнім середовищем.

Розглянемо теплообмін між газом і частинками порошку в галузі початкової ділянки факела, де швидкості руху продуктів згоряння і частинок збільшуються, досягаючи своїх максимальних значень на дистанції 100 ... 170 мм від зрізу сопла. Рівняння збереження потоку енергії можна записати у вигляді [9]:

$$F_1 \left(\frac{V_1^2}{2} + i_1 \right) + F_2 \left(\frac{V_2^2}{2} + i_2 \right) = F_{1.0} \left(\frac{V_{1.0}^2}{2} + i_{1.0} \right) + F_{2.0} \left(\frac{V_{2.0}^2}{2} + i_{2.0} \right) \quad (11)$$

де F_1 і F_2 - витрати газу і порошку; I_1 та I_2 - їх ентальпії; V_1 і V_2 - їх швидкості руху. Індекс "0" відноситься до значень параметрів у зрізу сопла.

У рівнянні (11) ентальпія одиниці маси речовини газу або частинок може бути записана у вигляді:

$$i = E_b + PV \quad (12)$$

де E_b - внутрішня енергія одиниці маси речовини; V - питомий об'єм; P - тиск в точці.

В області, близької до осі струменя можна прийняти для витрати газу F_1 і порошку F_2 :

$$F_1 = \psi_1 \rho_1 V_1 S = \text{const} \quad (13)$$

$$F_2 = \psi_2 \rho_2 V_2 S = \text{const} \quad (14)$$

де ρ_1, ρ_2 - питома маса газу і порошку, відповідно; ψ_1, ψ_2 - об'ємні частки газу і частинок в потоці, відповідно; S - перетин потоку; $\psi_1 + \psi_2 = 1$, причому $\psi_1 \ll 1$, $\psi_2 \approx 1$.

Закон збереження потоку імпульсу в двофазному потоці має вигляд:

$$F_1 V_1 + F_2 V_2 = F_1 V_{1.0} + F_2 V_{2.0} \quad (15)$$

Звідки можна записати:

$$V_1 = V_{1.0} + K_0 (V_{2.0} + V_2) \quad (16)$$

$$\text{де } K_0 = \frac{F_{2.0}}{F_{1.0}}$$

Використовуючи (13) і (14), рівняння (11) можливо записати у вигляді:

$$\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_{1.0}^2}{2} + K_0 \left(\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_{1.0}^2}{2} \right) = i_1 - i_{1.0} + K_0 (i_2 - i_{2.0}) \quad (17)$$

При газополуменовому напіленні зміна кінетичної енергії частинок незначна у порівнянні з приростом ентальпії Δi , тобто: $-\Delta i_1 \approx K_0 \Delta i_2$

Оскільки $\Delta i = C \Delta T$ (де C - теплоємність речовини, T - приріст температури), маємо:

$$C_1 (T_{1.0} - T_1) \approx K_0 C_2 (T_2 - T_{2.0}) \quad (18)$$

де прийняли $-\Delta i_1 = C_1 (T_{1.0} - T_1)$ і $\Delta i_2 = C_2 (T_2 - T_{2.0})$

Для вирішення питання про характер теплообміну між газом і частинками використовуємо критерій Біо, що характеризує зв'язок між полем температур в тілі і умовами тепловіддачі на його поверхні [10]:

$$B_i = \frac{\alpha r_2}{\lambda_2} \quad (19)$$

де r_2, λ_2 - радіус частинки і коефіцієнт теплопровідності склоемалі, відповідно; α - коефіцієнт тепловіддачі, який можна представити у вигляді [10]:

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{d_2} (2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3}) \quad (20)$$

де d_2 - діаметр частинки; Re - число Рейнольдса; Pr - число Прандтля.

Для умови, коли температура частинок менше температури її плавлення, можна записати:

$$\frac{4}{3}\pi r_2^3 \rho_2 C_2 \frac{dT_2}{d\tau} = 4\pi r_2^2 \alpha (T_1 - T_2) \quad (21)$$

Рівняння (21) являє собою рівняння теплообміну між газом і часткою емалі.

Виходячи з (18) і (21) отримуємо:

$$T_1 \approx T_{1.0} + \frac{F_2}{F_1 \rho_1} \cdot \frac{C_2}{C_1} T_{2.0} - \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} T_2 \quad (22)$$

$$\frac{dT_2}{d\tau} = \frac{6\alpha}{C_2 \rho_2 d_2} \left[T_{1.0} + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \cdot T_{2.0} \right] \left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) T_2 \quad (23)$$

Із (22) та (23) остаточно отримаємо вираз:

$$T_2 = T_{2.0} + (T_{1.0} + T_{2.0}) \left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) \left[1 - e^{-\frac{\left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) 6\alpha}{C_2 \rho_2 d_2} \tau} \right] \quad (24)$$

З допустимою похибкою вираз (24) можна переписати у вигляді:

$$T_2 = T_3 \left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) \left[1 - e^{-\frac{\left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) 6\alpha}{C_2 \rho_2 d_2} \tau} \right] \quad (25)$$

де T_3 - усереднена температура факела по його осі на відстані 50 ... 150 мм від зрізу сопла.

Для подальших розрахунків були використані значення щільності теплового потоку терморозпилення, продуктивності напилення і коефіцієнту тепловіддачі, відповідні установкам типу «Metco-5P» або УПТР-86 і УПТР-1-90. Оскільки швидкості польоту частинок матеріалів з різною питомою масою також відомі [11], були розраховані залежності $T_2 = f(\tau)$ і побудовані відповідні графіки (рис. 2).

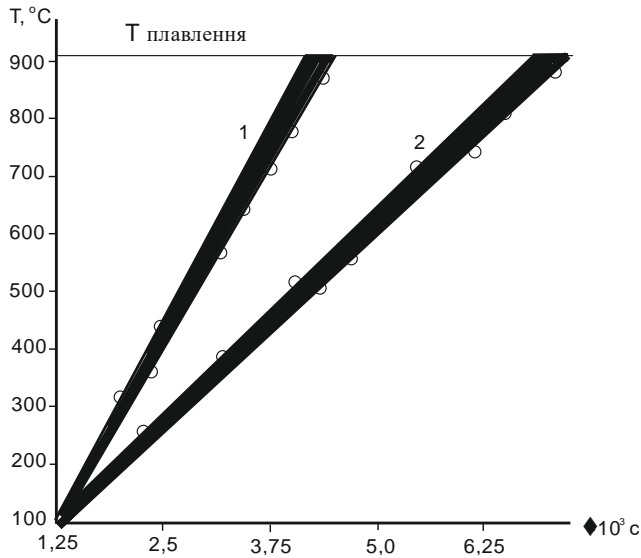


Рис. 2. Розрахункова залежність температури нагрівання від часу перебування частинок олов'янистої бронзи (1) і ґрунтової склоемалі (2) розміром 50 ... 75 мкм в «активній» зоні факела (горючий газ: пропан - бутан; $\beta = 4$).

Аналіз результатів розрахунків за формулою (25) показує, що навіть наближена оцінка температур порошку в пропан-бутан-кисневому полум'ї (похибка близько 30%) дозволяє стверджувати - частинки склоемалі розміром 50 мкм і більше не можуть бути розплавлені відомими газополумєневими розпилювачами. Навіть якщо щільність теплового потоку факела різко не убуває після 150 мм від зрізу сопла, а залишалася рівною величині, яка забезпечує T_3 ще на 50-70 мм, цього все одно не вистачило б для повного розм'якшення частинок склоемалі.

Використання наддрібних фракцій (0,5-10 мкм) на терморозпилювачах з подачею матеріалів по осі факела неможливо внаслідок засмічення каналів соплового наконечника, виникнення «зводу» в бункері дозаторі під дією статичної електрики, комкування частинок і т.ін.

Одним з можливих шляхів вирішення проблеми газополумєневого нанесення склоемалі є використання додаткових джерел тепла, які повинні збільшити або потужність теплового потоку терморозпилювача або протяжність «активної» зони факела.

Використовуючи вираз (25) отримана аналітичним шляхом залежність довжини активної зони факела від теплопровідності порошкового матеріалу з $T_{пл} = 900 \dots 1200$ °C (рис. 3). Теплофізичні показники струменя взяті ті ж, що і для рис. 2. Діаметр частинок $\approx 50 \dots 75$ мкм. Збільшивши якимось чином протяжність факела, можна припустити, що мета - напилення склоемалі газополумєневим методом, буде досягнута [12].

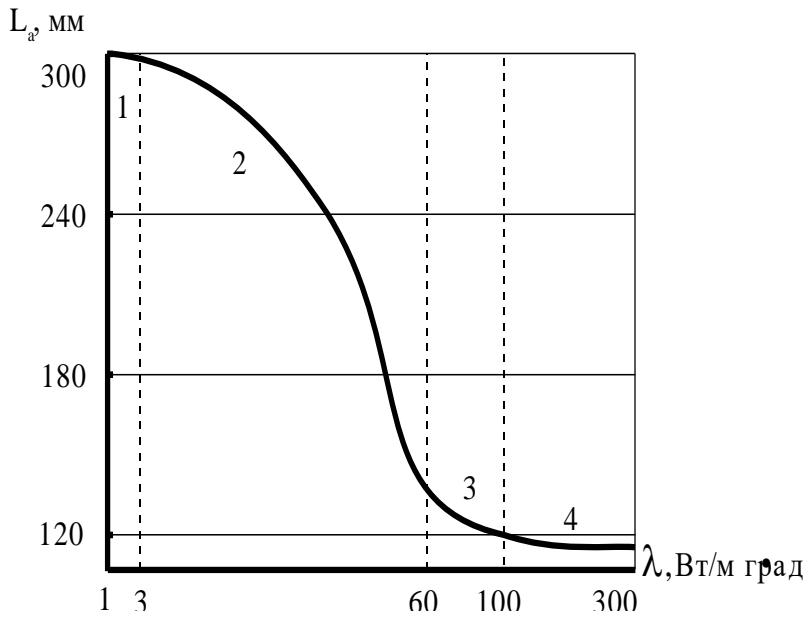


Рис. 3. Залежність довжини необхідної «активної» зони факела від теплопровідності напилюваного порошкового матеріалу ($T_{пл} = 900 \dots 1200^\circ\text{C}$):

1 - склоемаль 117; 2 - нікелевий сплав ПГ-12Н-01; 3 - Латунь Л-59; 4 - мідь ПМС-1.

Висновки. Теоретично визначені значення температур частинок склоемалі і газової фази уздовж вісі факела. Встановлено, що частинки склоемалі не можуть бути розм'якшені в полум'ї відомих терморозпилювачів внаслідок малої довжини високотемпературної зони факела. Теоретичний аналіз процесу теплообміну в системі «факел-частинки порошку з низькою теплопровідністю» (на прикладі порошоків склоемалей) показав, що для їхнього розм'якшення необхідно збільшити тривалість перебування порошку у факелі до $(5,5 \dots 7,0) \cdot 10^{-3}$ с. Аналітична оцінка теплового стану емалевих частинок у факелі пальника й у момент контакту з основою показала можливість напилювання порошоків з матеріалів з низькою теплопровідністю газополуменевим методом за рахунок збільшення довжини факела полум'я до 200-300 мм.

Список літератури

1. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. Киев, Наук. думка, 1969. 246с.
2. Рыкалин Н.Н. Высокотемпературные технологические процессы. М.: Наука. 1985. 259с.
3. Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Кудинов В.В. Образование прочного сцепления при напылении порошком и металлизации. Получение покрытий высокотемпературным распылением. М.: Атомиздат. 1973. С. 140-165.

4. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Мшиностроение, 1981. 192с.
5. Харламов Ю.А. О роли скорости и температуры частиц при газотермическом напылении. Физика и химия обработки материалов. 1983. №3. С. 12-17.
6. Pierre L. Fauchais • Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos Thermal Spray Fundamentals from Powder to Part p. 1566 Springer New York Heidelberg Dordrecht London Library of Congress Control Number: 2013956523 ISBN 978-0-387-28319-7 ISBN 978-0-387-68991-3 (eBook) DOI 10.1007/978-0-387-68991-3.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-023-01587-1>
7. Ермаков С.С., Шмаков А.М. Движение и нагрев порошкового материала при газотермическом напылении покрытий. Порошковая металлургия. 1985. №7. С.67-72.
8. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М. Теоретическая оценка времени негрева частиц порошка при газотермическом нанесении покрытий. Доклады АН БССР. 1989. Т. 33. №1. С. 44-47.
9. Абрамович Г.М. Прикладная газовая динамика. М.: 1969. С.196.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия., 1969. 440с.
10. Belocerkovskij M.A. Sovershenstvovanie oborudovaniya i tekhnologii gazoplamennogo napyleniya Primenenie processov gazotermicheskogo napyleniya i lazernoj obrabotki materialov: sb. nauchn. tr. VNTO im. A.N. Krylova–N. Novgorod, 1990. Вып. 4. С. 11–12.
11. Кропивный В.Н., Лопата В.Н. Газопламенное напыление удлиненным факелом. Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 2-й Междун. науч.-техн. конф. Киев. 2002. С. 204-207.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2023.

Лопата Віталій Миколайович – канд. техн. наук, науковий співробітник, Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Казимира Малевича, 11, м. Київ, Україна, 03650, тел.: +38 044 287 55 29, E-mail: gazoterm@ukr.net

Солових Євген Костянтинівич – д. т. н., професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: ekskntu09@gmail.com

Катеринич Станіслав Євгенович - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: katerinichs@ukr.net

Солових Андрій Євгенович - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: ekskntu09@gmail.com

V.M. LOPATA, Ye. K. SOLOVYKH, S. Ye. KATERINICH, A. Ye. SOLOVYKH

WAYS TO SOLVE THE PROBLEM OF GAS-FLAME SPRAYING OF GLASS-ENAMEL COATINGS

Based on the analysis of the gas-dynamic model of two-phase flow in thermospray plants, the temperature of gas and particles was estimated, as well as the analysis of the heat exchange process in the system "extended flare-powder particles with low thermal conductivity", the possibility of spraying enamels by gas-flame method. An analytical assessment of the thermal state of enamel particles in the torch and at the time of contact with the substrate is given. The values of glass enamel particle and gas phase temperatures along the torch axis are theoretically determined. It is established that glass enamel particles cannot be softened in the flame of known thermal sprays due to the short length of the high-temperature zone of the torch. Theoretical analysis of the heat transfer process in the system "flare-particles of powder with low thermal conductivity" (for example, powders of glass enamels) showed that to soften them it is necessary to increase the duration of the powder in the flare. A method of gas-flame spraying with an elongated torch based on the formation of a secondary torch due to the use of the effect of combustion with separation is developed. Analytical evaluation of the thermal state of enamel particles in the torch and at the time of contact with the base showed the possibility of spraying powders of materials with low thermal conductivity by the gas-flame method by increasing the length of the torch / To increase the length of the torch, it is proposed to form a secondary torch at a distance from the nozzle of the thermospray and theoretically determined the distance of formation of the secondary torch.

Key words: glass-enamel particles, thermal energy, gas-flame sputtering, heat exchange equation, sputtering with glass-enamel by gas-flame method

Referenses

1. Kylchevskiy N.A. Teoriya soudarenia tverdykh tel. Kyev: Nauk. dumka, 1969. – 246s.
2. Rykaly N.N. Vysokotemperaturnye tekhnolohicheskiye protsessy. – M.: Nauka, 1985. – 259s.
3. Rukaly N.N., Shorshorov M.Kh., Kudynov V.V. Obrazovanye prochnoho stsepleniya pry napylenyy poroshkom y metallizatsyy. // Poluchenye pokrytyi vysokotemperaturnym rasplyenyem. – M. : Atomyzdat, 1973. – S. 140-165.
4. Kudynov V.V., Yvanov V.M. Naneseniye plazmoi tuhoplavkykh pokrytyi. – M. : Mshynostroeniye, 1981. – 192s.
5. Kharlamov Yu.A. O roly skorosty y temperatury chastyts pry hazotermicheskom napylenyy. // Fyzyka y khymyyia obrabotky materyalov. – 1983. - №3. – S. 12-17.
6. Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos. Thermal Spray Fundamentals // Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
7. Ermakov S.S., Shmakov A.M. Dvyzheniye y nahrev poroshkovoho materyala pry hazotermicheskom napylenyy pokrytyi // Poroshkovaia metalurhiya. – 1985. - №7. – S.67-72.
8. Dorozhkyn N.N., Abramovych T.M., Sakhnovych V.T. Teoretycheskaia otsenka vremeni nehreva chastyts poroshka pry hazotermicheskom nanesenyy pokrytyi. // Doklady AN BSSR. – 1989. – t.33. - №1. – S.44-47.
9. Abramovych H.M. Prykladnaia hazovaia dynamyka. – M. – 1969. – S.196.
10. Ysachenko V.P., Osypova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. – M.: Enerhiya, 1969. – 440s.

11. Belocerkovskij M.A. Sovershenstvovanie oborudovaniya i tekhnologii gazoplamnogo napyleniya/ M.A. Belocerkovskij // *Primenenie processov gazotermicheskogo napyleniya i lazernoj obrabotki materialov: sb. nauchn. tr. VNTO im. A.N. Krylova–N. Novgorod, 1990. Vyp. 4. –S. 11–12.*

12. Kropyvni V.N., Lopata V.N. Hazoplammenoe napylenye udlynennym fakelom. // *Materyal 2-y Mezhdun. nauch.-tekh. konf. «Ynzheneryia poverkhnosty y renovatsiya yzdelyi»*, Kyev, 2002. S. 204-207.

Vitaliy Mykolayovych Lopata - candidate of technical sciences, researcher, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Street, Kyiv, Ukraine 03150. E-mail: lopatavitaliy38@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1578-1298>

Evgeny Kostyantynovich Solovuch – doctor of technical sciences of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 8 University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006, E-mail: ekskntu09@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5780-3582>

Stanislav Evgenovich Katerinich - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 8 University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: katerinichs@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-30520747>

Andrey Evgenovich Solovykh - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 8 University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: ekskntu09@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5780-3582>