

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ

Вінницький національний технічний університет;

### Анотація

Досліджено закономірності формування фігури напилення отриманої газодинамічним напиленням, її профілю та розмірів в залежності від дистанції напилення. В перерізі фігура напилення є майже симетричною відносно її осі, а її профіль у загальному випадку може бути описаний законом розподілення Гауса. Встановлено оптимальну відстань між суміжними проходами напилювального пристрою та залежність геометричних параметрів фігури напилення від дистанції напилення.

**Ключові слова:** газодинамічне напилення, фігура напилення, крок напилення, розподілення Гауса.

### Abstract

The patterns of formation of the spray pattern obtained by gas-dynamic spraying, its profile and sizes, depending on the spray distance, were studied. In the section, the deposition figure is almost symmetric in relation to its axis, and its profile in the general case can be described by the law of Gaussian distribution. An optimal distance between the adjacent spray gun passages and the dependence of the geometric parameters of the spray pattern on the spray distances is established.

**Keywords:** gas dynamic spraying, spray pattern, spraying step, Gauss distribution.

### 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 ґрунтується на тому, що порошкові частинки розганяються до високих швидкостей, близьких до швидкості звуку, а при зіткненні 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 фото установки газодинамічного нанесення функціональних покриттів. Основними елементами установки є нагрівач повітря 1 і головка для напилювання 2.

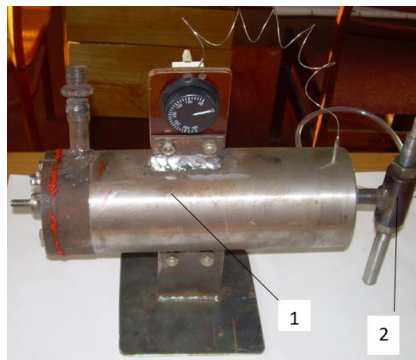


Рис. 1. Дослідна установка для газодинамічного нанесення функціональних покриттів: 1 – нагрівач повітря, 2 – головка для напилювання

Головка для напилювання (рис. 2) розганяє нагріте стиснуте повітря до швидкостей, які близькі 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, які менше атмосферного. Тобто створюється ефект ежекції, за рахунок якого всмоктується напилюваний матеріал 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 гозо-порошкового потоку, який падає на поверхню. Якщо головка для напилювання не рухається відносно поверхні, на яку напилюється покриття, то утворюється конусоподібна фігура напилення.

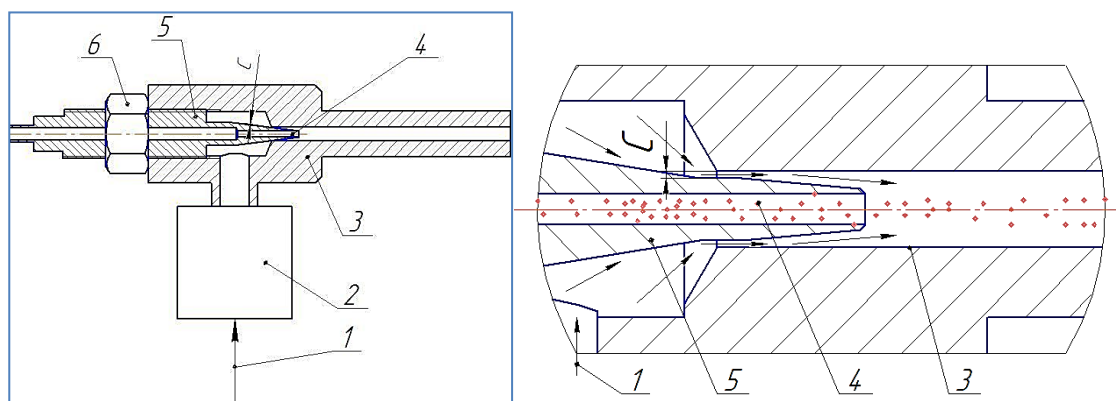


Рис. 2. Принципова схема головки для напилювання порошку газодинамічного пристрою нанесення функціональних покриттів: 1 - лінія подачі стиснутого газу, 2 – нагрівач газу, 3 – сопло, 4 – канал подачі матеріалу для напилювання, 5 – форсунка, 6 – гайка-фіксатор.

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 виконували за умов стаціонарного положення головки відносно підкладки, на яку наносилось покриття, але з поступовим збільшенням порції порошку.

Для напилювання використовувався порошок марки А20-11. Зважили 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 отримали три фігури напилення, що показані на рис. 3.

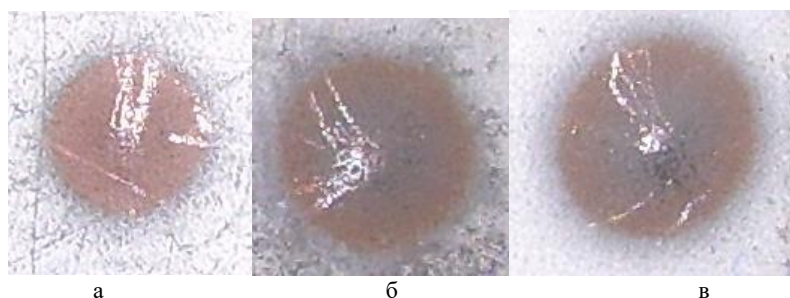


Рис. 3. Фігури напилення: а - зразок №1, б - зразок №2, в - зразок №3

Використовуюючи мікрометр годинникового типу та стіл мікротвердоміра ПМТ-3 проміряли висоту профіля кожної фігури з кроком 0,25 мм.

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

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

де  $y_0$  - товщина покриття на осі фігури наплення;  $Y$  – висота профіля в залежності від відстані від осі фігури  $r$ ;  $r_0$  - радіус розсіювання (підбирали емпірично з метою забезпечення найкращого співпадання кривої Гауса і експериментальних результатів).

$y_0=0,152, 0,41, 0,54$  для першого другого і третього зразка відповідно.

$r_0=1,88, 2,4, 2$  для першого другого і третього зразка відповідно.

Отримані експериментальним шляхом результати можна описати рівнянням регресії, отриманими за допомогою програми MS Excel та її функції «лінія тренду» рівняння якої показані на рис. 4.

З рівняння (2) за рисунком 4 знайдемо  $x$

$$x = \frac{y_0 + 0,0207}{0,194}, \quad (4)$$

та підставимо  $x$  в рівняння (3) (за рис.4)

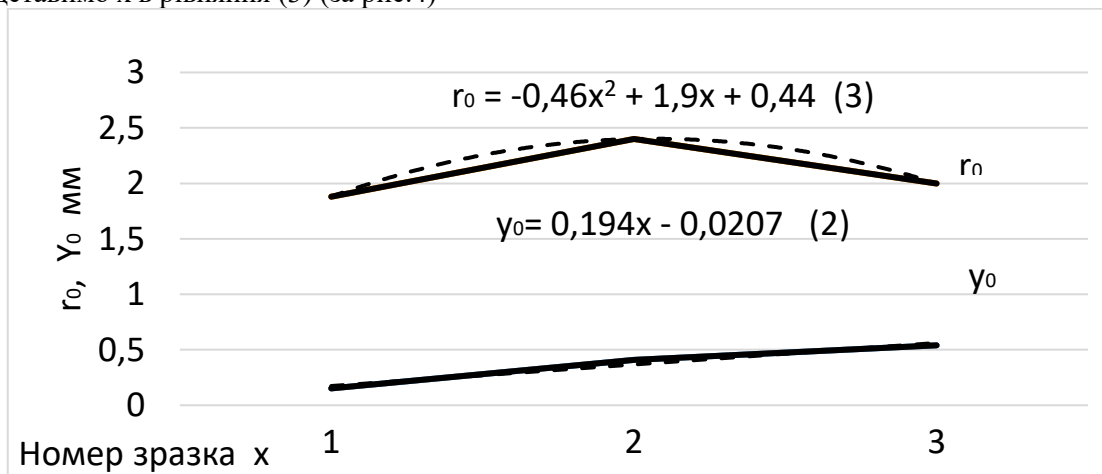


Рис. 4.  $r_0$  – радіус розсіювання,  $y_0$  – висота зразка, пунктирною лінією показані лінії тренда описані відповідними формулами (2) та (3)

$$r_0 = -0,46 \left( \frac{y_0 + 0,0207}{0,194} \right)^2 + 1,9 \left( \frac{y_0 + 0,0207}{0,194} \right) + 0,44. \quad (4)$$

Порівняємо отримані розподілення Гауса з експериментальними результатами, для чого накладем теоретичне розподілення у відповідному масштабі на експериментальні результати (рис. 5).

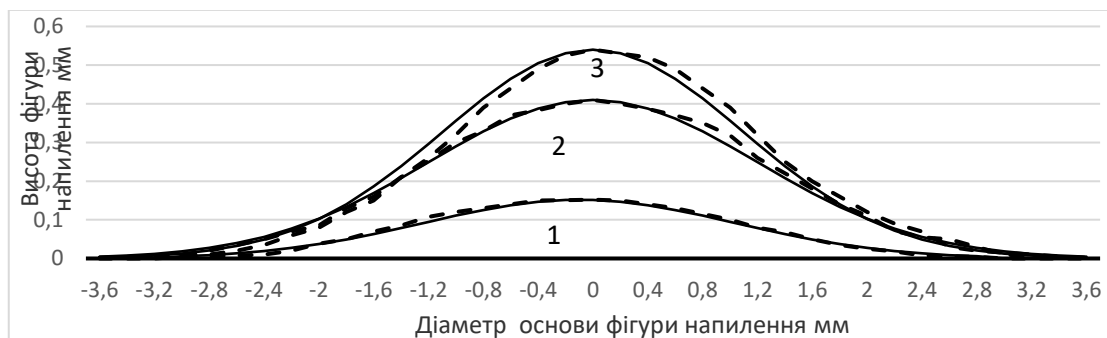


Рис. 5. Порівняння профілів фігур наплення з розподіленням Гауса для зразків 1, 2, 3. Пунктирна лінія – виміряний профіль фігур наплення.

Суцільна лінія – відповідне теоретичне розподілення Гауса.

Можна сказати, що розподілення Гауса з великою достовірністю описує профіль фігури напилення. Середня інтегральна відносна похибка функції Гауса не перевищує 9,5 %.

З'ясуємо, які найбільш оптимальні відстані (кроки) повинні бути між суміжними проходами (рис. 6, 7, 8).

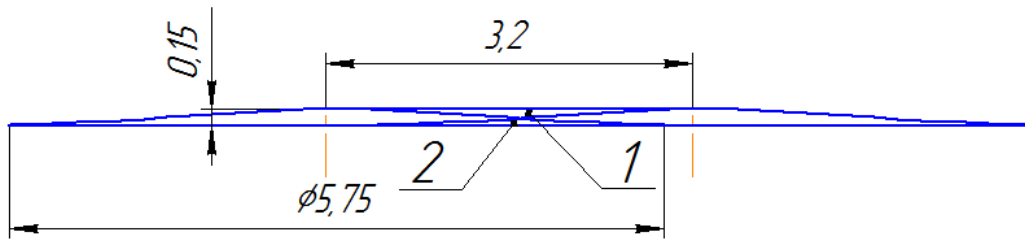


Рис. 6. Суміжні проходи для зразка №1

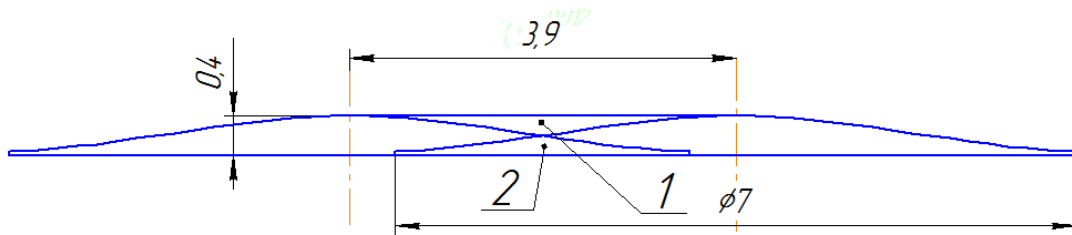


Рис. 7. Суміжні проходи для зразка №2

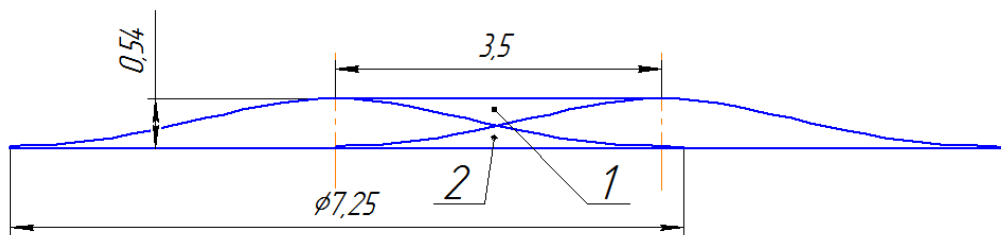


Рис. 8. Суміжні проходи для зразка №3

Найбільша рівномірність покриття спостерігається, якщо відстань між суміжними проходами буде забезпечувати рівність площ ділянок перекриття 1 та 2 як показано на рисунках 6, 7, 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 із збільшенням висоти фігури напилення до 0,4 мм оптимальним буде крок 56%. Із збільшенням висоти до 0,54 мм оптимальний крок між проходами зменшується і становить 48% від діаметра основи фігури напилення.

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

1. Підготували для напилення підкладку зі сталі Ст. 3, розміром 40x40x0,8 мм – 3 шт.
2. Підготували 3 однакових порції порошку, по 2,5 г кожна.
3. Встановили дистанцію для 1, 2, 3, зразків 10, 30, 50 мм відповідно.
4. Запустили установку для напилення, вийшли на робочий режим (тиск 0,56 МПа, Температура 320 – 340°C). Провели напилення на різних дистанціях 10, 30, 50 мм.

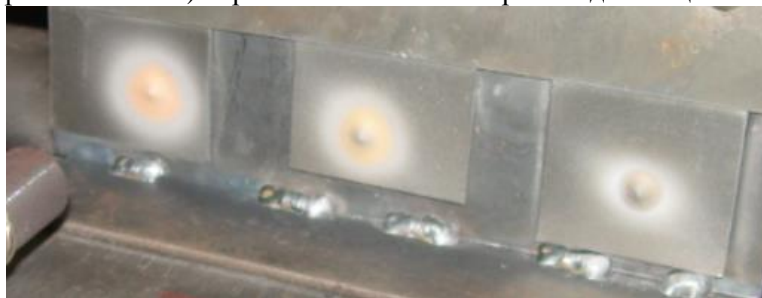


Рис. 9. Результати напилення для дистанцій справа наліво 10 мм, 30 мм, 50 мм.

5. Виміряли геометричні розміри 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 «Гауса». Діаметр основи якої позначимо  $d$ . У другій зоні утворився незначний шар покриття товщиною 0,01-0,02 мм.
6. За результатами вимірювань побудували в масштабі 1:1 схему руху напилювального струменя та утворених плям покриття (рис. 10).

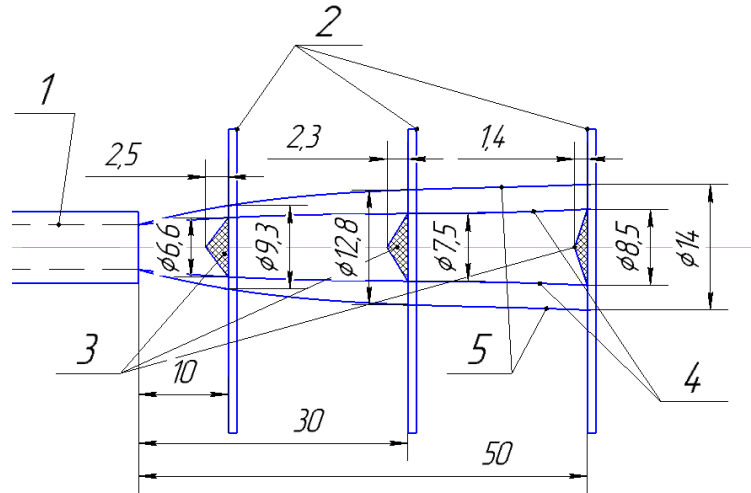


Рис. 10. Геометричні параметри розпилювального струменя та фігури напилення: 1 – сопло, 2 – сталеві пластини, 3 – фігури напилення, 4 – перша зона напилення, 5 – друга зона напилення

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

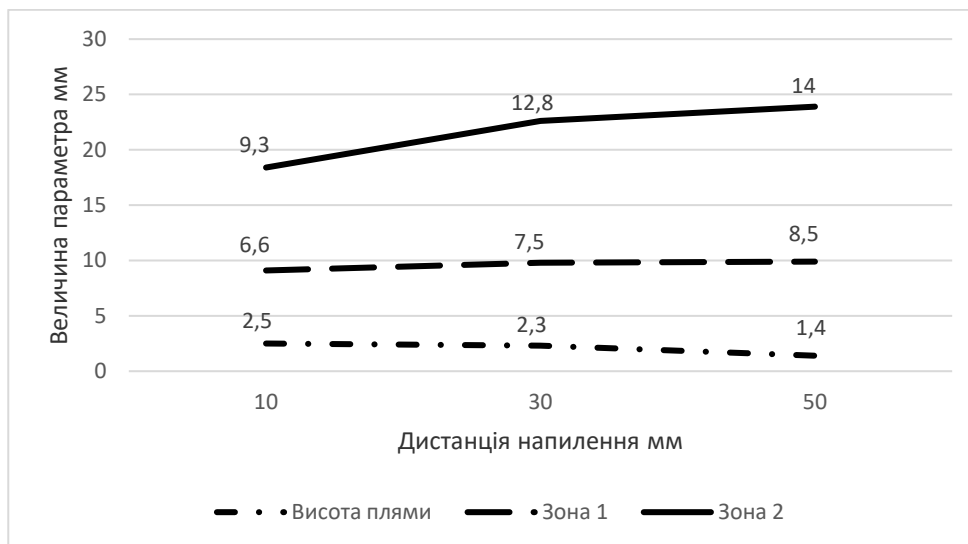


Рис. 11. Графіки зміни геометричних параметрів плями напилення в залежності від дистанції до сопла

### Висновки

Досліджено закономірності формування фігури напилення отриманої газодинамічним напиленням, її профілю та розмірів в залежності від дистанції напилення. В перерізі фігура напилення є майже симетричною відносно її осі, а її профіль у загальному випадку може бути описаний законом розподілення Гауса. Встановлено оптимальну відстань між суміжними проходами напилювального пристрою та залежність геометричних параметрів фігури напилення від дистанції напилення.

Отримання результати можуть бути використані для розробки інженерної методики розрахунку режимів наплення процесів я яких формування фігури наплення відповідає нормальному розподіленню Гауса.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алхімов А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. / Алхімов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Под ред. В.М.Фомина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 536 с.
2. Пат. 110552 Україна, МПК С 23 С 24/04. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу / Гайдамак О. Л.; заявник та патентовласник Гайдамак О. Л. — No a201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. No1.

*Гайдамак Олег Леонідович*— канд. техн. наук, доцент, кафедри технології підвищення зносостійкості, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, , e-mail: vntu111@gmail.com

*Gaidamak Oleg Leonidovich* – Ph.D, associate professor, department of technology for increasing wear resistance, Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vntu111@gmail.com