

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЙОГО РЕЖИМІВ

¹Вінницький національний технічний університет

На кафедрі технології підвищення зносостійкості Вінницького національного технічного університету розроблена і виготовлена дослідна установка для газодинамічного нанесення функціональних покриттів. Принцип її дії заснований на тому, що металеві порошкові частки розганяються до високих швидкостей, близьких до швидкості звуку, а у разі зіткнення з підкладкою вступають з нею в молекулярні зв'язки і здатні створювати міцне з'єднання з останньою та між частинками порошку. При цьому температура частинок порошків, які напилуються, є нижчою за температури їх плавлення. Досліджено закономірності формування фігури напилення, її профілю і розмірів в залежності від дистанції напилення. Встановлено, що перетин фігури напилення є симетричним щодо її осі, а її профіль в загальному випадку, з великою вірогідністю, може бути описаний функцією розподілу Гаусса. Середня інтегральна відносна похибка функції Гаусса не перевищує 9,5%. За отриманими результатами побудовано графіки залежності геометричних параметрів фігури напилення від дистанції напилення. Встановлено, що зі збільшенням висоти фігури напилення до 0,4 мм оптимальний крок між суміжними проходами доріжок напилення становитиме 56% від діаметра основи фігури напилення. Зі збільшенням висоти до 0,54 мм оптимальний крок між суміжними проходами доріжок напилення зменшується і становить 48% від діаметра основи фігури напилення. Встановлено, що формування фігури напилення відбувається відповідно до закону нормального розподілу, а геометричні розміри фігури напилення залежать від дистанції напилення. На основі отриманих результатів дослідження запропонована інженерна методика розрахунку режимів нанесення покриття. Методика розрахунку режимів нанесення покриття на циліндричні поверхні дозволяє визначати, в залежності від продуктивності напилювального пристрою, швидкість переміщення пристрою вздовж деталі, швидкість обертання деталі, необхідну кількість порошку для покриття заданої поверхні, час напилення. Наведено конкретний приклад розрахунку режимів напилення.

Ключові слова: газодинамічний напилювальний пристрій, фігура напилення, методика розрахунку режимів.

Вступ

Одним з перспективних напрямків розвитку сучасного машинобудування є створення технологій і пристроїв для нанесення функціональних покриттів на поверхні деталей машин, які можуть мати відновлювальні функції або особливі властивості.

Створення функціональних покриттів на поверхнях деталей дозволяє суттєво впливати на експлуатаційні характеристики на надавати цим поверхням нових, не притаманних матеріалу деталі, якостей. Наприклад створення покриттів на основі алюмінію на сталевих деталях може захистити ці деталі від корозії та суттєво змінити фрикційні властивості покритих поверхонь.

На кафедрі технології підвищення зносостійкості Вінницького національного технічного університету розроблено і виготовлено дослідну установку для газодинамічного нанесення функціональних покриттів. Принцип її дії полягає в тому, що порошкові частинки розганяються до високих швидкостей, близьких до швидкості звуку, а у разі зіткнення з підкладкою вступають з нею в молекулярні зв'язки і здатні утворити міцне з'єднання з останньою та між частинками порошку [1], [2]. При цьому температура напиленої частинки є нижчою за температуру її плавлення. На рис. 1 показано установку газодинамічного нанесення функціональних покриттів. Основними елементами установки є нагрівач повітря 1 і головка для напилювання 2.

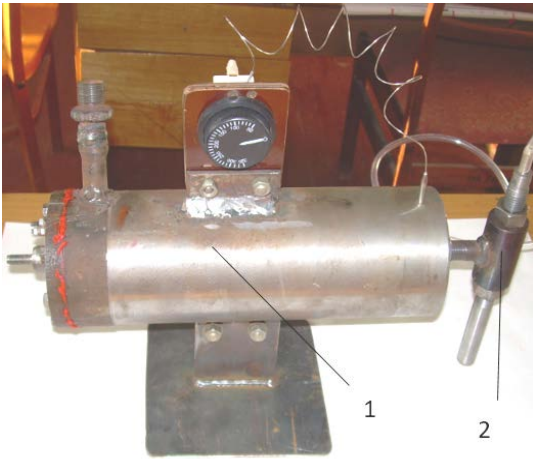


Рис. 1. Дослідна установка для газодинамічного нанесення функціональних покриттів: 1 — нагрівач повітря; 2 — головка для напилювання

Головка для напилювання (рис. 2) розганяє нагріте стиснуте повітря до швидкостей, близьких до швидкості звуку. Стиснуте повітря проходить через зазор С — кільцевий критичний перетин. Критичним перетином вважається зона гирла сопла з мінімальною площею кільцевого зазору. Проходячи через критичний перетин відбувається прискорення швидкості руху газового потоку та падіння його тиску до значень, менших атмосферного. Тобто створюється ефект ежекції, за рахунок якого напилюваний матеріал всмоктується у сопло установки і канал подачі 4, нагрівається гарячим стиснутим повітрям і транспортується з високою швидкістю до поверхні, на яку напилюється покриття. Напилюваний матеріал нерівномірно розподіляється по перерізу струменя газопорошкового потоку, який падає на поверхню. Якщо головка для напилювання не рухається відносно поверхні, на яку напилюється покриття, то утворюється конусоподібна фігура напилення.

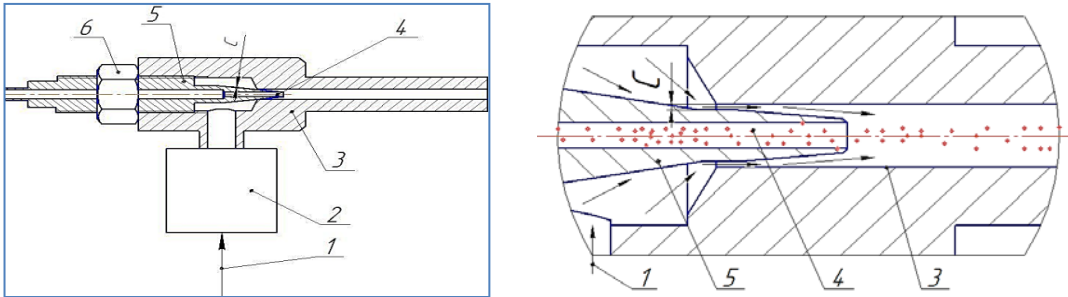


Рис. 2. Принципова схема головки для напилювання порошку газодинамічного пристрою нанесення функціональних покриттів: 1 — лінія подачі стиснутого газу; 2 — нагрівач газу; 3 — сопло; 4 — канал подачі матеріалу для напилювання; 5 — форсунка; 6 — гайка-фіксатор

На сьогодні відсутня інформація про закономірності формування покриття та фігури напилення в залежності від відстані сопла до виробу та його осі. Крім того, відсутня інженерна методика розрахунку режимів напилення.

Метою роботи є дослідження закономірностей формування фігури напилення, її профілю та розмірів в залежності від дистанції напилення та розробка інженерної методики розрахунку режимів нанесення покриття.

Результати дослідження

Вивчення процесу формування фігури напилення проводилося за умов стаціонарного положення головки відносно підкладки, на яку наносилось покриття, але з поступовим збільшенням порції порошку.

Для напилювання використовувався порошок марки А20–11. Зважували три порції порошку: перша — 0,11 г, друга — 0,22 г, третя — 0,34 г. Дистанція напилювання 25 мм, температура стиснутого повітря 320...340 °С. Тиск стиснутого повітря 0,56 МПа. В результаті отримано три фігури напилення, що показані на рис. 3.

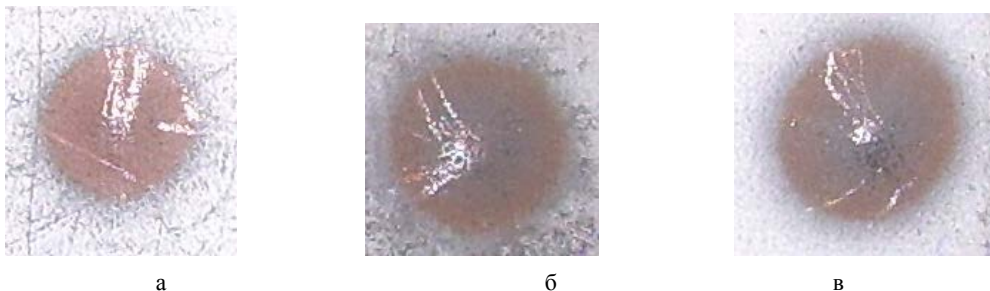


Рис. 3. Фігури напилення: а — зразок № 1; б — зразок № 2; в — зразок № 3

Використовуючи індикатор годинникового типу та стіл мікротвердоміра ПМТ-3 вимірювали висоту профілю кожної фігури з кроком 0,25 мм.

В перерізі фігура напилення є майже симетричною відносно її осі, а її профіль у загальному випадку може бути описаний законом розподілу Гаусса. Використаємо для опису форми перерізу фігури напилення криву Гаусса у вигляді:

$$Y = y_0 \cdot e^{-(r^2/r_0^2)}, \tag{1}$$

де y_0 — товщина покриття на осі фігури напилення; Y — висота профілю в залежності від відстані від осі фігури r ; r_0 — радіус розсіювання (підбирали емпірично з метою забезпечення найкращого збігу кривої Гаусса і експериментальних результатів). $y_0 = 0,152; 0,41; 0,54$; $r_0 = 1,88; 2,4; 2$ для першого другого і третього зразків, відповідно.

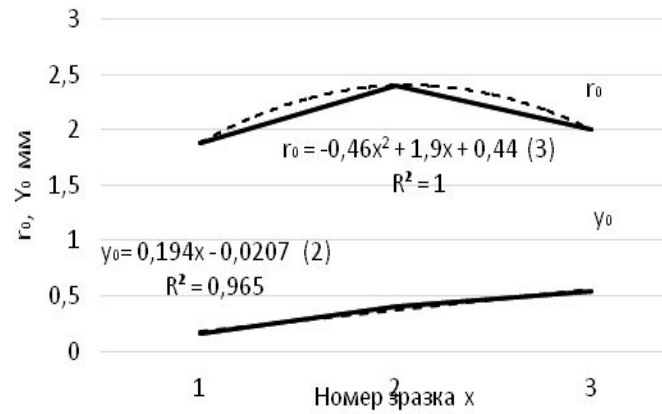


Рис. 4: r_0 — радіус розсіювання; y_0 — висота зразка; — — — — лінія тренда

Експериментальні результати можна описати рівнянням регресії, отриманим за допомогою програми MS Excel та її функції «лінія тренду», рівняння якої показані на рис. 4. Для кривої r_0 — радіусу розсіювання, рівняння регресії має вигляд

$$r_0 = -0,46x^2 + 1,9x + 0,44. \tag{2}$$

Для кривої y_0 — висоти зразка, рівняння регресії має вигляд

$$y_0 = 0,194x - 0,0207. \tag{3}$$

З рівняння (3) за знайдемо x

$$x = \frac{y_0 + 0,0207}{0,194} \tag{4}$$

та підставимо x в рівняння (2):

$$r_0 = -0,46 \left(\frac{y_0 + 0,0207}{0,194} \right)^2 + 1,9 \left(\frac{y_0 + 0,0207}{0,194} \right) + 0,44. \tag{5}$$

Отримані розподіли Гаусса порівнювались з експериментальними результатами, для чого теоретичний розподіл накладався у відповідному масштабі на експериментальні результати (рис. 5).

Можна сказати, що розподіл Гаусса з великою вірогідністю описує профіль фігури напилення. Середня інтегральна відносна похибка функції Гаусса не перевищує 9,5%.

З'ясуємо, які оптимальні відстані (кроки) повинні бути між суміжними робочими ходами (рис. 6—8).

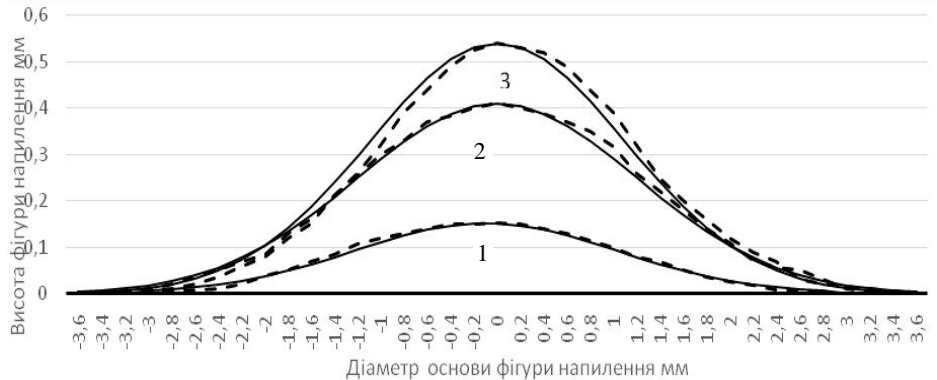


Рис. 5. Порівняння профілів фігур напилення з розподілами Гаусса для зразків 1, 2, 3: — — — — виміряний профіль фігур напилення; — — — — відповідний теоретичний розподіл Гаусса

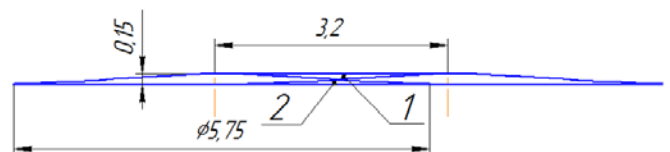


Рис. 6. Суміжні робочі ходи для зразка № 1

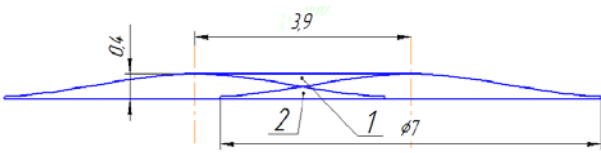


Рис. 7. Суміжні робочі ходи для зразка № 2

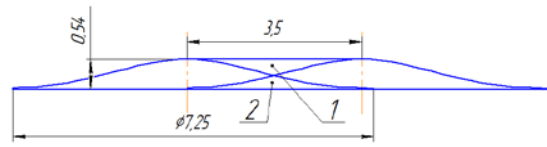


Рис. 8. Суміжні робочі ходи для зразка № 3

Найбільша рівномірність покриття спостерігається, якщо відстань між суміжними робочими ходами буде забезпечувати рівність площ ділянок перекриття 1 та 2 як показано на рис. 6—8. Ця відстань становить для зразків 1 — 3,2 мм, 2 — 3,9 мм, 3 — 3,5 мм, що відповідно становить для зразка 1 — 56%, 2 — 56%, 3 — 48%, від діаметра основи фігури напилення тобто зі збільшенням висоти фігури напилення до 0,4 мм оптимальним буде крок 56%. Зі збільшенням висоти до 0,54 мм оптимальний крок між робочими ходами зменшується і становить 48% від діаметра основи фігури напилення.

З метою виявлення закономірностей зміни діаметра основи фігури напилення від дистанції до сопла проводились експериментальні дослідження у такій послідовності:

1. Підготовка для напилення підкладки зі сталі Ст. 3, розміром 40×40×0,8 мм — 3 шт.;
2. Підготовка 3 однакових порцій порошку, по 2,5 г кожна;
3. Встановлення дистанції для 1, 2, 3, зразків 10, 30, 50 мм, відповідно;
4. Запуск установки для напилення, вихід на робочий режим (тиск 0,56 МПа, температура 320...340°C). Проведення напилення на різних дистанціях 10, 30, 50 мм;



Рис. 9. Результати напилення для дистанцій справа наліво 10 мм, 30 мм, 50 мм

5. Вимірювання геометричних розмірів отриманих фігур напилення (висота, діаметр, профіль плями). На рис. 9 видно, що фігуру напилення можна умовно поділити на 2 зони. Перша зона — зона інтенсивного нарощування покриття, яка являє собою чітку фігуру «Гаусса». Діаметр основи позначимо d . У другій зоні утворився незначний шар покриття товщиною 0,01...0,02 мм.

6. За результатами вимірювань побудовано в масштабі 1:1 схему руху напилювального струменя та утворених плям покриття (рис. 10).

За наведеними результатами побудовано графіки залежності геометричних параметрів від дистанції напилення (рис. 11).

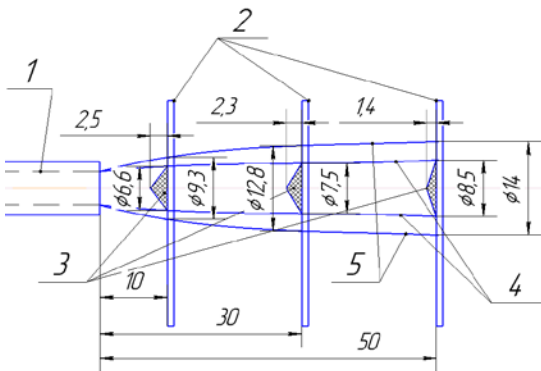


Рис. 10. Геометричні параметри розпилювального струменя та фігури напилення: 1 — сопло; 2 — сталеві пластини; 3 — фігури напилення; 4 — перша зона напилення; 5 — друга зона напилення

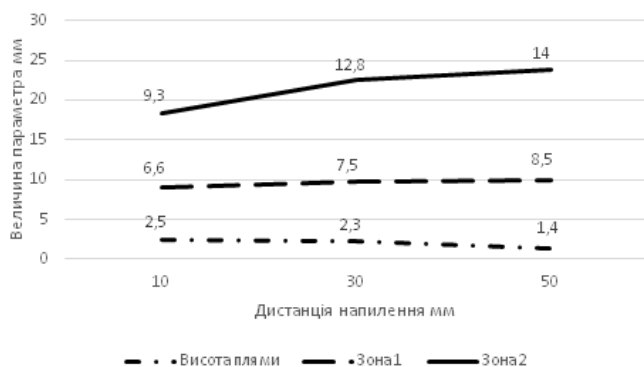


Рис. 11. Графіки зміни геометричних параметрів плями напилення в залежності від дистанції до сопла

З урахуванням отриманих результатів розробимо методику розрахунку режимів напilenня.

Отримані результати можна використати для розробки інженерної методики розрахунку режимів напilenня, яка наведена нижче.

Методику розрахунку режимів напilenня пояснимо на конкретному прикладі.

Розрахунки проведемо для поверхні з такими розмірами: $D = 39,5$ мм, довжина $L = 23$ мм. Для напильовальної установки із соплом, що має діаметр 5 мм, діаметри основи фігури напilenня вибрано такими: $d = 6,6; 7,5$ та 14 мм для відстаней напilenня відповідно: 10; 30 та 50 мм. Отже, для дистанції напilenня 10 мм діаметр основи фігури напilenня $d = 6,6$ мм.

Напилити поверхню необхідно до розміру $D = 40,2$ мм. Розрахункова схема показана на рис. 12.

Враховуючи, що діаметр заготовки після попередньої механічної обробки становить $D = 39,5$ мм, а діаметр заготовки після напilenня з урахуванням припуску на механічну обробку повинен становити $D = 40,2$ мм, шар напilenня на сторону буде складати $A = (40,2 - 39,5)/2 = 0,35$ мм. Для забезпечення більшої рівномірності покриття цю величину доцільно поділити на 3 проходи, кожний з яких буде дорівнювати $C = A/3 = 0,116$ мм.

Для визначеної висоти фігури напilenня та діаметра її основи крок напilenня становитиме 56 % від діаметра основи. Тобто $k = 0,566 \cdot 6 = 3,36$ мм. Площу поперечного перетину S фігури напilenня визначено за відомими формулами і склала $S = 0,464$ мм².

Довжину одного витка b визначимо за теоремою Піфагора $b = ((\pi \cdot D)^2 + k^2)^{0,5} = 125,4$ мм,

де b — довжина витка, D — діаметр витка, k — крок витка. Кількість витків $n = L/k = 8,04$, де n — кількість витків, L — довжина оброблюваної ділянки.

Загальна довжина спіралі $B = n \cdot b = 1009,6$ мм

Визначимо масу (M) одного шару напilenня. Для цього площу поперечного перетину фігури S напilenня перемножимо на загальну довжину спіралі (B) та на густину порошкового матеріалу ρ (для порошку А20-11 $\rho = 0,0053$ г/мм³) $M = S B \rho = 2,48$ г.

Для всього покриття $M_1 = M \cdot 3 = 7,45$ г, а з урахуванням коефіцієнта використання порошку, який для газодинамічного напilenня становить 0,4, для здійснення напilenня знадобиться всього порошку

$$M_2 = M_1 / 0,4 = 7,45 / 0,4 = 18,62 \text{ г.}$$

Час напilenня t одного шару покриття

$$t = M / P = 2,48 / 2 = 1,24 \text{ хв.}$$

$P = 2$ г/хв. — продуктивність напильовального пристрою (характеристика пристрою).

Загальний час напilenня

$$T = 3 \cdot t = 3 \cdot 1,24 = 3,72 \text{ хв.}$$

Визначимо горизонтальну швидкість руху напильовального пристрою V_r . Для цього, знаючи довжину шляху горизонтального переміщення L та час напilenня одного шару t , визначимо горизонтальну швидкість руху напильовального пристрою

$$V_r = L / t = 23 / 1,24 = 18,53 \text{ мм/хв.}$$

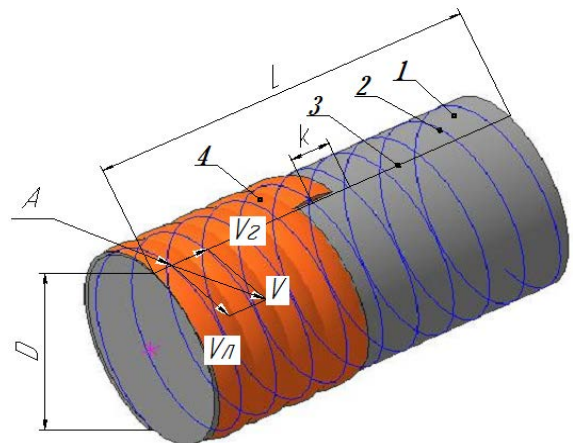


Рис. 12. Схема розрахунку: 1 — деталь, що напильовується; 2 — спіральна траєкторія руху фігури напilenня; 3 — прямолінійна траєкторія руху напильовального пристрою; 4 — покриття; V_n — лінійна швидкість обертання деталі в точці поверхні (А); V_s — швидкість переміщення утворюваної фігури напilenня (А) вздовж траєкторії руху розпильовального пристрою; V — швидкість переміщення утворюваної фігури напilenня вздовж спіральної траєкторії руху; L — довжина поверхні, що обробляється; k — крок спіральної лінії; D — діаметр деталі

Швидкість руху фігури вздовж спіральної траєкторії V

$$V = B/t = 1009,6/1,24 = 813,27 \text{ мм/хв.}$$

Сумарна швидкість $V_{\text{л}}$

$$V_{\text{л}} = (V^2 - V_{\text{r}}^2)^{0,5} = 813,06 \text{ мм/хв.}$$

Кількість обертів деталі за хвилину

$$n = V_{\text{л}}/\pi \cdot D = 6,47 \text{ об/хв.}$$

Висновки

1. Формування фігури напилення відбувається у відповідності до закону нормального розподілення.

2. Встановлено, що геометричні розміри фігури напилення залежать від дистанції напилення.

3. Методика розрахунку режимів нанесення покриття дозволяє визначати, в залежності від продуктивності напилювального пристрою, швидкість переміщення пристрою вздовж деталі, швидкість обертання деталі, необхідну кількість порошку для покриття заданої поверхні, час напилення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] А. П. Алхімов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, та В. М. Фомин, под ред. В. М. Фомина, *Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика*. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 536 с.

[2] О. Л. Гайдамак, «Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу,» *Пат. 110552 Україна, МПК С 23 С 24/04.*; No a201405543, заявл. 23.05.14, опубл. 12.01.16, бюл. № 1.

Рекомендована кафедрою технології підвищення зносостійкості ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.03.18

Гайдамак Олег Леонідович — канд. техн. наук, доцент кафедри технології підвищення зносостійкості, e-mail: vntu111@gmail.com ;

Савуляк Валерій Іванович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології підвищення зносостійкості.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. L. Gaidamak¹
V. I. Savuliak¹

Experimental Research of the Process of Cold Gasdynamic Coating and Method of Calculation of Its Modes

¹Vinnitsia National Technical University

The Department of technology of elevation of Vinnitsia National Technical University, developed and produced research installation for the gasdynamic application of functional coatings. The principle of its action is based on the fact that the powder particles are dispersed to high velocities close to the speed of sound, and in contact with the lining come with her in molecular bonding and are able to form a strong connection with the latest and between the particles of the powder. In this case, the temperature of the particulate particles that are sprayed is lower than the melting point. There have been studied regularities of formation of shapes, spraying, its profile and size depending on the distance of spraying. It has been found out that the figure of spraying is almost symmetrical relative to its axis and its profile in the General case can be described by the law of the Gaussian distribution. Gaussian distribution with a uniquely describes the profile shape spraying. The average cumulative relative accuracy Gaussian function does not exceed 9,5 %. According to the results there have been built graphic dependences of geometric parameters of the shape spraying from a distance of spraying. Is has been found that with increased height figures spraying up to 0,4 mm is optimum will step between adjacent passages will be 56 % of the diameter of the basics figure spraying. With increasing height to 0,54 mm optimal step between passages decreases and is 48 % of the diameter of the basics figure spraying. Based on the results of the study there have been suggested engineering

calculation modes of coating. It is established that the formation of the shape deposition occurs in accordance with the law of the normal distribution and the dimensions of the shape deposition depend on distance of spraying. Method of calculation modes of coating allows to define, depending on the performance of the evaporation device, speed, move the device along the details, the speed of rotation of details, the required amount of powder to cover set surface, while spraying. The particular example of calculation modes of spraying is given.

Keywords: gas dynamic evaporation device, coating, method of calculation modes.

Gaidamak Oleh L. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Wear-endurance Technology, e-mail: vntu111@gmail.com ;

Savuliak Valerii I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Wear-endurance Technology

О. Л. Гайдамак¹
В. И. Савуляк¹

Экспериментальное исследование процесса холодного газодинамического нанесения покрытия и методика расчета его режимов

¹Винницкий национальный технический университет

На кафедре технологии повышения износостойкости Винницкого национального технического университета разработана и изготовлена опытная установка для газодинамического нанесения функциональных покрытий. Принцип ее действия основан на том, что металлические порошковые частицы разгоняются до высоких скоростей, близких к скорости звука, а при столкновении с подкладкой вступают с ней в молекулярные связи и способны создавать прочное соединение с последней и между частицами порошка. При этом температура напыляемых частиц порошка ниже температуры их плавления. Исследованы закономерности формирования фигуры напыления, ее профиля и размеров в зависимости от дистанции напыления. Установлено, что сечение фигуры напыления является симметричным относительно ее оси, а ее профиль в общем случае, с большой вероятностью, может быть описан функцией распределения Гаусса. Средняя интегральная относительная погрешность функции Гаусса не превышает 9,5 %. По полученным результатам построены графики зависимости геометрических параметров фигуры напыления от дистанции напыления. Установлено, что с увеличением высоты фигуры напыления до 0,4 мм оптимальный шаг между смежными проходами дорожек напыления будет составлять 56 % от диаметра основания фигуры напыления. С увеличением высоты до 0,54 мм оптимальный шаг между смежными проходами дорожек напыления уменьшается и составляет 48 % от диаметра основания фигуры напыления. Установлено, что формирование фигуры напыления происходит в соответствии с законом нормального распределения, а геометрические размеры фигуры напыления зависят от дистанции напыления. На основе полученных результатов исследования предложена инженерная методика расчета режимов нанесения покрытия. Методика расчета режимов нанесения покрытия позволяет определять, в зависимости от производительности напылительного устройства, скорость перемещения устройства вдоль детали, скорость вращения детали, необходимое количество порошка для покрытия заданной поверхности, время напыления. Приведен конкретный пример расчета режимов напыления.

Ключевые слова: газодинамический напылительное устройство, фигура напыления, методика расчета режимов.

Гайдамак Олег Леонидович — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии повышения износостойкости, e-mail: vntu111@gmail.com ;

Савуляк Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии повышения износостойкости