

УДК 621.795.4-047.37

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.19

О. В. ШОРИНОВ¹, А. І. ДОЛМАТОВ¹, С. О. ПОЛИВЯНИЙ²¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна² АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ НА КОЕФІЦІЄНТ ВИКОРИСТАННЯ ПОРОШКУ

Виконано дослідження впливу температури і тиску повітря на вході в надзвукове сопло, а також дистанції від зрізу сопла до підкладки (дистанція напилювання), на коефіцієнт використання порошку на основі нікелю при холодному газодинамічному напилюванні низького тиску (тиск повітря на вході в сопло до 1,0 МПа). Одним із важливих параметрів, що характеризує ефективність процесу напилювання, є коефіцієнт використання порошку. Цей коефіцієнт є відношенням маси покриття до маси порошку, що було використано для одержання цього покриття. Для процесу холодного газодинамічного напилювання, що реалізується на обладнанні з використанням тиску повітря до 1,0 МПа, головним недоліком є відносно низький коефіцієнт використання порошку. Для його підвищення (але не обмежується лише цим) до порошків чистих металів додають керамічну складову, наприклад оксиду алюмінію Al_2O_3 . В дослідженні в якості порошкового матеріалу використано порошкову суміш на основі нікелю в якій частка Al_2O_3 складає приблизно 10 %. В якості матеріалу підкладки використано пластини з титанового сплаву ВТ9. На основі багатofакторного планування експерименту вивчено вплив комплексних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання низького тиску на коефіцієнт використання порошку. Після проведення напилювання відповідно до матриці експерименту, було виконано зважування зразків з покриттями. За відомими значеннями маси зразків до напилювання, було розраховано приріст їх маси і коефіцієнт використання порошку. З аналізу отриманих статистичних даних побудовано залежності впливу комплексних параметрів процесу напилювання на коефіцієнт використання порошку, максимальні значення якого склали до 35 %. Підтверджено, що найбільший вплив на цей параметр має температура повітря на вході в сопло. Поясненням цього є збільшення температури і швидкості потоку, і як наслідок, швидкості і температури частинок порошку, що знаходяться в цьому потоці. Більші значення швидкості і температури частинок приводить до більш інтенсивної пластичної деформації при зіткненні частинок з підкладкою та їх зчепленню з останньою.

Ключові слова: порошкова суміш; повний факторний експеримент; покриття; ефективність напилювання.

Вступ

Технологія холодного газодинамічного напилювання є перспективним методом формування покриттів завдяки високим показникам їх покриттів. Процес характеризується низькими робочими температурами та високої кінетичній енергії частинок, що знаходяться в газовому потоці [1]. Для можливості зчеплення частинок металу з підкладкою, вони мають досягти певної швидкості, що називається критичною швидкістю [2, 3]. Швидкість частинок впливає як на якість покриття, так і на коефіцієнт використання порошку (КВП).

Холодне газодинамічне напилювання низького тиску (ХГН НТ; робочий тиск до 1,0 МПа) найбільшого застосування знайшло для ремонту та відновлення деталей з легких сплавів в умовах аеродрому та ремонтних підприємств, оскільки обладнання є портативним,

а напилювання виконується ручним способом. Перш за все, це ремонт деталей авіаційної техніки з алюмінієвих і магнієвих сплавів [4, 5]. Окрім вищезгаданих сплавів, отримання відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням саме низького тиску на титанові сплави, також є цікавим з точки зору впровадження технології [6, 7]. З аналізу літературних джерел встановлено, що попередні позитивні результати було отримано з використанням портативних дороговартуючих установок ХГН середнього (робочий тиск 2,5 МПа) та високого тисків (робочий тиск до 5,0 МПа).

Однією з важливих характеристик процесу ХГН є КВП. Його залежність від параметрів процесу напилювання (температури та тиску потоку, матеріалу, форми та розміру частинок порошку, дистанції та кута напилювання, типу робочого газу тощо) дозволяє

більш глибоко зрозуміти природу процесу холодного газодинамічного напилювання, і як наслідок, встановити, як ці параметри впливають на властивості покриттів.

Нажаль, ефективність процесу ХГН НТ, тобто КВП, є низькою, тому ремонт деталей потребує дуже тривалого часу та використання значної кількості порошку [8]. Тому з точки зору зменшення собівартості формування покриттів і підвищенню конкурентоспроможності технології потрібно працювати над збільшенням КВП.

КВП для процесу ХГН НТ можливо підвищити шляхом збільшення швидкостей частинок перед зіткненням з підкладкою. Реалізувати це можна збільшивши тиск і температуру потоку, що подається в сопло, забезпеченням правильної геометрії внутрішнього каналу сопла, підбором правильної фракції та форми частинок порошку та інше. Особливу увагу слід приділити правильному вмісту керамічної складової у порошковій суміші [9, 10]. Тут необхідно розуміти, що збільшення швидкостей частинок порошку має свою певну верхню межу з перевищенням якої спостерігаються негативні явища, такі як виникнення ефекту абразивного оброблення поверхні і відсутності зчеплення частинок з останньою, зниження якості покриттів (зменшення адгезії, збільшення пористості тощо).

Метою цієї роботи є встановлення залежностей впливу параметрів потоку на вході в сопло (температура і тиск), а також відстані від зрізу сопла до підкладки на КВП порошкової суміші N7-00-14 при ХГН НТ.

1. Постановка завдання

Коефіцієнт використання порошку ($K_{вп}$) зазвичай визначається як відношення приросту маси зразка $m_{пок}$ (маса покриття) до маси використаного для отримання даного покриття порошку $m_{пор}$ та виражається у відсотках [11]:

$$K_{вп} = \frac{m_{пок}}{m_{пор}} \cdot 100\% \quad (1)$$

На практиці отримати КВП рівний 100 % неможливо по ряду причин. По-перше, при ХГН зазвичай використовуються полідисперсні порошки, і тому частинки досягають різних значень швидкості, не завжди достатніх для формування покриття [12]. Крім того, профілювання надзвукових сопл для ХГН проводять для певного діапазону розмірів частинок [13]. Частинки, розмір яких значно відрізняється від розрахункового значення, мають менш сприятливі умови для закріплення на поверхні підкладки. По-друге, причиною зниження коефіцієнту використання порошку може бути менші швидкості частинок на периферії потоку, недостатніх для закріплення на підкладці. Крім того, якщо швидкість

зіткнення частинок недостатньо висока, то поверхня повинна бути самоактивована набігаючими частинками, а це означає, що перші частки завжди відскакують від поверхні підкладки [14].

Залежність швидкості частинок від великої кількості факторів, ускладнює вибір раціональних параметрів напилювання, і визначення впливу комплексних параметрів процесу ХГН на коефіцієнт використання порошку є актуальним завданням розвитку технології.

1. Експериментальна частина

1.1. Матеріали

Як порошковий матеріал у дослідженні було використано комерційно доступну порошкову суміш на основі нікелю N7-00-14. Склад і розмір фракції порошкової суміші N7-00-14: Ni (60 % мас.) – 10 мкм; Zn (10 % мас.) – 20 мкм; Al_2O_3 (30 % мас.) – 25 мкм.

В якості матеріалу підкладки було обрано титановий сплав ВТ9. Перед напилюванням зразки підлягали піскоструминному обробленню корундом фракцією 200...350 мкм.

1.2. Обладнання

Покриття було напилено за допомогою установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405 в Національному аерокосмічному університеті “Харківський авіаційний інститут” (Харків, Україна). Прискорення газового потоку з частками відбувалося з використанням стандартного надзвукового сопла Лавала установки ДИМЕТ-405 з діаметром критичного перерізу 2,7 мм і діаметром на виході 6 мм. Точка вводу порошку розташована за критичним перерізом сопла. В якості робочого газу було використано повітря. Температура та тиск повітря на вході в сопло, дистанція напилювання встановлювалися відповідно до плану експерименту. Незмінні параметри напилювання наступні: витрата порошку – 5 г/с; кількість проходів – 3 шт.

Зважування зразків до та після напилювання виконувалося за допомогою лабораторних ваг з точністю до 0,01 г.

1.3. Планування експерименту

З метою вивчення впливу параметрів процесу ХГН низького тиску на коефіцієнт використання порошку та знаходження раціональних параметрів для досягнення його максимальних значень, була проведена серія експериментів. Для отримання необхідних даних при мінімальній кількості дослідів

була використана теорія планування експерименту, а для реалізації всіх можливих комбінацій рівнів факторів, що не повторюються, було проведено повний факторний експеримент (ПФЕ).

З аналізу літературних джерел та за результатами однофакторних експериментів були виділені для подальшого дослідження наступні фактори, що впливають на коефіцієнт використання порошку: температура (T_0) і тиск (P_0) повітря на вході в сопло, а також дистанція напилування (S) (таблиця 1).

Таблиця 1
Значення рівнів та інтервалів варіювання факторів

Фактор	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	-1	0	1	
T_0 , °C	300	450	600	150
P_0 , МПа	0,7	0,85	1,0	0,15
S , мм	10	15	20	5

Проводився експеримент типу 2^3 , де число факторів $k = 3$, число рівнів $p = 2$, число дослідів $N = 8$, число повторних дослідів $n = 2$. Етапами планування і реалізації ПФЕ є: вибір параметрів оптимізації і рівнів їх варіювання; кодування факторів; складання матриці планування експерименту; рандомізація дослідів; реалізація плану експерименту; перевірка однорідності дисперсій паралельних дослідів, відтворюваності результатів; розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, їх помилок і значущості; перевірка адекватності моделі [15].

Черговість проведення дослідів була оптимізована за таблицею випадкових чисел. В якості моделі експерименту був обраний неповний поліном 3-го ступеня.

3. Результати досліджень

Згідно з розробленою програмою експерименту, були отримані зразки з покриттями з порошкової суміші N7-00-14. Результати розрахунку коефіцієнту використання порошку, отриманого в результаті експерименту, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2
Результати розрахунку коефіцієнту використання порошку

№ експ.	Параметри напилування			Середнє значення КВП, %
	T_0 , °C	P_0 , МПа	S , мм	
1	600	1,0	10	34,1
2	300	1,0	10	10,8
3	600	0,7	10	30,7
4	300	0,7	10	2,8
5	600	1,0	20	25,3
6	300	1,0	20	6,2
7	600	0,7	20	17,5

8	300	0,7	20	5,0
9	450	0,85	15	15,8
10	450	0,85	15	15,0

Залежності комбінацій досліджуваних параметрів процесу напилування на параметр оптимізації - КВП порошку N7-00-14, подано на рисунках 1–3.

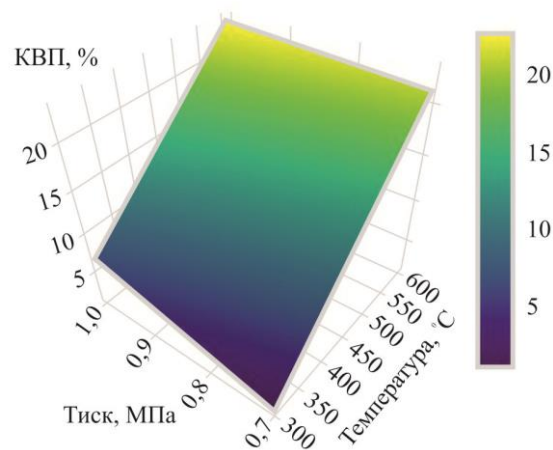


Рис. 1. Графік залежності КВП від P_0 і T_0

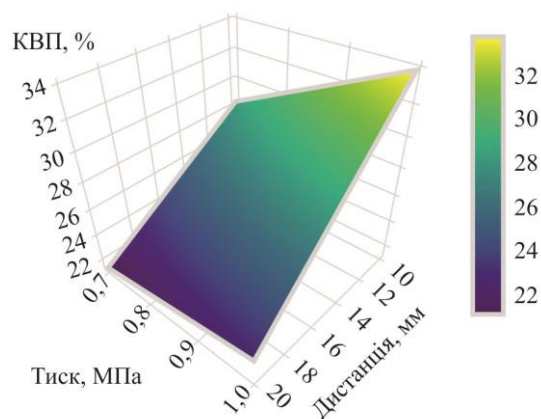


Рис. 2. Графік залежності КВП від P_0 і S

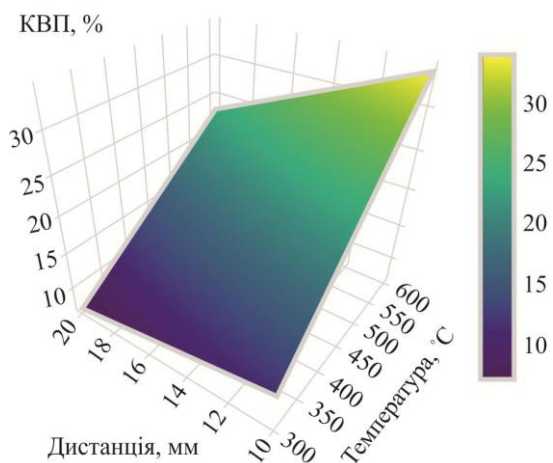


Рис. 3. Графік залежності КВП від S і T_0

Для порошкової суміші N7-00-14 збільшення температури з 300 до 600 °C приводить до збільшення КВП з 10,8 до 34,1 % при постійному тиску 1,0 МПа і дистанції напилювання 10 мм. Зміна тиску на КВП наступне: зі зростанням тиску з 0,7 до 1,0 МПа КВП змінюється з 2,8 до 30,7 % при постійній температурі 600 °C і дистанції напилювання 10 мм. Зменшення дистанції навпаки призводить до падіння КВП з 34,1 до 25,3 % при постійних температурі 600 °C і тиску 1,0 МПа.

Висновки

На основі багатофакторного планування експерименту вивчено вплив комплексних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання низького тиску, а саме температури і тиску повітря на вході в сопло, а також дистанції напилювання на коефіцієнт використання порошку N7-00-14. Встановлено, що найбільший вплив має температура повітря. За результатами експериментальних досліджень та аналізу отриманих даних побудовано залежності вибору оптимальних параметрів напилювання для досягнення максимальних значень коефіцієнту використання досліджуваного порошку, і, як наслідок, зменшення собівартості отримання покриттів.

Література

1. Champagne Jr., V. K. Introduction [Text] / V. K. Champagne Jr., O. C. Ozdemir, A. Nardi // *Practical Cold Spray*. – Cham, Switzerland : Springer. – 2021. – P. 1–25. DOI: 10.1007/978-3-030-70056-0_1.
2. Comment on 'Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray' [Text] / H. Assadi, F. Gärtner, T. Klassen, H. Kreye // *Scripta Materialia*. – 2019. – Vol. 162. – P. 512–514. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.036.
3. Schmidt, T. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition [Text] / T. Schmidt, F. Gärtner, H. Kreye // *Acta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, Iss. 3. – P. 729–742. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
4. A Repair Method for Damage in Aluminum Alloy Structures with the Cold Spray Process [Text] / X. Han, X. Sun, G. Li [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, Iss. 22. – Article No. 6957. DOI: 10.3390/ma14226957.
5. Dissimilar metal joining and structural repair of ZE41A-T5 cast magnesium by the cold spray process

[Text] / V. Champagne Jr., D. Kaplowitz, V. K. Champagne III [et al.] // *Material Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 33, Iss. 2. – P. 130–139. DOI: 10.1080/10426914.2016.1257137.

6. Volkov, A. Deposition of Titanium-Containing Coatings by Low-Pressure Cold Spraying [Text] / A. Volkov, O. Shorinov, S. Polyviyany // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering / M. Nechyporuk, V. Pavlikov, D. Kritskiy*. – ICTM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. – Springer, Cham, 2022. – Vol. 367. – P. 565–574. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_48.

7. Li., W. Solid-state cold spraying of Ti and its alloys: A literature review [Text] / W. Li, C. Cao, S. Yin // *Progress in Materials Science*. – 2020. – Vol. 110. – Article No. 100633. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100633.

8. Deposition efficiency of low pressure cold sprayed aluminum coating [Text] / G. Huang, H. Wang, X. Li [et al.] // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 33, Iss. 10. – P. 1100–1106. DOI: 10.1080/10426914.2017.1415443

9. Effect of α -Al₂O₃ on the Properties of Cold Sprayed Al/ α -Al₂O₃ Composite Coatings on AZ91D Magnesium Alloy [Text] / Y. Tao, T. Xiong, C. Sun [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 256, Iss. 1. – P. 261–266. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.08.012.

10. Deposition of fully dense Al-based coatings via in-situ micro-forging assisted cold spray for excellent corrosion protection of AZ31B magnesium alloy [Text] / Y.-K. Wei, X.-T. Luo, Y. Ge [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 806. – P. 1116–1126. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.07.279.

11. Klinkov, S. V. Measurements of cold spray deposition efficiency [Text] / S. V. Klinkov, V. F. Kosarev // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2006. – Vol. 15. – P. 364–371. DOI: 10.1361/105996306X124365.

12. Шорінов, А. В. Управление эффективностью процесса холодного напыления защитно-восстановительных покрытий на магниевые сплавы [Текст] / А. В. Шорінов, С. Е. Маркович // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 8 (152). – С. 66–73. DOI: 10.32620/akt.2018.8.10.

13. Шорінов, О. В. Влияние диаметра частинок порошку никелю на их швидкість і температуру при холодному газодинамічному напилюванні [Текст] / О. В. Шорінов, С. О. Поливиный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2021. – № 4 спецвипуск 1 (173). – С. 110–116. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.15.

14. Klinkov, S. V. Cold Spraying Activation Using an Abrasive Admixture [Text] / S. V. Klinkov,

V. F. Kosarev // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21. – P. 1046–1053. DOI: 10.1007/s11666-012-9778-6.

15. Rodrigues, M. I. *Experimental Design and Process Optimization [Text]* / M. I. Rodrigues, A. F. Emma. – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2014. – 302 p.

References

1. Champagne Jr., V. K., Ozdemir, O. C., Nardi, A. *Introduction. Practical Cold Spray*. Springer, Cham, Switzerland, Springer, 2021, pp. 1-25. DOI: 10.1007/978-3-030-70056-0_1.
2. Assadi, H., Gärtner, F., Klassen, T., Kreye, H. Comment on 'Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray'. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 162, pp. 512-514. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.036.
3. Schmidt, T., Gärtner, F., Kreye, H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, iss. 3, pp. 729-742. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
4. Han, X., Sun, X., Li, G., Huang, S., Zhu, P., Shi, C., Zhang, T. A Repair Method for Damage in Aluminum Alloy Structures with the Cold Spray Process. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 22, article no. 6957. DOI: 10.3390/ma14226957.
5. Champagne Jr., V., Kaplowitz, D., Champagne III, V. K., Howe, C., West, M. K. Dissimilar metal joining and structural repair of ZE41A-T5 cast magnesium by the cold spray process. *Material Manufacturing Processes*, 2018, vol. 33, iss. 2, pp. 130-139. DOI: 10.1080/10426914.2016.1257137.
6. Volkov, A., Shorinov, O., Polyvianyi, S. Deposition of Titanium-Containing Coatings by Low-Pressure Cold Spraying. In: Nechyporuk, M. et al. (eds). *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 367, Springer, Cham, 2022, pp. 565-574. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_48.
7. Li, W., Cao, C., Yin, S. Solid-state cold spraying of Ti and its alloys: A literature review. *Progress in Materials Science*, 2020, vol. 110, article no. 100633. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100633.
8. Huang, G., Wang, H., Li, X., Xing, L., Zhou, J. Deposition efficiency of low pressure cold sprayed aluminum coating. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, vol. 33, iss. 10, pp. 1100-1106. DOI: 10.1080/10426914.2017.1415443.
9. Tao, Y., Xiong, T., Sun, C., Jin, H., Du, H., Li, T. Effect of α -Al₂O₃ on the Properties of Cold Sprayed Al/ α -Al₂O₃ Composite Coatings on AZ91D Magnesium Alloy. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 256, iss.1, pp. 261-266. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.08.012.
10. Wei, Y.-K., Luo, X.-T., Ge, Y., Chu, X., Huang, G.-S., Li, C.-J. Deposition of fully dense Al-based coatings via in-situ micro-forging assisted cold spray for excellent corrosion protection of AZ31B magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 806, pp. 1116-1126. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.07.279.
11. Klinkov, S. V., Kosarev, V. F. Measurements of cold spray deposition efficiency. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, vol. 15, pp. 364-371. DOI: 10.1361/105996306X124365.
12. Shorinov, O. V., Markovych, S. E. Upravlenie effektivnost'yu protsessa kholodnogo napyleniya zashchitno-vosstanovitel'nykh pokrytii na magnievyeh splavy [Cold spray deposition efficiency control of protective and restorative coatings on magnesium alloys]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no. 8(152), pp. 66-73. DOI: 10.32620/akt.2018.8.10.
13. Shorinov, O. V., Polyvianyi, S. O. Vplyv diametru chastynok poroshku nikelyu na yikh shvydkist' i temperaturu pry kholodnomu hazodynamichnomu napylyuvanni [Influence of particle size of nickel powder on their velocity and temperature in cold spraying]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4sup1 (173), pp. 110-116. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.15.
14. Klinkov, S. V., Kosarev, V. F. Cold Spraying Activation Using an Abrasive Admixture. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, pp. 1046-1053. DOI: 10.1007/s11666-012-9778-6.
15. Rodrigues, M. I., Emma, A. F. *Experimental Design and Process Optimization*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press Publ., 2014. 302 p.

Надійшла до редакції 8.04.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECT OF COLD SPRAYING PARAMETERS ON POWDER USAGE RATE

Oleksandr Shorinov, Anatoliy Dolmatov, Serhii Polyvianyi

The effect of temperature and air pressure at the supersonic nozzle inlet, as well as the distance from the nozzle outlet to the surface of the substrate (stand-of-distance) on the powder usage rate of nickel-based powder in low

pressure cold gas-dynamic spraying (inlet pressure up to 1.0 MPa) was analyzed. One of the most important parameters characterizing the deposition efficiency of the spraying process is the powder usage rate. This parameter is the ratio of the mass of the coating to the mass of the powder used to obtain this one. For the process of cold gas-dynamic spraying, implemented on the equipment using air pressure up to 1.0 MPa, the main disadvantage is the relatively low-powder usage rate. To increase it (but not limited to it), a ceramic component, such as alumina Al_2O_3 , is added to pure metal powders. In this study a nickel-based powder mixture, in which the content of Al_2O_3 powder is about 10% mass., was used. Titanium alloy plates BT9 were used as the substrate material. Based on the multifactor planning of the experiment, the effect of the complex parameters of the low-pressure cold gas-dynamic spraying on the powder usage rate was studied. After the coating deposition according to the matrix of the experiment, the samples with coatings were weighed. According to the known mass of the samples before spraying and the increase in their mass, the powder usage rate was calculated. From the analysis of the obtained statistical data, the dependence of the effect of the complex parameters of the deposition process on the powder usage rate was developed. The maximum value of the powder usage rate were obtained up to 35 %. It was confirmed that the air temperature at the nozzle inlet has the greatest effect on the above-mentioned parameter. The explanation of this is the increase in gas flow temperature and velocity, and as a result, the increase in the velocity and temperature of the powder particles in this flow. Higher values of the velocity and temperature of the particles lead to more intense plastic deformation of particles during impact with the substrate and their adhesion to it.

Keywords: powder mixture; full factorial experiment; coating; deposition efficiency.

Шорінов Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доц. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Долматов Анатолій Іванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Поливняний Сергій Олександрович – заступник директора з виробництва нових виробів АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Oleksandr Shorinov – PhD, Assistant Professor of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679, Scopus Author ID: 57223082183.

Anatoliy Dolmatov – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dep. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.dolmatov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7943-2890, Scopus Author ID: 6603712273.

Serhii Polyvianyi – Deputy Director for the development of new products at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: sergeypolyvianij@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-1353, Scopus Author ID: 57224730128.