

**Гайдамак О. Л.**

к.т.н., доцент

Гулько І. В.

к.т.н., доцент

Паладій М. С.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Gaidamak O.**

PhD of Eng., Associate Professor

Hunko I.

PhD of Eng., Associate Professor

Paladiy M.

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.735.34; 621.793.79****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-13****ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ
ПОРОШКОВИХ ЧАСТИНОК
ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО
НАПИЛЕННЯ**

В статті показано результати дослідження швидкості руху напилюваних порошкових частинок з використанням холодного газодинамічного напилення мідного порошку С01-11. Наведено особливості та переваги газодинамічного напилення перед іншими газотермічними способами нанесення покриттів. Проаналізовано важливість швидкісного режиму нанесення покриття і його вплив на формування покриття. Запропоновано розрахунково експериментальний метод визначення швидкості частинок порошку, що напилюється та дослідну установку за допомогою якої можливо отримати об'єктивні данні про швидкісний режим створення покриттів холодним газодинамічним напиленням та іншими способами напилення. Показана конструкція застосованого газодинамічного напилювального пристрою, який містить електронагрівач потоку стиснутого повітря, та прискорювач нагрітого стиснутого повітря в який за рахунок ефекту ежекції водиться напилюваний металевий порошок. Для дослідження застосовувалась експериментальна установка яка містить два обертових диски встановлених на відстані 20 мм один від одного на валу швидкісного електродвигуна, при чому у верхньому диску виконано отвори, через які відбувається напилення на поверхню нижнього диску. За рахунок того, що диски с процесі напилення обертаються зі швидкістю 10587 об/хв відбувається зміщення фігури напилення на нижньому диску відносно проекції отвору верхнього диску на нижній диск. За величиною цього зміщення розраховується швидкість руху частинок напилюваного порошку, за наведеною методикою. Параметри які беруться до уваги при розрахунку швидкості руху напилювальних частинок порошку такі: діаметр отвору сопла напилювального пристрою 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; радіус на якому встановлено сопло напилювального пристрою це 90 мм.

В результаті проведених дослідів встановлено, що при напиленні мідного порошку С01-11 при температурі 20 °С швидкість напилення складає 232,2 м/с, що не забезпечує умов створення покриття, а при підвищенні температури до 285 °С якісне покриття утворилось. Швидкість напилення при цьому становила від 302,7 до 359,2 м/с для критичних перетинів 2,5 та 3,01 мм², а площа напилення при більшій швидкості становила приблизно на 20% більшою ніж при меншій швидкості. Це дає можливість для дослідників визначати швидкісні режими напилення і відповідно більш точно призначати оптимальні технологічні параметри для досягнення найбільш якісних результатів створення функціональних покриттів.

Ключові слова: холодне газодинамічне нанесення покриття, швидкість, напилення, покриття, розрахунок швидкості.



Вступ. Холодне газодинамічне напилення (ХГДН) відноситься до новітніх технологій і швидко розвивається [1, 4, 5, 6, 7, 8]. В процесі ХГДН порошкові частинки металів, полімерів, кераміки, з характерним розміром 10-150 мкм прискорюються в швидкісному потоці газу до швидкостей 250-1200 м/с і при ударі об перешкоду закріплюються на її поверхні без фазових переходів утворюючи суцільне покриття. Відсутність високих температур суттєво розширює можливості методів нанесення покриттів з різних порошкових матеріалів та забезпечує методу ХГДН, у порівнянні з існуючими газотермічними методами, істотні переваги:

- дозволяє використовувати для напилення порошки із розміром менше 30-50 мкм, в тому числі ультрадисперсні, що призводить до поліпшення якості покриття - збільшується його щільність, зменшується об'єм мікропорожнин, структура стає більш однорідною, виникає можливість зменшувати товщину покриття;

- відсутнє істотне нагрівання часток і пов'язаних з ним процесів високотемпературного окислення та фазових переходів, що дає можливість отримувати покриття з властивостями, близькими до матеріалу порошку, а також композиційні покриття з суміші порошоків, які суттєво різняться за фізико-механічними властивостями;

- відсутній значний термічний вплив на поверхню виробу, що дає можливість наносити покриття на підкладки з нетермостійких матеріалів;

- відносна простота технічної реалізації та покращення безпеки робіт у зв'язку з незначною температурою процесу напилення, а також відсутність вогне та вибухонебезпечних газів.

Поряд з цим, покращуються експлуатаційні властивості поверхневого шару деталі завдяки нанесенню на її поверхню спеціальних металевих, полімерних та композиційних покриттів.

Аналіз останніх досліджень.

Починаючи з 1990 р в світі стали з'являтися центри та лабораторії з вивчення технології ХГДН. Результати досліджень яких наочно демонструється великою кількістю публікацій, огляд яких представлений в монографії [6] яка є одною з перших в світі і присвячена основам ХГДН, та роботах [1-5]. В проведених дослідженнях були запропоновані різні науково-технічні рішення здійснення процесу ХГДН, наприклад, шляхом оптимального вибору виду робочого газу [7-9], розміру і форми часток порошку [10], різних режимів напилення

(швидкість сканування, число проходів,) [11], кута напилення [12], температури газопорошкової суміші [13], створення різноманітних підшарів [14]. Проводились також роботи з напилювання у вакуумі субмікронних порошоків [15], застосування мікросопел з діаметром каналу для напилення до 50 мкм, для напилення нанопорошків з металів та неметалів [16], з металізації методом ХГДН поверхонь скла і кремнію [17], різних пластиків [18-21], а також напилення порошкових пластиків [22, 23]. Всі ці результати показують, наскільки широко застосовуються різні процеси ХГДН. Велике різноманіття одержуваних з його допомогою матеріалів і покриттів також представлено в науковій роботі [24].

Однак потенціал ХГДН ще не до кінця розкритий. Деякі аспекти процесу вимагають подальшого дослідження з метою створення нових технологій та вдосконалення існуючих, їх оптимізації, а також більш глибокого розуміння процесів високошвидкісної ударної взаємодії гетерогенних потоків з поверхнями деталей на яких відбувається створення покриттів.

Важливим фактором, що впливає на процес створення покриттів є швидкість з якою порошкові частинки, в процесі напилення, потрапляють на поверхню деталі. Від цього в значній мірі залежить якість та характеристики нанесеного покриття. Але безпосередньо виміряти швидкість руху мікроскопічної порошкової частинки можна лише використовуючи дороговартісне оптоелектронне обладнання [1, 4, 5], або визначати швидкість за допомогою аналітичних методів які мають низку припущень [2] і відповідно результати розрахунків можуть мати суттєві відхилення від дійсного значення швидкості потоку порошкових частинок в момент зіткнення з перешкодою.

Мета досліджень. Метою роботи є розробка простого розрахунково експериментального методу, який дозволить точно визначити швидкість напилювальних частинок в процесі газодинамічного напилення.

Виклад основного матеріалу. Для напилення використано дослідний пристрій для газодинамічного напилення функціональних покриттів, принципова схема, якого показана на рис. 1. Пристрій складається з сопла 3, що має циліндричний отвір постійного діаметру, в який з лівого боку водиться форсунка 5. Форсунка 5 має осьовий канал 4 для подачі порошкового матеріалу, що напилюється, та зовнішню конічну частину, яка у сполученні із 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 (критичного перетину), що дозволяє регулювати тиск та швидкість течії робочого газу і відповідно регулювати параметри та якість напиленого покриття. Проходячи через критичний перетин відбувається прискорення швидкості потоку газу та падіння його тиску до значень менше атмосферного. Тобто створюється ефект ежекції за рахунок якого всмоктується розпилюваний матеріал у сопло установки.

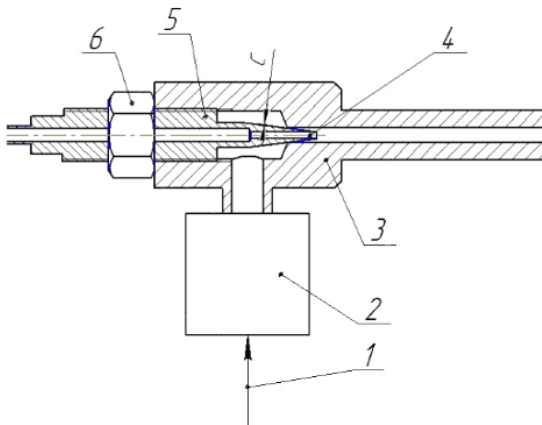


Рис. 1. Принципова схема пристрою для газодинамічного нанесення функціональних покриттів. 1- подача стиснутого газу, 2 – нагрівач газу, 3 – сопло, 4 – канал подачі матеріалу, що напилується. 5 – форсунка, 6 – гайка-фіксатор.

Ще однією особливістю розробленої конструкції є те, що повітряний потік, що

проходить через сопло нової конструкції, рухається від периферії до осі сопла. 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.

Для реалізації процесу холодного газодинамічного напилення створено спеціальне обладнання показане на рис. 2.



Рис. 2. – Газодинамічний напилувальний пристрій, вид загальний.

Газодинамічний напилувальний пристрій [3] складається з двох основних складових частин це нагрівач стиснутого повітря та прискорювач нагрітого стиснутого повітря. Креслення газодинамічного напилувального пристрою показано на рис. 3.

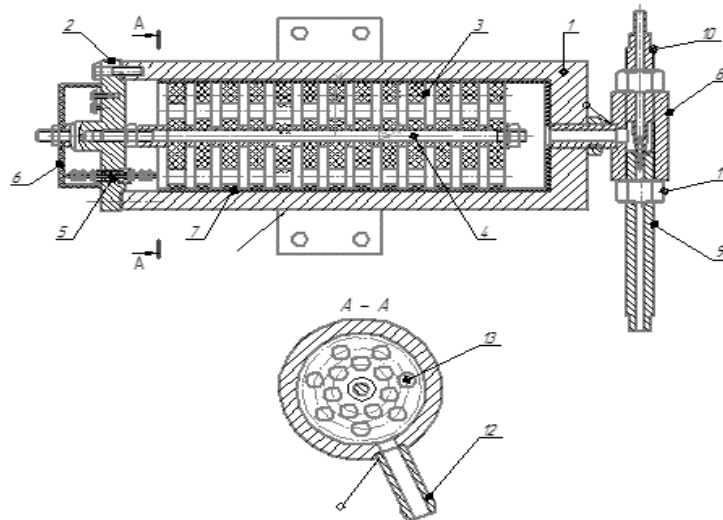


Рис. 3. – Будова газодинамічного напилувального пристрою



Напилювальний пристрій складається з корпусу 1, кришки 2, керамічних дисків 3 з отворами 13, тримача дисків 4, виводів електроконтактів 5, ізоляційної кришки 6, термоізолятора корпусу 7, надзвукового сопла 8, стовбура 9, конуса 10, гайки 11, патрубка для подачі стиснутого повітря 12.

В якості напилювального матеріалу використовували порошок міді С01-11 показаний на рис. 4.



Рис. 4. – Порошок міді.

Для дослідження швидкості потоку порошкових частинок розроблено дослідну установку (Рис. 5). Ця установка складається з високошвидкісного електродвигуна, на валу якого закріплено два диски. На верхньому диску виконано симетрично розташовані отвори діаметром 20 мм.



Рис. 5. Загальний вид установки для визначення швидкості потоку порошкових частинок. 1 – електродвигун, 2 – диск верхній, 3 – диск нижній, 4 – сопло пристрою ХГДН, 5 – отвори у верхньому диску, 6 – проекція верхнього отвору 5 на нижньому диску 3, 7 – шар напилення на нижньому диску.

Процес напилення відбувався наступним чином. Сопло 4 напилювального пристрою розташовуємо на осі отвору 5 верхнього диска. Вмикаємо електродвигун 1 установки, який розганяє оберти дисків 2 та 3 до визначених значень, напилювальну установку виводимо на певні режими напилення і подаємо порошковий

матеріал у сопло 4 напилювального пристрою. Відбувається процес створення шару покриття. Частина порошку потрапляє у отвір у верхньому диску та досягає поверхні нижнього диску і утворюється шар напилення 7 на нижньому диску 3. За рахунок того, що диски обертаються, відбувається зсув шару напилення відносно проекції 6 отвору у верхньому диску на нижньому диску. За величиною цього зсуву визначаємо швидкість потоку напилюваного порошку.

Методика розрахунку. Для визначення швидкості розроблено розрахункову схему, показану на рис. 6, з використанням якої виведемо математичні залежності за якими зможемо порахувати швидкість потоку частинок на відстані (а) між дисками 1 та 2.

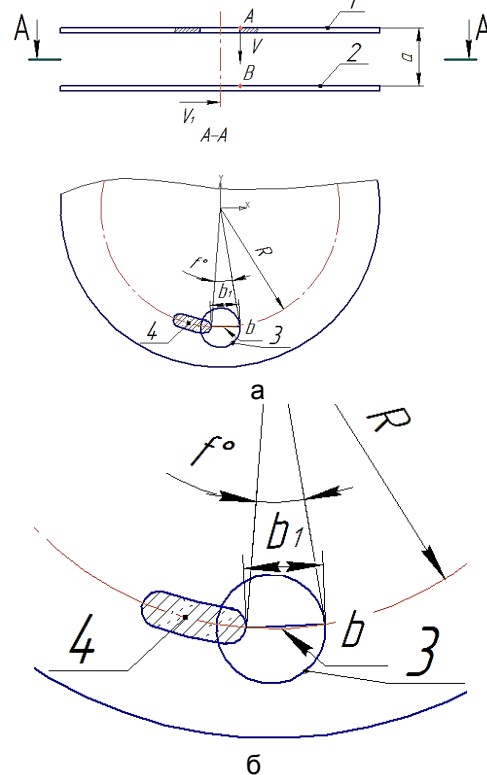


Рис. 6. Розрахункова схема для визначення швидкості потоку напилювальних частинок. а - схема установки у фронтальній площині та перерізу А-А, б – додатковий збільшений вигляд перерізу А-А, 1 – верхній диск, 2 – нижній диск, 3 – проекція отвору А на нижньому диску, 4 – шар напилення на нижньому диску. В – проекція точки отвору А на нижньому диску. V – Швидкість потоку порошкових частинок. V₁ – швидкість руху точки В, b – відрізок дуги по якому рухалась точка В, b₁ – хорда що з'єднує кінцеві точки дуги b, R – радіус точки В (співпадає з віссю встановлення сопла напилювального пристрою), f – кут сектора який з'єднує кінцеві точки дуги b, а – відстань між поверхнями дисків 1 та 2.



Порошкова частинка пролетить шлях $a = Vt$, де t – час руху частинки порошку на відстані a . Тоді $t = a/V$. Диски за цей час пройдуть шлях $b = V_1 t$, звідки $t = b/V_1$.

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

З відомої швидкості обертів дисків за хвилину n , можна розрахувати швидкість V_1 точки B .

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

Звідки

$$V = (a2\pi Rn)/b \quad (2)$$

За теоремою косинусів визначимо кут f .

$$f = \arccos(2R^2 - (b_1)^2)/2R^2 \quad (3)$$

Довжину дуги b , що пройшла точка B за час t розрахуємо за пропорцією

$$\frac{2\pi R - 360}{b} = \frac{f}{360}$$

Звідки

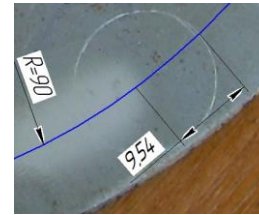
$$b = f2\pi R/360 = (\arccos((2R^2 - (b_1)^2)/2R^2)2\pi R)/360 \quad (5)$$

Якщо n об/хв, а розміри в метрах, отримаємо

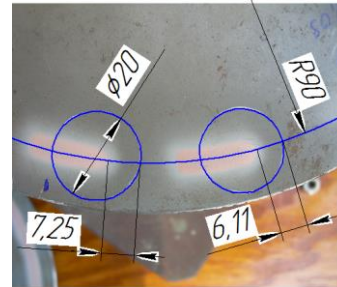
$$V = (an)/(\arccos((2R^2 - (b_1)^2)/2R^2)/360) \text{ м/хв.} \quad (6)$$

За наведеною методикою та за результатами наплення (рис. 7) виміряємо величину зсуву шару наплення відносно проекції верхнього отвору на нижній диск. Вона для різних режимів

наплення становить $b_1 = 9,54$ мм; $7,25$ мм; $6,11$ мм;



а



б

Рис. 7. Геометричні параметри шару наплення: а – наплення при температурі 20°C стиснутого повітря (покриття не утворилось), б – шар наплення з права наліво: перший шар, температура стиснутого повітря 285°C , критичний перетин $3,01$ мм², другий шар з температураю стиснутого повітря 285°C , критичний перетин сопла $2,5$ мм². Тиск повітря для всіх дослідів $0,57$ МПа.

Діаметр отвору сопла напилювального пристрою 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.

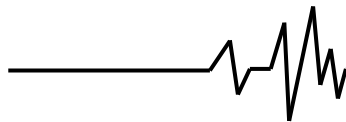
Виходячи з отриманих результатів розрахуємо швидкість руху порошкових частинок, а результати занесемо у таблицю 1.

Таблиця 1

а м	п об/хв	b_1 м	R м	Критичний перетин сопла мм ²	Температура повітря	Тиск повітря МПа	V м/с
0,022	10587	0,00954	0,09	3,01	20°C	0,57	232,2
0,022	10587	0,00725	0,09	2,5	285°C	0,57	302,7
0,022	10587	0,00611	0,09	3,01	285°C	0,57	359,2

Висновки. Розроблено розрахунково експериментальну методику визначення швидкості руху порошку, що напилюється, яка дає можливість точно визначати швидкість порошку, що напилюється, використовуючи

нескладне обладнання і просту методику розрахунку. Це дає можливість для дослідників визначати швидкісні режими наплення і відповідно більш точно призначати оптимальні технологічні параметри для досягнення



найбільш якісних результатів створення функціональних покриттів. Наприклад, встановлено, що при напиленні мідного порошку при температурі 20 °С швидкість напилення складає 232,2 м/с, але така швидкість не забезпечує умов створення покриття, а при підвищенні температури до 285 °С якісне покриття утворилось. Швидкість напилення цьому випадку становила від 302,7 до 359,2 м/с для критичних перетинів 2,5 та 3,01 мм², а площа напилення при більшій швидкості становила приблизно на 20% більшою ніж при меншій швидкості.

Список використаних джерел

1. Алхимов А. П., Клінков С. В., Косарев В. Ф. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика : Москва : Физматлит, 2010. 533 с.
2. Бороненко М. П., Гуляев И.П., Гуляев П. Ю., Демьянов А. И., Долматов А. В., Иордан В. И., Коржик В. Н., Кривцун И. В., Харламов М. Ю. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления. FUNDAMENTAL RESEARCH 2013. №10 С. 1194 -1199.
3. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з осьовою подачею порошкового матеріалу: пат. 110552 Україна: МПК6 С23С24/00. № а 201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. №1.
4. Гайдамак О. Л., Савуляк В. І. Експериментальне дослідження процесу холодного газодинамічного нанесення покриття та методика розрахунку його режимів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 4(14). С. 88-94.
5. A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov. Cold spray technology: Elsevier Science, 2007, 336 p.
6. The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007. 362 p.
7. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray: Physics & Technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 234 p.
8. Wong W., Irissou E., Ryabinin A.N. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. *J. of Therm. Spray Technol.* 2011. Vol. 20. P. 213–226.
9. Wong W., Irissou E., Ryabinin A.N. Effect of particle morphology and size distribution on coldsprayed pure titanium coatings. *J. of Therm. Spray Technol.* 2013. Vol. 22. P. 1140–1153.
10. Sova A., Grigoriev S., Okunkova A. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment. *Surf. and Coat. Technol.* 2013. Vol. 235. P. 283–289.
11. Binder K., Gottschalk J., Kollenda M. Influence of impact angle and gas temperature on mechanical properties of titanium cols spray deposits. *J. of Therm. Spray Technol.* 2011. Vol. 20. P. 234–242.
12. Jin Y.M., Cho J.H., Park D.Y. Manufacturing and macroscopic properties of cold sprayed Cu-In coating material for sputtering target. *J. of Therm. Spray Technol.* 2011. Vol. 20. P. 497–507.
13. Li Y., Li Ch.J., Zhang Q. Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat. *J. of Therm. Spray Technol.* 2010. Vol. 19. P. 168–177.
14. Kim D.Y., Park J.J., Lee J.G. Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates. *J. of Therm. Spray Technol.* 2013. Vol. 22. P. 1092–1102.
15. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. *Surf. and Coat. Technol.* 2009. Vol. 203. P. 254–260.
16. Zhou X.I., Chen A.F., Liu J.C. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray. *Surf. and Coat. Technol.* 2011. Vol. 206. P. 132–136.
17. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray. *Surf. and Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. P. 2167–2173.
18. Lupoi R., O'Neill W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles. *Surf. and Coat. Technol.* 2011. Vol. 206. P. 1069–1076.
19. Gardon M., Latorre A., Torrell M. Cold gas spray titanium coatings onto biocompatible polymer. *Material Letters.* 2013. Vol. 106. P. 97–99.
20. Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M. Cold spray coating: iev of material systems and future perspectives. *Surf. Eng.* 2014. Vol. 6, № 6. – P. 369–395.
21. Champagne V.K., Helfritch D.J. Mainstreaming cold spray – push for applications. *Surf. Eng.* 2014. Vol. 30, № 6. P. 396–403.
22. Hassani-Gangaraj S.M., Moridi A., Guagliano M. Critical review of corrosion protection by cold spray coatings. *Surf. Eng.* 2015. Vol. 31, № 11. P. 803-815.
23. Widener C.A., Carter M.J., Ozdemir O.C. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator. *J.*



Therm. Spray Technol. 2016. Vol. 25(1–2). P. 193–201.

24. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Сова А.А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях холодного газодинамического напыления. *Теплофизика и аэромеханика*. 2006. Т. 13, № 3. С. 386–397.

References

1. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., [and others]. (2010) Holodnoe gazodinamicheskoe napilenie. *Teoriya i praktika*. [Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice] Moscow: Fizmatlit. [in Russia].

2. Bondarenko M. P., Guliaev I. P., Guliaev P. Y., [and others] (2013) Metodi kontroliia temperfuri i skorosti chastits kondensirovanoy fazi v protsesse plazmenno-dugovogo napilenia. [Methods for controlling the temperature and velocity of particles of the condensed phase in the process of plasma-arc sputtering] FUNDAMENTAL RESEARCH №10, С. 1194 - 1199. [in Russia].

3. Device for gas-dynamic coating with radial flow of powder material: Pat. 110552 Ukraine, IPC6 C23C24 / 00 № a 201405543; claimed 05/23/14; publ. 01/12/16, Bul. №1. 12 sec. [in Ukrainian]. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F. (2010) Holodnoe gazodinamicheskoe napilenie. *Teoriya i praktika*. [Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice] Moscow: Fizmatlit [in Russia].

4. Gaidamak O. L., Savulyak V.I. (2018) Eksperementalne doslidzshenna prozesu holodnogo gazodinamichnogo nanesenia pokrittia ta metodika rozrahynku yogo rezshimiv/ [Experimental study of the process of cold gas-dynamic coating and methods for calculating its modes]. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. 4 (14). 88-94 [in Ukrainian].

5. Papyrin, A., Kosarev V., Klinkov S. (2007). *Cold spray technology*. Elsevier Science. 336 p. [in English].

6. The cold spray materials deposition process. (2007). *Fundamentals and applications*. Cambridge. Woodhead Publishing Ltd, 362 p. [English]

7. Maev R., Leshchynsky V. *Introduction to low pressure gas dynamic spray: Physics & Technology*. – Weinheim: Wiley-VCH, 2008. – 234 p. [English].

8. Wong W., Irissou E., Ryabiniin A.N. (2011) Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. *J of Therm. Spray Technol.* 20, 213–226. [in English].

9. Wong W., Irissou E., Ryabiniin A.N. (2013) Effect of particle morphology and size distribution on coldsprayed pure titanium coatings. *J. of Therm. Spray Technol.* 22, 1140–1153. [in English].

10. Sova A., Grigoriev S., Okunkova A. (2013) Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment. *Surf. and Coat. Technol.* 235, P. 283–289 [in English].

11. Binder K., Gottschalk J., Kollenda M. (2011) Influence of impact angle and gas temperature on mechanical properties of titanium cold spray deposits. *J. of Therm. Spray Technol.* 20, 234–242 [in English].

12. Jin Y.M., Cho J.H., Park D.Y. (2011) Manufacturing and macroscopic properties of cold sprayed Cu-In coating material for sputtering target. *J. of Therm. Spray Technol.* 20, 497–507 [in English].

13. Li Y., Li Ch.J., Zhang Q. (2010) Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat. *J. of Therm. Spray Technol.* 19, 168–177 [in English].

14. Kim D.Y., Park J.J., Lee J.G. (2013) Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates. *J. of Therm. Spray Technol.* 22, 1092–1102. [in English].

15. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S. (2009) Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. *Surf. and Coat. Technol.* 203, 254–260 [in English].

16. Zhou X.I., Chen A.F., Liu J.C. (2011) Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray. *Surf. and Coat. Technol.* 206, 132–136 [in English].

17. Lupoi R., O'Neill W. (2010) Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray. *Surf. and Coat. Technol.* 205, 2167–2173 [in English].

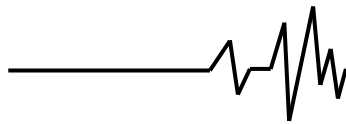
18. Lupoi R., O'Neill W. (2011) Powder stream characteristics in cold spray nozzles. *Surf. and Coat. Technol.* 206, 1069–1076 [in English].

19. Gardon M., Latorre A., Torrell M. (2013) Cold gas spray titanium coatings onto biocompatible polymer. *Material Letters*. 106, 97–99 [in English].

20. Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M. (2014) Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. *Surf. Eng.* 6, 369–395. [in English]

21. Champagne V.K., Helfritch D.J. (2014) Mainstreaming cold spray – push for applications. *Surf. Eng.* 30, P. 396–403. [in English].

22. Hassani-Gangaraj S.M., Moridi A., Guagliano M. (2015) Critical review of corrosion



protection by cold spray coatings. Surf. Eng. 11, 803-815. [in English].

23. Widener C.A., Carter M.J., Ozdemir O.C. (2016) Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator. J. Therm. Spray Technol. 25(1–2), 193–201 [in English].

24. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A. (2006). Issledovanie inzhenernoy shemi formirovaniya geterogennih sverkhzvukovih potokov v usloviyah holodnogo gzodinamicheskogo napileniya [Investigation of the ejector scheme for the formation of heterogeneous supersonic flows under conditions of cold gas-dynamic spraying] – Thermophysics and aeromechanics. Vol. 13, 3, 386–397 [in Russian].

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ ЧАСТИЦ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ НАПЫЛЕНИЯ

В статье показаны результаты исследования скорости движения напыляемых порошковых частиц на примере холодного газодинамического напыления медного порошка C01-11. Приведены особенности и преимущества газодинамического напыления перед другими газотермическими способами нанесения покрытий. Проанализирована важность скоростного режима нанесения покрытия и его влияние на формирование покрытия. Предложен расчетно экспериментальный метод определения скорости напыляемых частиц, и опытный установку с помощью которой можно получить объективные данные о скоростном режиме создания покрытий холодным газодинамическим напылением другими способами напыления. Показана конструкция примененного газодинамического напылительного устройства, содержащего электронагреватель потока сжатого воздуха, и ускоритель нагретого сжатого воздуха в который за счет эффекта эжекции водится напыляемый металлический порошок. Для исследования применялась экспериментальная установка содержащая два вращающихся диска установленных на расстоянии 20 мм друг от друга на валу высокооборотистого электродвигателя, причем в верхнем диске выполнены отверстия, через которые происходит напыление на поверхность нижнего диска. За счет того, что диски с процессе напыления вращаются со скоростью 10587 об/мин происходит смещение фигуры напыления на нижнем диске относительно проекции отверстия верхнего диска на нижний диск. По величине этого смещения рассчитывается скорость движения частиц напыляемого

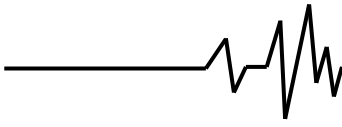
порошка, по приведенной методике. Параметры которые принимаются во внимание при расчете скорости движения частиц порошка такие: диаметр отверстия сопла напылительного устройства 5 мм; расстояние от среза сопла до верхнего диска 10 мм; расстояние от среза сопла до нижнего диска 32 мм; расстояние между дисками $a = 22$ мм; радиус на котором установлено сопло напылительного устройства 90 мм.

В результате проведенных опытов установлено, что при напылении медного порошка C01-11 при температуре 20 °C скорость напыления составляет 232,2 м/с, что не обеспечивает условий создания покрытия, а при повышении температуры до 285 °C качественное покрытие образовалось. Скорость напыления при этом составляла от 302,7 до 359,2 м/с для критических сечений 2,5 и 3,01 мм², а площадь напыления при большей скорости составляла примерно на 20% больше чем при меньшей скорости. Это дает возможность для исследователей определять скоростные режимы напыления и соответственно более точно назначать оптимальные технологические параметры для достижения наиболее качественных результатов создания функциональных покрытий.

Ключевые слова: холодное газодинамическое нанесение покрытия, скорость, напыление, покрытие, расчет скорости.

INVESTIGATION OF THE SPEED OF MOVEMENT OF COLD GAS DYNAMIC SPRAYING POWDER PARTICLES

The article shows the results of the study of the velocity of the sprayed powder particles on the example of cold gas-dynamic spraying of copper powder C01-11. Features and advantages of gas-dynamic spraying before other gas-thermal coating methods are given. The importance of the speed regime of coating and its influence on the formation of the coating is analyzed. A computational experimental method for determining the velocity of sprayed particles is proposed, as well as an experimental setup with the help of which it is possible to obtain objective data on the velocity regime of cold gas-dynamic coating. The design of the applied gas-dynamic spraying device is shown, which contains an electric heater of the compressed air flow and an accelerator of the heated compressed air into which the sprayed metal powder is driven due to the ejection effect. An experimental setup was used for the study, which contained two rotating disks mounted at a distance of 20 mm from each



other on the shaft of a high-speed electric motor, with holes in the upper disk through which spraying occurs on the surface of the lower disk. Due to the fact that the disks with the spraying process rotate at a speed of 10587 rpm is the displacement of the sputtering figure on the lower disk relative to the projection of the hole of the upper disk on the lower disk. The magnitude of this displacement is calculated by the velocity of the particles of the sprayed powder, according to the above method. The parameters that are taken into account when calculating the speed of the spray particles of the powder is the diameter of the nozzle of the spray device 5 mm. The distance from the nozzle cut to the upper disk is 10 mm. The distance from the nozzle cut to the lower disk is 32 mm. The distance between the disks $a = 22$ mm. The radius on which the nozzle of the spray device is installed is 90 mm.

As a result of the experiments, it was found that when spraying copper powder C01-11 at a temperature of 20 °C, the spraying speed is 232.2 m / s, which does not provide conditions for coating, and at elevated temperatures to 285 °C quality coating was formed. The spraying speed was from 302.7 to 359.2 m / s for critical sections of 2.5 and 3.01 mm², and the spraying area at higher speeds was approximately 20% higher than at lower speeds. This makes it possible for researchers to determine the velocity modes of spraying and, accordingly, to more accurately assign the optimal technological parameters to achieve the highest quality results of creating functional coatings.

Keywords: cold gas-dynamic coating, speed, spraying, coating, speed calculation.

Відомості про авторів

Гайдамак Олег Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: haidamak@vsau.vin.ua).

Гулько Ірина Василівна – кандидат технічних наук, доцент, кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: irynagunko@vsau.vin.ua).

Паладій Максим Сергійович – аспірант кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008)

Гайдамак Олег Леонідович - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехники, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: haidamak@vsau.vin.ua)

Гулько Ирина Васильевна - кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: irynagunko@vsau.vin.ua).

Паладій Максим Сергеевич - аспирант кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008).

Gaidamak Oleg Leonidovich - Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University .

Hunko Iryna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: irynagunko@vsau.vin.ua).

Paladiy Maksym - graduate student of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008).