

УДК 621.452.32.03:669.295:621.793.7

doi: 10.32620/aktt.2025.3.06

О. В. ШОРИНОВ, С. О. ПОЛИВЯНИЙ, Н. В. САВЧЕНКО, Р. С. ПАТОВ

*Національний аерокосмічний університет**«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

МІКРОСТРУКТУРА ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ ХОЛОДНИМ ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЮВАННЯМ

Предметом вивчення у статті є закономірності впливу режимів холодного газодинамічного напилювання на характеристики покриттів. **Метою** роботи є відпрацювання призначених режимів холодного газодинамічного напилювання, що виконується з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, та визначення основних характеристик покриттів (мікроструктури, адгезійної міцності та мікротвердості) з порошку $Ni+Al_2O_3$ на титановому сплаві. **Завдання:** дослідити формування комплексу характеристик покриттів (мікроструктури, адгезійної міцності та мікротвердості) на обраних режимних параметрах процесу холодного газодинамічного напилювання. **Методи дослідження.** Дослідження особливостей мікроструктури покриттів і межі контакту покриття з підкладкою виконано методами оптичної мікроскопії на підготовлених поперечних мікрошліфах зразків з покриттями. Дослідження адгезійної міцності та мікротвердості покриттів виконано методами інженерної механіки за стандартними методиками визначення характеристик газотермічних покриттів. **Результати.** Отримано середні значення адгезійної міцності покриттів з порошку $Ni+Al_2O_3$ на титановому сплаві BT9 склали 30,2 МПа. Відповідно до висунутих вимог щодо мінімально необхідних значень адгезійної міцності газодинамічних покриттів (15 МПа), отриманні результати забезпечують оброблюваність їх різанням для досягнення заданих параметрів точності та шорсткості поверхні з покриттям. Отримано значення мікротвердості покриттів з порошку $Ni+Al_2O_3$ на титановому сплаві BT9 по товщині покриття. Середні значення мікротвердості склали від 190 HV до 290 HV, що перевищують необхідні 180 HV. Досліджено мікроструктуру покриттів з порошку $Ni+Al_2O_3$ на титановому сплаві BT9. Наскрізної пористості, дефектів, відшарування покриття від поверхні не виявлено. **Висновки.** За результатами проведених експериментальних досліджень підтверджено можливість використання запропонованих режимних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання, що реалізується з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, для нанесення захисних і відновлювальних покриттів з порошку $Ni+Al_2O_3$ на деталях з титанових сплавів із забезпеченням заданих вимог щодо якісних і кількісних характеристик.

Ключові слова: покриття; композиційний порошок; поверхневий шар; мікроструктура; механічні властивості; адгезія; ресурс; титанові сплави.

Вступ

Титанові сплави широко застосовуються для виробництва деталей газотурбінних двигунів (ГТД) [1–3]. Матеріали сучасних авіаційних ГТД повинні мати високу жароміцність, жаростійкість і жорсткість при мінімальній масі.

У двигунах сучасних реактивних літаків кількість використання титану складає від 15 % до 35 % від загальної маси. Така кількість титану забезпечує суттєве зменшення маси двигуна, що, у свою чергу, зменшує загальну масу конструкції літака. За останні 60 років зберігається тенденція збільшення відсотку маси титанових деталей від загальної маси ГТД – від 5 % до 10 % на початку, і до 40 % в сучасних конструкціях двигунів [4, 5].

Серед основних недоліків функціональних конструкційних властивостей титанових сплавів ви-

готовлення деталей є низькі характеристики матеріалів при роботі на тертя та знос. Низькі антифрикційні властивості через високий коефіцієнт тертя є одним із суттєвих недоліків титанових сплавів [6]. Тому деталі механізмів і машин, що працюють в умовах інтенсивного тертя, стають непридатними раніше, ніж інші складові ланки конструкції і вся конструкція в цілому виявляється непрацездатною. Погані антифрикційні властивості, зумовлені налипанням титану на багато матеріалів, значно ускладнюють його використання у вузлах тертя, а титан у парі з титаном практично не може працювати на тертя. Досі не знайдено матеріалу, що задовільно працює у парі з незмішаним титаном [7]. Дослідження показують, що титан та його сплави при роботі з іншими металами або переносяться (налипають) на поверхню більш твердого металу, після чого тертя протікає як у парі титан-титан, або на поверхню титану відбувається пе-



ренесення м'якшого металу і тертя протікає як в одній парі з м'якого металу. У таких парах спостерігається і взаємне перенесення [8, 9].

Холодне газодинамічне напилювання (ХГН) є перспективним методом нанесення захисних і відновлювальних покриттів. На відміну іншим газотермічним методам, головною особливістю ХГН є утворення покриттів з частинок порошку в твердій фазі, без плавлення, за рахунок їх високої кінетичної енергії при зіткненні [10]. Відсутність значного температурного впливу на матеріал деталі, дозволяє використовувати метод для нанесення покриттів на алюмінієві, магнієві та титанові сплави [11, 12].

Однак широкому впровадженню методу у практику авіадвигунобудування та ремонту заважає відсутність системних досліджень процесу формування покриттів на титанові сплави, недостатня вивченість закономірностей впливу режимних параметрів напилювання, відсутність даних щодо вибору оптимальних параметрів процесу для забезпечення надійної експлуатації деталей з покриттями в поєднанні з високою ефективністю процесу їх напилювання.

При розробленні технологічних рекомендацій з напилювання, практичний інтерес представляє вивчення впливу параметрів процесу на властивості покриттів. Незважаючи на значну кількість наукових робіт з дослідження закономірностей впливу параметрів процесу на властивості покриттів, відсутні узагальнюючі дані щодо впливу режимів холодного газодинамічного напилювання низького тиску на кількісні та якісні характеристики покриттів, а також відсутні систематичні дослідження з розроблення технологічних рекомендацій з нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням низького тиску на титанові сплави.

Метою роботи є відпрацювання призначених режимів холодного газодинамічного напилювання, що виконується з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, та визначення основних характеристик покриттів (мікроструктури, адгезійної міцності та мікротвердості) з порошку $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ на титановому сплаві.

1. Постановка задачі дослідження

Одними з основних характеристик якості газотермічних покриттів, зокрема і холодного газодинамічного напилювання, що визначають можливість використання виробів з покриттями та забезпечують високі експлуатаційні показники, є адгезійна міцність, мікротвердість та мікроструктура.

Обов'язковим етапом розроблення технології нанесення захисних і відновлювальних покриттів є відпрацювання призначених режимів напилювання та дослідження кількісних та якісних характеристик

отриманих покриттів. Проведення комплексу експериментальних досліджень на зразках-свідках, виготовлених з того ж самого матеріалу, що і деталь, та подальшого аналізу отриманих результатів на відповідність встановленим вимогам до покриттів, дозволяє зробити висновок про можливість впровадження технології у виробничий процес.

Головними критеріями, що висуваються до газодинамічних покриттів для їх використання з метою забезпечення підвищених експлуатаційних характеристик на етапі виготовлення деталей або відновлювальному ремонті для подовження ресурсних показників, є:

- адгезійна міцність, мінімальні значення якої встановлено не менше 15 МПа;
- мікротвердість покриттів не менше 180 HV;
- відсутність наскрізної пористості покриття, відшарування його від основи та інших дефектів в структурі та на межі поділу покриття-підкладки.

2. Обладнання, матеріали та методики експериментальних досліджень

Для напилювання покриттів в дисертаційній роботі було використано установку для холодного газодинамічного напилювання ДИМЕТ-405, що працює з робочим тиском повітря до 1,0 МПа. Зовнішній вигляд установки показано на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд установки ХГН ДИМЕТ-405

В якості порошкового матеріалу було обрано комерційно доступну метал-матричну композиційну порошкову суміш на основі нікелю $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 2).

Покриття було напилено на зразки з титанового сплаву ВТ9 за ОСТ 1 90013-81, попередня обробка яких перед напилюванням полягала в струменево-абразивному обробленні електрокорундом нормальним 14А фракцією F80.

Режими напилювання покриттів наведено в таблиці 1.

Експериментальне дослідження характеристик покриттів проводилося з використанням стандартних методик та сучасного обладнання, зокрема:

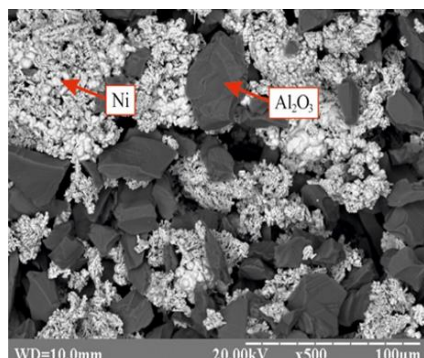


Рис. 2. Мікрознімок та хімічний склад порошкової суміші Ni+Al₂O₃

Таблиця 1

Режими напилювання покриттів

Параметр	Значення
Тиск повітря, МПа	0,9
Температура повітря, °C	550
Витрата порошку, г/с	0,6
Дистанція напилювання, мм	15

– металографічні дослідження (мікроструктура, товщина шару покриття, межа поділу покриття та підкладки) проводили з використанням оптичного інвертованого мікроскопу ZEISS Axio Observer D1m, оснащеного системою автоматизованого аналізу зображення;

– підготовка поперечних мікрошліфів покриттів для металографічного аналізу включала вирізання зразків за допомогою прецизійного відрізного верстату Bühler IsoMet 2000, їх монтування в епоксидній смолі в Bühler SimpliMet 2000, шліфування і полірування в шліфувально-полірувальному верстаті Bühler EcoMet 3;

– мікротвердість зразків визначали за допомогою мікротвердоміра АМН55 за ДСТУ ISO 6507-1:2007;

– визначення адгезійної міцності покриттів проводилося клейовим методом на розривній машині за ДСТУ 2639-94 з використанням клею ВК9 за ОСТ В 84-2081-83.

3. Результати

3.1. Результати досліджень адгезійної міцності

Покриття з порошку Ni + Al₂O₃ було напилено на підготовлені зразки циліндричної форми з титанового сплаву ВТ9 з використанням установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405.

На рис. 3 наведено деякі зразки з покриттями після проведення досліджень адгезійної міцності в розривній машині.

За результатами розрахунків середнього значення адгезійної міцності нікелевого покриття з порошку Ni + Al₂O₃ на титановому сплаві ВТ9 встановлено, що обрані режими напилювання та спосіб підготовки поверхні для нанесення покриття забезпечують досягнення величини в 30,2 МПа. Отриманий результат задовольняє вимогу щодо мінімально допустимого значення адгезійної міцності газодинамічного покриття 15 МПа.



Рис. 3. Зразки з покриттями після дослідження адгезійної міцності

3.2. Результати досліджень мікроструктури

Для аналізу мікроструктури були напилені покриття з порошкової суміші Ni+Al₂O₃ на плоскі пластини з титанового сплаву ВТ9 на режимах, наведених в таблиці 1.

На рис. 4 показано фотографія мікроструктури покриття Ni+Al₂O₃ при збільшенні 200х.

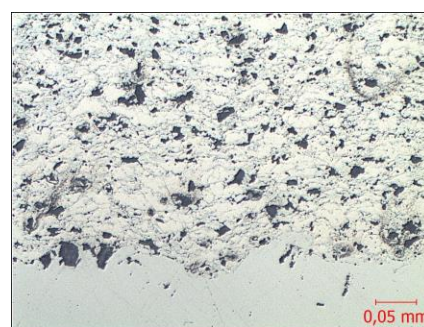


Рис. 4. Мікроструктура покриття з порошку Ni + Al₂O₃ на титановому сплаві ВТ9

З аналізу знімку, наведеного на рис. 4, можна зробити висновок, що в покритті відсутні тріщини й відшарування від поверхні підкладки. Виявлено наявність щільного контакту матеріалу покриття з підкладкою. Окрім того, в покриттях важко відслідкувати межі окремих шарів, що забезпечує достатньо високі значення когезійної міцності покриттів. Товщину окремих шарів візуально визначити неможливо.

Двокомпонентні покриття системи нікель-оксид алюмінію складаються з двох структурних складових

світлого та темного кольорів. Структурні складові світлого кольору розділені на окремі фрагменти різного розміру тонкими сірими лініями (межами). При відносно малих збільшеннях (200х) за допомогою звичайної оптичної металографії можна зафіксувати будову напиленого покриття, характерну для холодного газодинамічного напилювання низького тиску – витягнуті деформовані в результаті зіткнення частинки нікелю, розташовані паралельно підкладці. Темні включення неправильної форми з гострими вершинами – частинки корунду, які достатньо рівномірно розподілені в покритті. Також внаслідок бомбардування частинками корунду утвореного металевому шару покриття відзначається сильніша деформація частинок нікелю. В зоні контакту спостерігається більш рихла дрібнозерниста структура.

Аналіз межі покриття-підкладки показує наявність механічного зчеплення анкерного типу. Формування шорсткої поверхні підкладки перед напилюванням струминно-абразивним обробленням позитивно впливає на збільшення площі контакту покриття з підкладкою і, відповідно, адгезії.

3.3. Результати досліджень мікротвердості

Отримані середні значення мікротвердості покриттів по товщині, починаючи від підкладки, наведено на рис. 5.

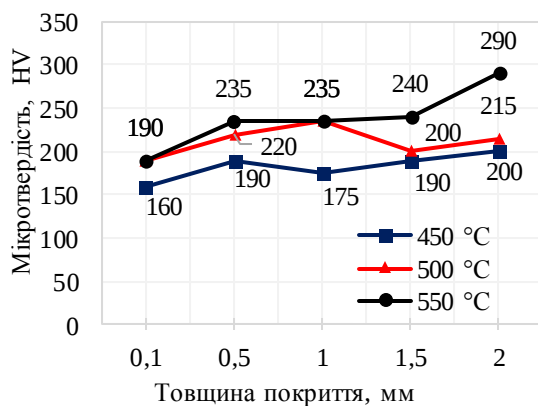


Рис. 5. Мікротвердість покриттів з порошку Ni + Al₂O₃

Отримані значення відповідають мікротвердості покриттів, отриманих з порошкових композиційних сумішей метал + керамічна складова, які використовуються для холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском повітря до 1,0 МПа.

Висновки

Досліджено комплекс основних характеристик покриттів, отриманих холодним газодинамічним напилюванням з порошку Ni + Al₂O₃ на титановому сплаві ВТ9. Отримано такі результати:

1. Середні значення адгезійної міцності покриттів склали 30,2 МПа, що перевищує встановлені

вимоги щодо мінімальних значень (15 МПа). Отримана адгезійна міцність покриттів дозволяє їх механічне оброблення для забезпечені заданої точності та шорсткості поверхні з покриттям.

2. Отримано значення мікротвердості покриттів по товщині шару покриття від підкладки до поверхні покриття. Суттєвих змін мікротвердості по товщині покриття не спостерігалось. Так, на відстані 0,5 мм від межі розподілу мікротвердість покриття становила 235 HV, а на відстані 2,0 мм – 290 HV.

3. Досліджено мікроструктуру покриттів та межу розподілу покриття-підкладка – пор, тріщин, відшарувань не виявлено. Дослідження структури покриттів по товщині показало, що частинки корунду рівномірно розподілені в шарі покриття. Покриття суцільне, без тріщин і дефектів, з щільним контактом між частинками нікелю.

Отримані результати підтверджують можливість застосування порошку Ni + Al₂O₃ для формування покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **О. В. Шорінов**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **Н. В. Савченко**; приготування зразків – **С. М. Нижник**; проведення досліджень – **О. В. Шорінов, С. О. Поливяний**; аналіз результатів та висновки – **О. В. Шорінов**; написання та редагування – **О. В. Шорінов, Р. С. Іпатов**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису

Література

1. *Studies on titanium alloys for aerospace application [Text] / A. Gomez-Gallegos, P. Mandal, D. Gonzalez, & [et al.]// Defect and diffusion forum. –*

2018. – Vol. 385. – P. 419–423. DOI: [10.4028/www.scientific.net/ddf.385.419](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.385.419).

2. Santhosh, R. Recent developments in heat treatment of beta titanium alloys for aerospace applications [Text] / R. Santhosh, M. Geetha, & M. Nageswara Rao // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2016. – Vol. 70, no. 7. – P. 1681–1688. DOI: [10.1007/s12666-016-0985-6](https://doi.org/10.1007/s12666-016-0985-6).

3. Pushp, P. Classification and applications of titanium and its alloys [Text] / Pallavi Pushp, S. M. Dasharath, & C. Arati // Materials today: proceedings. – 2022. – Vol. 54, Part 2. – P. 537–542. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.01.008](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.008).

4. Єпіфанов, С. В. Конструкція авіаційних газотурбінних двигунів [Текст] / С. В. Єпіфанов, В. С. Чигрин. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2023. – 320 с.

5. Павленко, Д. В. Розвиток наукових основ і удосконалення процесів виготовлення деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації: дис. д-ра техн. наук: 05.03.05 [Текст] / Д. В. Павленко. – Запоріжжя: Нац. ун-т «Запорізька політехніка», 2021. – 373 с.

6. Духота, О. І. Проблемні питання використання титанових сплавів у вузлах тертя авіаційної техніки [Текст] / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, & В. Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – Київ: НАУ, 2008. – Вип. 49. – Т. 1. – С. 14–26.

7. Дмитріченко, М. Ф. Триботехніка та основа надійності машин [Текст] / М. Ф. Дмитріченко, Р. Г. Мнацаканов, & О. О. Мікосянчик. – Київ: ІНФОРМАВТОДОР, 2006. – 216 с.

8. Дворук, В. І. Трибофізика [Текст] / В. І. Дворук, & В. А. Войтов. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – 2014. – 374 с.

9. Ahmed R. Book Chapter: Friction and Wear of Titanium Alloys [Text] / R. Ahmed, H. de Villiers-Lovelock // In: Friction, Lubrication, and Wear Technology / ed. G. E. Totten. – ASM International, 2017. – Vol. 18. – P. 502–508. DOI: [10.31399/asm.hb.v18.a0006436](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v18.a0006436).

10. Current implementation status of cold spray technology: a short review [Text] / W. Sun, X. Chu, H. Lan, & [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31, № 4. – P. 848–865. DOI: [10.1007/s11666-022-01382-4](https://doi.org/10.1007/s11666-022-01382-4).

11. Дослідження впливу температури газу процесу холодного газодинамічного напилювання на адгезійну міцність нікелевмісних покриттів [Текст] / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний, К. & Б. Балущок // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2023. – № 4, спецвипуск 2 (190). – С. 82–88. DOI: [10.32620/aktt.2023.4sup2.11](https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4sup2.11).

12. Шорінов, О. В. Експериментальне дослідження впливу параметрів газодинамічного напилювання на коефіцієнт використання порошку [Текст] / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, & С. О. Поливняний // Авіаційно-космічна техніка і

технологія. – 2022. – № 4, спецвипуск 2 (182). – С. 123–128. DOI: [10.32620/aktt.2022.4sup2.19](https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.19).

References

1. Gomez-Gallegos, A., Mandal, P., & Gonzalez, D. Studies on titanium alloys for aerospace application. Defect and diffusion forum, 2018, vol. 385, pp. 419–423. DOI: [10.4028/www.scientific.net/ddf.385.419](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.385.419).

2. Santhosh, R., Geetha, M., & Nageswara Rao, M. Recent developments in heat treatment of beta titanium alloys for aerospace applications. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, vol. 70, no. 7, pp. 1681–1688. DOI: [10.1007/s12666-016-0985-6](https://doi.org/10.1007/s12666-016-0985-6).

3. Pallavi Pushp, Dasharath, S. M., & Arati C. Classification and applications of titanium and its alloys Materials today: proceedings, 2022, vol. 54, no 2, pp. 537–542. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.01.008](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.008).

4. Epifanov, S. V., & Chygryn, V. S. Konstrukciya aviatsijnyx gazoturbinnix dyvguniv [Construction of aviation gas turbine engines]. Kharkiv: «NAU «KHAi», 2023. 320 p. (In Ukraine)

5. Pavlenko, D. V. Rozvytok naukovykh osnov i udoskonalennia protsesiv vyhotovlennia detaley hazoturbinnnykh dehunyv z poroshkovykh materialiv iz zastosuvanniam intensyvnoi plastychnoi deformatsii [Development of scientific foundations and improvement of manufacturing processes of gas turbine engine parts from powder materials using intensive plastic deformation]. Doctor of Technical Sciences dissertation, specialty 05.03.05 – Processes and machines for pressure treatment. Zaporizhzhia: Nat. Univ. “Zaporizka Politehnika”, 2021. 373p. (In Ukraine).

6. Duhota, O. I., Kindrachuk, M. V., & Labunets, V. F. Problemi pytannia vykorystannia tytanovykh splaviv u vuzlakh tertia aviatsiinoi tekhniki [Problematic Issues of Use of Titanium Alloys in Friction Units of Aviation Engineering]. Problemy tertia ta znoshuvannia: nauk.-tekhn. zb., Kyiv: NAU, 2008, iss. 49(1), pp. 14–26. (In Ukraine).

7. Dmytrichenko, M. F., Mnatsakanov, R. G., & Mikosyanchyk, O. O. Trybotehnika ta osnova nadiynosti mashyn [Tribotechnics and basics of machine reliability]. Kyiv, INFORMAVTODOR, 2006. 216p. (In Ukraine).

8. Dvoruk, V. I. & Voitov, V. A. Trybofizyka [Tribophysics]. Kharkiv, KhNTUSG im. Petra Vasylenka, 2014, 374 p. (In Ukraine)

9. Ahmed, R. & de Villiers-Lovelock, H. Friction and wear of titanium. Friction, Lubrication, and Wear Technology, 2017, pp. 502–508. DOI: [10.31399/asm.hb.v18.a0006436](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v18.a0006436).

10. Sun, W., Chu, X., Lan, H., & et al. Current implementation status of cold spray technology: a short review. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, vol. 31(4), pp. 848–865. DOI: [10.1007/s11666-022-01382-4](https://doi.org/10.1007/s11666-022-01382-4).

11. Shorinov, O. V., Dolmatov, A. I., Polyvianyi, S. O. & Balushok, K. B. Doslidzhennia vplyvu temperatury hazu protsesu kholodnoho hazodynamichnoho napylenia na adheziinu mitsnist nikelvmisnykh pokrytyv [Study of the effect of the gas temperature of the cold gas dynamic spraying process on the adhesion strength of

nickel-containing coatings]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 4sup2 (190), pp. 82–88. DOI: [10.32620/aktt.2023.4sup2.11](https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4sup2.11). (In Ukraine).

12. Shorinov, O. V., Dolmatov, A. I. & Polyviany, S. O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu parametrov hazodynamichnoho napylenia na koefitsient

vykorystannia poroshku [Experimental study of effect of cold spraying parameters on powder usage rate]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4sup2 (182), pp. 123–128. DOI: [10.32620/aktt.2022.4sup2.19](https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.19). (In Ukraine).

Надійшла до редакції 10.04.2025, розглянута на редколегії 20.05.2025

MICROSTRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF NICKEL COATINGS DEPOSITED ON TITANIUM ALLOY BY COLD SPRAYING

Oleksandr Shorinov, Sergii Polyviany, Nina Savchenko, Roman Ipatov

The subject of this research is the dependence of the influence of cold spraying regimes on coating characteristics. This **paper aims** to approve the recommended cold-spraying regimes, which operate at an air pressure of up to 1.0 MPa, and to determine the main characteristics of coatings (microstructure, adhesion strength and microhardness) from Ni+Al₂O₃ powder on titanium alloy. **The task**: to investigate the formation of a complex of coating characteristics (microstructure, adhesion strength and microhardness) under selected operating regimes of the cold spraying process. **Research methods**. The study of the features of the microstructure of coatings and the contact surface of the coating with the substrate was performed by optical microscopy methods on prepared transverse microsections of samples with coatings. The study of the adhesion strength and microhardness of coatings was conducted by engineering mechanics methods using standard methods for evaluating thermal spray coatings. **Results**. The average values of the adhesion strength of Ni+Al₂O₃ powder coatings on VT9 titanium alloy were 30.2 MPa. Following the requirements for the minimum required values of the adhesion strength of cold spray coatings (15 MPa), the obtained results ensure their machinability by cutting to achieve the specified parameters of accuracy and roughness of the coated surface. The microhardness values of Ni+Al₂O₃ powder coatings on VT9 titanium alloy were obtained along the coating thickness. The average microhardness values were from 190 HV to 290 HV, exceeding the required 180 HV. The microstructure of Ni+Al₂O₃ powder coatings on VT9 titanium alloy was investigated. No through porosity, defects, or delamination of the coating from the surface were detected. **Conclusions**. The results of the conducted experimental studies confirmed the possibility of using the proposed operating regimes of the cold spraying process, which is performed with a working air pressure of up to 1.0 MPa, for applying protective and restorative coatings of Ni+Al₂O₃ powder on parts made of titanium alloys while ensuring the specified requirements for qualitative and quantitative characteristics.

Keywords: coating; composite powder; surface layer; microstructure; mechanical properties; adhesion; service life; titanium alloys.

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

Поливяний Сергій Олександрович – заступник директора з виробництва авіаційних двигунів – начальник виробничого управління АТ «Мотор Січ»; Запоріжжя; Україна.

Савченко Ніна Валеріївна – канд. фіз.-мат. наук, доц., зав. каф. вищої математики та системного аналізу, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Іпатов Роман Сергійович – асп. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleksandr Shorinov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aircraft Engines Manufacturing Technology, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,

e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679, Scopus Author ID: 57223082183.

Sergii Polyviany – Deputy Director for Manufacturing of Aircraft Engines - Head of Manufacturing Department at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: sergeypolyvanij@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-1353, Scopus Author ID: 57224730128.

Nina Savchenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor; Head of the Department of Higher Mathematics and System Analysis, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: n.savchenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-8144-9368, Scopus Author ID: 56421771100.

Roman Ipatov – PhD Student of the Department of Aircraft Engines Manufacturing Technology of National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,

e-mail: r.s.ipatov@khai.edu, ORCID: 0009-0007-3620-7897.