

О. Л. Гайдамак<sup>1</sup>  
 В. І. Савуляк<sup>1</sup>  
 А. Ю. Осадчук<sup>1</sup>

## РОЗРОБКА ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИБОРУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ НАПИЛЮВАЛЬНИХ ПОРОШКОВИХ ЧАСТИНОК

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Розроблено конструкцію газодинамічного напилювального пристрою, в якому за рахунок зміни соплового вузла спрощено його конструкцію та забезпечено можливість регулювання параметрів напилювання. Проведено дослідження швидкості руху частинок порошку та її вплив на характеристики отриманого покриття.*

**Ключові слова:** газодинамічний напилювальний пристрій, швидкість руху частинок, покриття.

### 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.

Існують установки для газодинамічного нанесення функціональних покриттів [1]. В основі їх принципу дії є відкриття, зроблене у Новосибірському інституті теоретичної та прикладної механіки у 80-х роках попереднього століття, яке полягає в тому, що порошок частинки, розігнані до високих швидкостей, більших швидкості звуку, зіштовхуючись з підкладкою, вступають з нею в міжатомні зв'язки і здатні утворити міцне з'єднання з останньою та між частинками порошку. При цьому температура напиленої частинки є нижчою за температуру її плавлення. Для реалізації цього процесу застосовувались пристрої для холодного газодинамічного напилювання [1, 2], в яких підігріте стиснуте повітря проходило через сопло Лавалю, де відбувалось його прискорення і введення в цей прискорений потік повітря порошкових частинок (рис. 1).

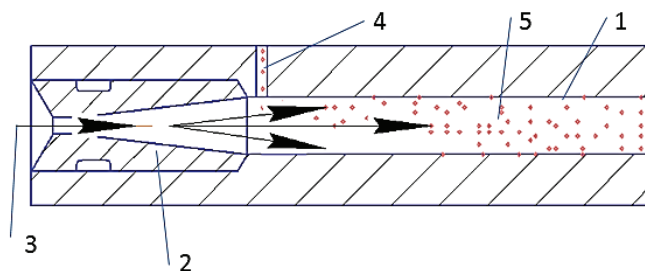


Рис. 1. Принципова схема газодинамічного напилювання:

1 — стовбур; 2 — сопло Лавалю; 3 — напрямок руху стиснутого повітря;  
 4 — канал подачі порошкового матеріалу; 5 — розподілення порошкового матеріалу у стовбурі

Але виготовлення сопла Лавалю пов'язане з певними технологічними труднощами, крім того воно не забезпечує можливості регулювання тиску та швидкості потоку повітря. Як показала практика [1], у радіальному способі введення порошкового матеріалу у повітряний потік відбувається досить швидке зношування стінок отвору стовбура 1. Для з'ясування механізму утворення покриття важливим чинником є швидкість частинок порошку в момент зіткнення з підкладкою. Визначення швидкості порошкових частинок розміром 20...100 мкм є досить складною технічною проблемою.

Метою роботи є розробка нового пристрою для газодинамічного напилювання покриттів більш технологічного за конструкцією, здатного забезпечити регулювання швидкості потоку повітря, покращити зносостійкість стовбура, розробка пристрою для дослідження швидкості руху порошкових частинок під час напилювання і методики визначення швидкості руху частинок порошку у повітряному потоці.

### Результати дослідження

З метою усунення зазначених недоліків розроблено дослідний пристрій для газодинамічного напилювання функціональних покриттів, принципова схема якого показана на рис. 2. Пристрій складається з сопла 3, що має циліндричний отвір постійного діаметра, в який з лівого боку входить форсунка 5. Форсунка 5 має осьовий канал 4 для подачі порошкового матеріалу, що напилюється, та зовнішню конічну частину, яка у сполученні з отвором сопла утворює кільцевий зазор С, який є гирлом сопла та його критичним перетином. Критичним перетином вважається зона гирла сопла з мінімальною площею кільцевого зазору, через який проходить стиснуте повітря. Переміщення форсунки 5 вздовж осі сопла 3 дає можливість регулювання зазору С, що дозволяє регулювати тиск та швидкість течії робочого газу і, відповідно, регулювати параметри та якість напиленого покриття. 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 у сопло установки всмоктується розпилюваний матеріал.

Ще однією особливістю розробленої конструкції є те, що повітряний потік, який проходить через сопло нової конструкції, рухається від периферії до осі сопла (рис. 3). Це сприяє утриманню частинок порошку переважно на осі сопла, що суттєво зменшить вірогідність їх зіткнення з поверхнями отвору сопла і, відповідно, буде зменшено знос цих поверхонь.

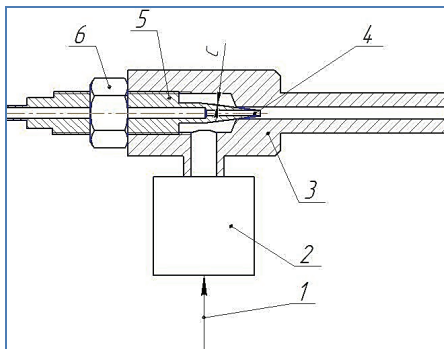


Рис. 2. Принципова схема пристрою для газодинамічного нанесення функціональних покриттів:  
1 — подача стиснутого газу; 2 — нагрівач газу;  
3 — сопло; 4 — канал подачі напилюваного матеріалу;  
5 — форсунка; 6 — гайка-фіксатор

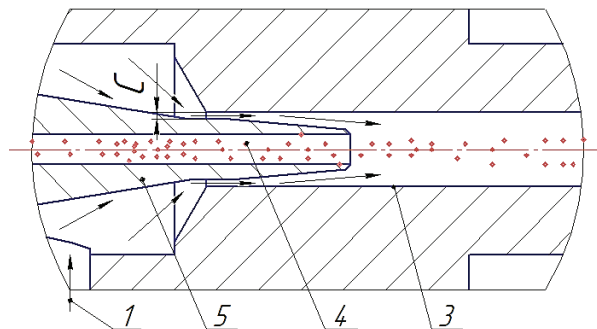


Рис. 3. Схема руху стиснутого повітря 1 та порошкових частинок 4

За цією схемою розроблено дослідний газодинамічний напилювальний пристрій, показаний на рис. 4. Він складається з нагрівача повітря потужністю 5 кВт, прискорювача повітря, виконаного у відповідності до схем, показаних на рис. 2 та 3. Для контролю температури повітряного потоку застосовували хромель-алюмелеву термопару. Тиск повітря контролювали стандартними манометрами.

Газодинамічний напилювальний пристрій (рис. 5) складається з нагрівача повітря, в корпусі 1 якого встановлено термостійкі діелектричні шайби 4. В отворах 5 розміщена ніхромова спіраль (на рис. не показана), під'єднана до контактів 6. Нагрівач повітря з'єднаний з прискорювачем повітря 10.



Рис. 4. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів

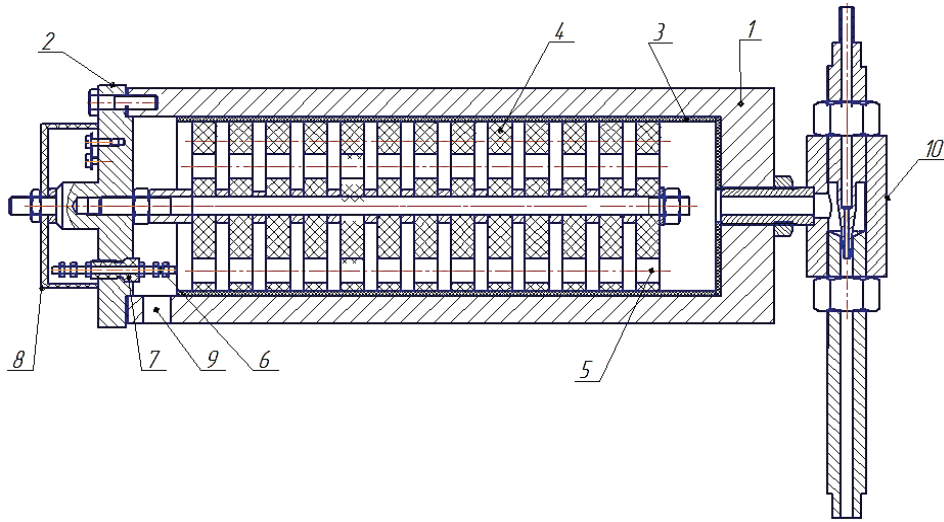


Рис. 5. Конструкція газодинамічного напилувального пристрою:

- 1 — корпус; 2 — кришка; 3 — термоізолятор; 4 — діелектричні шайби;  
 5 — канали для ніхромової спіралі (не показана); 6 — контакти для підключення струму до спіралі;  
 7 — електроізолятор; 8 — діелектрична кришка; 9 — канал для подавання стиснутого повітря;  
 10 — прискорювач повітря

Як матеріал для напилування використовувався композиційний порошок марки С-01-11, основними компонентами якого є мідь, цинк, корунд. Цей порошок дозволяє усувати дефекти у вигляді тріщин, пробоїн, в сталевих, бронзових, латунних та чавунних деталях, а також відновлювати посадкові місця для підшипників в сталевих та чавунних деталях.

Газодинамічний напилувальний пристрій працює так. Повітря під тиском 0,5...1 МПа подається через канал 9, вмикається струм на ніхромову спіраль, спіраль розжарюється до температури 800...900 °С. Повітря, проходячи навколо розжареної спіралі, нагрівається до температури 280...360 °С і потрапляє в прискорювач повітря, де за рахунок проходження через кільцевий критичний перетин відбувається прискорення повітря з одночасним падінням тиску нижче атмосферного в зоні гирла сопла, це створює ефект ежекції і забезпечує всмоктування порошкового матеріалу через осьовий канал форсунки сопла пристрою напилування.

Для дослідження швидкості руху порошкових частинок розроблено дослідну установку (рис. 6). Ця установка складається з високошвидкісного електродвигуна, на валу якого закріплено два диски. На верхньому диску виконано симетрично розташовані отвори діаметром 20 мм.

Процес напилування відбувався таким чином. Сопло 4 напилувального пристрою розташовуємо на осі отвору 5 верхнього диска. Вмикаємо електродвигун 1 установки, який розганяє оберти дисків 2 та 3 до визначених значень, виводимо напилувальну установку на певні режими напилування і здійснюємо подачу порошкового матеріалу у сопло 4 напилувального пристрою. Відбувається процес напилування. Частина порошку потрапляє у отвори у верхньому диску та утворюється пляма напилування 7 на нижньому диску. За рахунок того, що диски обертаються, відбувається зміщення плями напилування відносно проекції 6 отвору та нижньому диску. За величиною цього зміщення визначаємо швидкість руху напилуваного порошку.

Для визначення швидкості розроблено розрахункову схему, показану на рис. 7, та знайдені математичні залежності, за якими можна розрахувати швидкість руху частинок на відстані  $a$ .

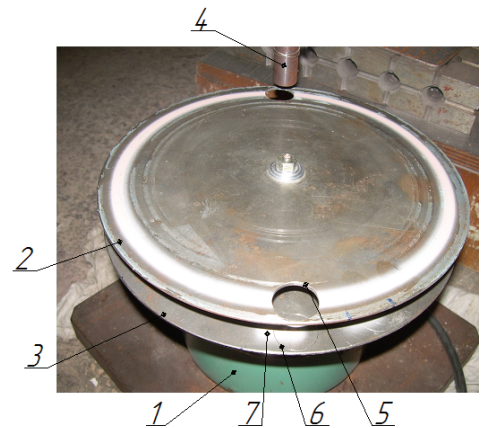


Рис. 6. Загальний вид установки для визначення швидкості руху порошкових частинок: 1 — електродвигун; 2 — верхній диск; 3 — нижній диск; 4 — сопло напилувального пристрою; 5 — отвори у верхньому диску; 6 — проекція отвору 5 на нижньому диску; 7 — пляма напилування на нижньому диску

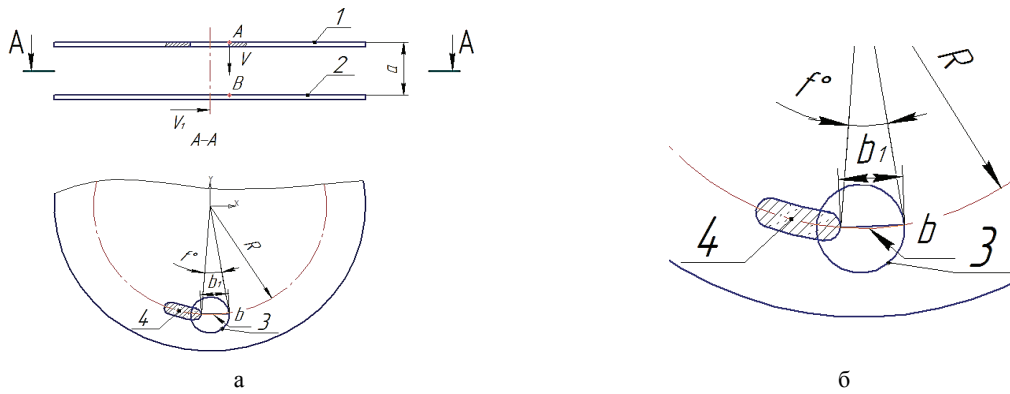


Рис. 7. Розрахункова схема для визначення швидкості руху напилувальних частинок:

а — схема дисків у фронтальній площині та перерізу А—А; б — збільшений вигляд перерізу А—А;

1 — верхній диск з отвором; 2 — нижній диск; 3 — проекція отвору на нижньому диску;

4 — пляма наплення на нижньому диску; В — проекція точки А на нижньому диску; V — швидкість руху порошкових частинок;  $V_1$  — швидкість руху точки В на нижньому диску;  $b$  — відрізок дуги, яку пройшла точка В;

$b_1$  — хорда, яка з'єднує кінцеві точки дуги  $b$ ;  $R$  — радіус руху точки В (збігається з віссю розташування сопла розпилувального пристрою);  $f$  — кут сектора, що з'єднує кінцеві точки дуги  $b$ ;

$a$  — відстань між верхніми поверхнями дисків 1 та 2

Порошкова частинка пройде шлях  $a = Vt$ , де  $t$  — час руху частинки порошку на відстані  $a$ . Звідки  $t = a/V$ . Диск за цей час пройде відстань  $b = V_1 t$ , звідки  $t = b/V_1$ .

Тоді  $a/V = b/V_1$ , звідки швидкість руху порошкової частинки  $V = (aV_1)/b$ . Ділянка дуги  $b$  є частиною кола радіусом  $R$ . Довжина кола радіуса  $R$  складає  $C = 2\pi R$ .

Якщо відома частота обертання  $n$  (об/хв), можна визначити швидкість  $V_1$  точки В

$$V_1 = Cn. \quad (1)$$

Тоді 
$$V = (a2\pi Rn)/b. \quad (2)$$

Використовуючи теорему косинусів, визначимо кут  $f$

$$f = \arccos\left(\frac{2R^2 - (b_1)^2}{2R^2}\right). \quad (3)$$

Довжину дуги  $b$ , що пройшла точка В за час  $t$  знайдемо за пропорцією

$$\frac{2\pi R}{360} \text{ — } 360 \\ b \text{ — } f. \quad (4)$$

Тоді 
$$b = f2\pi R/360 = \left(\arccos\left(\frac{2R^2 - (b_1)^2}{2R^2}\right)2\pi R\right)/360. \quad (5)$$

Якщо  $n$  об/хв, а розміри в метрах, відповідно

$$V = (an)/\left(\arccos\left(\frac{2R^2 - (b_1)^2}{2R^2}\right)/360\right) \text{ м/хв}. \quad (6)$$

За рис. 8 визначимо величину зміщення плями наплення відносно проекції отвору. Вона становить для різних режимів напилування  $b_1 = 9,54$  мм; 7,25 мм; 6,11 мм;

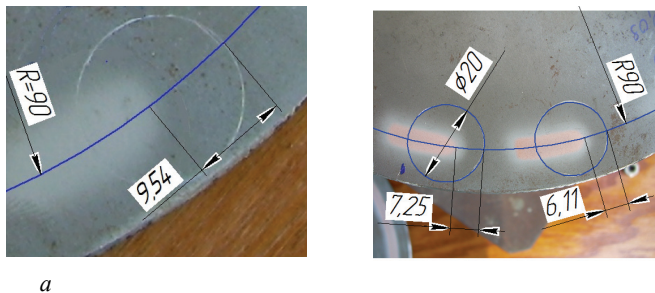


Рис. 8. Геометричні параметри плями наплення: а — наплення за кімнатної температури стиснутого повітря;

б — наплення з права наліво: перше наплення — температура стиснутого повітря 285 °С, критичний перетин 3,01 мм<sup>2</sup>; друге наплення — температура стиснутого повітря 285 °С, критичний перетин сопла 2,5 мм<sup>2</sup>. Тиск повітря 0,57 МПа

Діаметр отвору сопла 5 мм. Відстань від зрізу сопла до верхнього диску 10 мм. Відстань від зрізу сопла до нижнього диску 32 мм. Відстань між дисками  $a = 22$  мм.

Виходячи з отриманих результатів, розраховано швидкість руху частинок на відстані між дисками, а результати занесені у табл.

$a$ , м	$n$ , об/хв	$b_1$ , м	$R$ , м	Критичний перетин сопла, мм <sup>2</sup>	Температура повітря	Тиск повітря, МПа	$V$ , м/с
0,022	10587	0,00954	0,09	3,01	20 °С	0,57	232,2
0,022	10587	0,00725	0,09	2,5	285 °С	0,57	302,7
0,022	10587	0,00611	0,09	3,01	285 °С	0,57	359,2

### Висновки

Розроблена нова конструкція напилювального пристрою, яка є більш технологічною та дозволяє змінювати параметри напилювання. Розроблено методику визначення швидкості напилювання. Встановлено, що за температури 20 °С швидкість напилювання складає 232,2 м/с, що не забезпечує умов створення покриття. З підвищенням температури до 285 °С утворилось якісне покриття. Швидкість напилювання становила від 302,7 до 359,2 м/с для критичних перетинів 2,5 та 3,01 мм<sup>2</sup>. Площа напилення за більшої швидкості стала приблизно на 20 % більше, ніж у разі меншої швидкості.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / [А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин] ; под ред. В. М. Фомина. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 536 с.
2. Патент РФ 2237746 Способ газодинамического нанесения покрытий и устройство для его осуществления / Каширин А. И., Ключев О. Ф., Шкодкин А. В. ; опуб. 2003 г.

Рекомендована кафедрою технології підвищення зносостійкості ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.10.2014

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

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

**Осадчук Андрій Юрійович** — старший викладач кафедри технології підвищення зносостійкості.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**O. L. Gaidamak<sup>1</sup>**  
**V. I. Savuliak<sup>1</sup>**  
**A. Yu. Osadchuk<sup>1</sup>**

## Development of gas-dynamic spray device and research of the movement rate of powder particles

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The design of gas-dynamic spray device in which the design is simplified and the ability to control spraying parameters is provided by changing the nozzle assembly. The study of the velocity of the powder particles and its influence on the characteristics of the resulting coating is conducted in the paper.*

**Keywords:** gas-dynamic sprayed device, velocity of particle coating.

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

**Savuliak Valerii I.** — Dr. Sc. (Eng), Professor, Head of the Chair of Technology of Wear Resistance Increase;

**Osadchuk Andrii Yu.** — Senior Lecturer of the Chair of Technology of Wear Resistance Increase.

**О. Л. Гайдамак<sup>1</sup>**  
**В. И. Савуляк<sup>1</sup>**  
**А. Ю. Осадчук<sup>1</sup>**

## **Разработка газодинамического напыляющего устройства и исследование скорости движения напыляемых порошковых частиц**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Разработана конструкция газодинамического напыляющего устройства, в котором за счет изменения соплового узла упрощена его конструкция и обеспечена возможность регулирования параметров напыления. Проведено исследование скорости движения частиц порошка и ее влияние на характеристики полученного покрытия.*

**Ключевые слова:** газодинамическое напыляющее устройство, скорость движения частиц, покрытие.

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

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

**Осадчук Андрей Юрьевич** — старший преподаватель кафедры технологии повышения износоустойчивости