

УДК 621.793.71:620.179.4

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.11

О. В. ШОРИНОВ, А. І. ДОЛМАТОВ, С. О. ПОЛИВЯНИЙ, К. Б. БАЛУШОК

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна² АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗУ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ НА АДГЕЗІЙНУ МІЦНІСТЬ НІКЕЛЕВМІСНИХ ПОКРИТТІВ

Предмет дослідження – вплив параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання низького тиску на адгезійну міцність покриттів. **Метою** роботи є забезпечення максимальних значень адгезійної міцності нікелевмісних покриттів, отриманих холодним газодинамічним напилюванням, шляхом керування температурою газу на вході в сопло. **Завдання:** дослідити вплив температурного режиму роботи установки ДИМЕТ-405 на адгезійну міцність покриттів, отриманих з порошкової суміші $Ni+Zn+Al_2O_3$ при сталих інших параметрах напилювання. **Методи дослідження.** Експериментальне дослідження адгезійної міцності проводилося на розрив клейовим методом відповідно до ДСТУ 2639-94. В якості порошкового матеріалу використано метал-матричну композиційну порошкову суміш $Ni+Zn+Al_2O_3$. В якості матеріалу підкладки було обрано титановий сплав ВТЗ-1. Напилювання покриттів проводилося за допомогою установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405. Регулювання температурою на вході в сопло виконувалося шляхом вмикання необхідного температурного режиму на панелі керування обладнанням. Інші режими напилювання залишалися незмінними в процесі отримання покриттів. **Результати.** Встановлено, що зі збільшенням температури газу в соплі, спостерігається зростання значень адгезійної міцності покриттів в середньому з 9,5 МПа до 28,7 МПа. Це може бути пояснено тим, що збільшення температури газу приводить до зростання швидкості газового потоку і, відповідно, частинок порошку, що знаходяться в цьому потоці. При зіткненні з підкладкою більші значення швидкості частинок позитивно впливають на процес їх деформування, заповнення пор, ущільнення шарів покриття, і вресити, підвищення адгезійної та когезійної міцності. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримано залежності впливу температури газу на вході в сопло при холодному напилюванні низького тиску на адгезійну міцність покриттів з порошкової суміші $Ni+Zn+Al_2O_3$, отриманих на підкладках з титанового сплаву ВТЗ-1. **Висновки.** Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що отримані залежності адгезійної міцності від температури газу можуть бути використані при виборі режимів холодного газодинамічного напилювання відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів, зокрема в авіадвигунобудуванні для усунення експлуатаційних дефектів у вигляді зношених поверхонь та механічних пошкоджень.

Ключові слова: адгезія; зчеплення; порошок; відновлювальні покриття; режими напилювання; когезія.

Вступ

Холодне газодинамічне напилювання (ХГН) є одним з методів нанесення покриттів і в окремих випадках має переваги над традиційними методами газотермічного напилювання, а саме відсутність значного температурного впливу на поверхню для напилювання, окислювання порошкового матеріалу, фазових та структурних перетворення в поверхневих шарах деталей та самому покритті тощо [1]. Це дозволило технології ХГН зайняти свою нішу в авіаційній галузі для напилювання покриттів на алюмінієвих [2] і магнієвих [3] сплавах. Великий інтерес представляє пошук нових рішень з напилювання захисних і відновлювальних покриттів на деталі з титанових сплавів.

Наразі відомі позитивні результати з формування гомогених покриттів на титанових сплавах з використанням установок ХГН високого тиску [4]. В таких установках в якості робочого газу використовується гелій під високим тиском – до 50 МПа, а робочі температури сягають 900 °С. Проте висока вартість такого обладнання і собівартість отримання покриттів не завжди є економічно доцільними та обґрунтованими. В такому випадку представляє інтерес використання холодного напилювання низького тиску. В якості робочого газу в них використовується стиснене повітря (до 1,0 МПа), з температурою до 650 °С. Таке обладнання є більш дешевим, простим в експлуатації та доступним. Проте має певні недоліки: обмежений спектр матеріалів порошків для напилювання, низький коефіцієнт використання порошку,

нижчі значення характеристик покриттів в порівнянні з такими, що отримані за допомогою систем високого тиску тощо.

Окремої уваги заслуговує дослідження процесу утворення покриттів методом ХГН з сумішей, що містять крихкі частинки (наприклад, оксиди, карбіди). Інтерес пов'язаний як з можливістю отримання нових унікальних властивостей покриттів, так і з розширенням (або поглибленням) знань про природу ХГН, оскільки звичайні теорії, побудовані на пластичності частинок, в даному випадку не можуть бути застосовані. Окрім того, ерозійно-адгезійна конкуренція тут проявляється найбільш сильно.

Відомо, що додавання керамічних частинок до металевої матриці дозволяє забезпечити властивості покриттів, які перевищують за показниками такі, що отримані лише з однієї металевої фази [5].

Можливість отримання покриттів з тих чи інших порошкових матеріалів при холодному газодинамічному напилюванні, а також забезпечення якості цих покриттів, в значній мірі залежать від досягнення частинками необхідних значень температури та швидкості в момент зіткнення з підкладкою. Температура газу в процесі напилювання є одним з головних технологічних параметрів, що впливає на температурно-швидкісні характеристики процесу. В роботі [6] показана залежність швидкості частинок нікелю і корунду в каналі надзвукового сопла для ХГН, розрахунки яких виконано за допомогою аналітичної моделі. Схожі результати отримано в роботі [7], дослідження параметрів частинок в якій проводилося шляхом комп'ютерного моделювання.

Параметри напилювання і характеристики порошків впливають на ступінь пластичної деформації частинок металу. Для кожного металу існує так зване «вікно напилювання» – діапазон швидкостей в якому можливе його напилювання. Цей діапазон обмежений нижнім значенням критичної швидкості V_{crit} і верхнім граничним значенням V_{eg} , при якому спостерігається ерозія поверхні [1]. Пластичне деформування частинки при зіткненні приводить до утворення металургійних і механічних зв'язків з утворенням щільного шару покриття.

Аналіз літературних джерел з вибору матеріалів для напилювання методом ХГН показав, що при використанні метал-матричних композиційних порошків їх фазовий і структурний склад в покритті не змінюється. Вище було показано, що при додаванні керамічних частинок до матричної основи спостерігається покращення властивостей покриттів. Окрім того, додавання частинок кераміки дозволяє підвищити ефективність напилювання, тобто забезпечити більші значення коефіцієнту використання порошку, як показано в роботі [8] при дослідженні процесу напилювання покриттів на основі нікелю.

Оптимізація мікроструктури покриттів, їх фізико-механічні властивості, режимів напилювання, зазвичай проводиться для кожного порошку окремо, в більшості випадків експериментальним шляхом. Цей процес потребує систематичних змін режимів напилювання та аналізу покриттів, що потребує великих затрат часу і засобів. Процес оптимізації якості покриттів за одним (або декількома) показниками є індивідуальним для кожного окремого порошкового матеріалу та матеріалу підкладки, і залежить від конкретних умов та параметрів напилювання, стану поверхневого шару основи, тощо.

Отриманні в цьому дослідженні результати в подальшому можуть бути використанні для розроблення технологічних рекомендацій з напилювання відновлювальних покриттів на деталі з титанових сплавів при ремонті зношених поверхонь та подовженні їх ресурсу.

Постановка задачі

Метою роботи є забезпечення значень адгезійної міцності нікелевмісних покриттів відповідно існуючих вимог, що висуваються до покриттів, нанесених холодним газодинамічним напилюванням, шляхом вибору правильних режимів роботи.

З аналізу літературних джерел і попередніх досліджень авторів встановлено, що найбільший вплив на процес холодного напилювання має температура газу на вході в сопло. Більше того, цей технологічний параметр є простим з точки зору керування ним в процесі напилювання. Вибір необхідних значень температури виконується шляхом переключання регулятора на панелі керування установки холодного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405 (рис. 1), яка була використана для нанесення покриттів в цьому дослідженні.



Рис. 1. Зовнішній вигляд установки холодного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405

Установка має п'ять температурних режимів напилювання (1–5), значення яких змінюється в діапазоні приблизно від 200 °С до 600 °С при повному тиску повітря 0,9 МПа. Працює установка наступним

чином. Стиснене повітря з зовнішньої магістралі через фільтр-регулятор подається до напилувача. Робочий тиск встановлюється за манометром. При робочому тиску повітря нагрівач автоматично включається. У нагрівачі повітря нагрівається до робочої температури і подається в надзвукове сопло. Температура повітря на виході нагрівача перед подачею в сопло контролюється термопарою в напилувачі та підтримується на заданому рівні системою управління. Подача порошку живильником включається після виходу напилувача на робочий температурний режим відповідною кнопкою напилувача. Повітряно-порошкова суміш направляється на поверхню виробу, де прискорені частинки порошку утворюють покриття.

Окрім температури стисненого повітря на вході в сопло, оператор може встановити наступні значення таких параметрів напилування, як тиск повітря, витрата порошку, (в цьому дослідженні не змінювалися). Окрім того, на процес напилування впливає дистанція напилування, яка також була задана постійною величиною і підтримувалася в процесі за допомогою певного оснащення.

Режими напилування покриттів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1
Режими напилування покриттів

№ п/п	Параметр	Значення
1	Температурний режим	3; 4; 5
2	Тиск повітря, МПа	0,9
3	Витрата порошку, г/с	0,5
4	Дистанція напилування, мм	10

В якості порошку для напилування було обрано порошкову суміш на основі нікелю Ni+Zn+Al₂O₃, мікронімок і рентгеноспектральний аналіз якої показано на рисунку 2. З рисунку видно, що приблизно 50 % мас. належить нікелю, приблизно 15 % мас. – цинк, і решта 35 % мас. – оксид алюмінію.

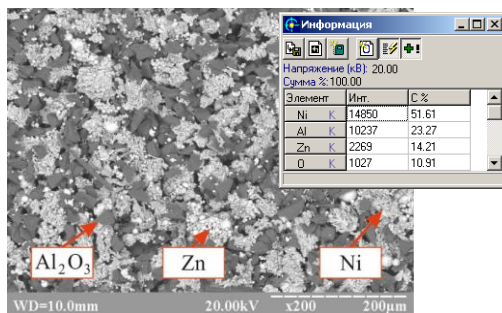


Рис. 2. Мікронімок і рентгеноспектральний аналіз порошкової суміші Ni+Zn+Al₂O₃

Матеріал зразків для напилування – титановий сплав ВТ3-1 за ГОСТ 19807-91.

Дослідження адгезійної міцності покриттів виконувалося відповідно до ДСТУ 2639-94 [9]. Для до-

слідження адгезійної міцності були підготовлені зразки циліндричної форми діаметром 25 мм і висотою 30 мм (рис. 3а). Перед напилуванням покриття поверхня зразка піддавалася піско-струминному обробленню електрокорундом 14А фракцією F80...100 з метою підвищення шорсткості та активації поверхні, що, як відомо, позитивно впливає на збільшення міцності зчеплення покриття з основою [10].

Відповідно до наведених режимів на торцеву поверхню одного зі зразків наносилося покриття. Контрзразок, що має такий самий діаметр, торцем з'єднувався з покриттям з використанням клею (рис. 3б). Критерієм міцності з'єднання є зусилля, при якому відбувається відділення покриття по межі з основним металом при розтягуванні, віднесене до площі поверхні торця. У дослідженнях було використано двокомпонентний клей на основі епоксидних і поліамідних смол ВК-9 ОСТ В 84-2081-83. Перед проведенням експериментів було визначено міцність склеювання зразків без покриття, яка склала в середньому 35,3 МПа. Після склеювання зразок закріплювався в розривній машині. Після прикладання розтягувального навантаження, фіксувалася сила в момент руйнування зразка або по шару покриття або клею. Міцність зчеплення σ визначалася за формулою:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

де F – розривне зусилля;

S – площа поперечного перерізу зразків.

Зразки після проведення досліджень адгезійної міцності показано на рис. 3в.

Результати

Результати досліджень адгезійної міцності покриттів з порошкової суміші Ni+Zn+Al₂O₃, нанесених холодним газодинамічним напилуванням низького тиску на підкладки з титанового сплаву ВТ3-1 при різних початкових температурах газу на вході в сопло, наведено на рис. 4.

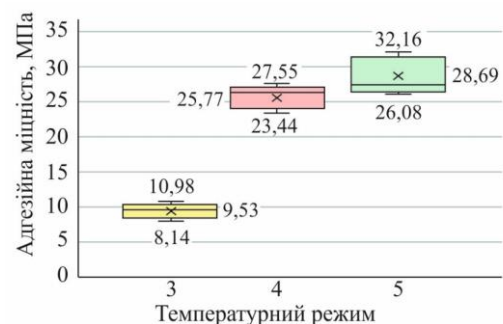


Рис. 4. Результати досліджень адгезійної міцності покриттів з порошкової суміші Ni+Zn+Al₂O₃

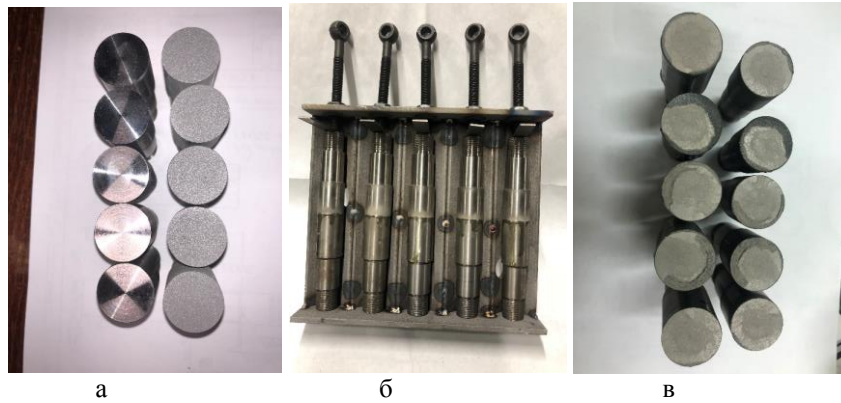


Рис. 3. Етапи проведення досліджень адгезійної міцності покриттів:
а – зразки з титанового сплаву ВТЗ-1 до та після піско-струминного оброблення;
б – склеювання зразків; в – зразки після руйнування

На графіку на рис. 4 показано мінімальні і максимальні значення адгезійної міцності отриманих покриттів для п'яти зразків на кожному режимі напилювання, а також медіану отриманих значень. З рис. 4 видно, що зі збільшенням температури газу на вході сопло, спостерігається зростання адгезійної міцності в середньому з 9,5 МПа до 28,7 МПа при роботі на 3 та 5 режимах відповідно і постійному тиску 0,9 МПа.

Мінімальне значення адгезійної міцності покриттів, що наносяться холодним газодинамічним напилюванням, відповідно до промислових рекомендацій, становить 15 МПа.

З моменту відкриття явища ХГН, центральне місце займає швидкість частинки з точки зору впливу на адгезійну міцність покриттів. Чим більшою є швидкість частинки при зіткненні, тим більш високою є вірогідність утворення зони сильної деформації, видалення поверхневого оксидного шару з контактних поверхонь і утворення адгезійних зв'язків [11]. Автори багатьох робіт пов'язують збільшення адгезійної міцності з ростом швидкості частинок при зіткненні [12, 13].

Окрім того, відомо, що збільшення температури частинки дозволяє зменшити критичну швидкість, необхідну для напилювання [14]. Це зменшення критичної швидкості позитивно впливає на більші значення вперше запропонованого авторами роботи [14] коефіцієнту, що відображає відношення швидкості частинки до значень критичної швидкості напилююмого матеріалу. Зі збільшенням цього коефіцієнту спостерігається покращення показників якості покриттів: адгезійної і когезійної міцності, мікротвердості, пористості, ефективності напилювання тощо.

Залежність швидкості частинки порошку від швидкості потоку, в якому вона знаходиться, продемонстровано в численних роботах, присвячених дослідженню процесу ХГН [15, 16]. Вплив робочої температури газу і його типу на швидкість частинки, мо-

жна пояснити записавши формулу з одномірної ізентропійної моделі розрахунку швидкості газу в надзвуковому соплі [17]:

$$V = M\sqrt{kRT}, \quad (2)$$

де: M – місцеве значення числа Маха в соплі;
 R – питома газова постійна;
 T – місцеве значення температури газу;
 k – коефіцієнт теплоємності газу.

Як видно з рівняння (2), місцеве значення температури газу значно впливає на швидкість потоку, і, відповідно, на швидкість частинок в цьому потоці. При зіткненні з поверхнею частинка деформується, і ступінь деформації залежить від її швидкості в момент контакту. Збільшення робочої температури газу позитивно впливає на збільшення швидкості частинок і приводить до інтенсивної пластичної деформації більш нагрітих частинок в покритті та заповнення порожнини, що можуть утворюватися між частинками і шарами покриття. Також це ущільнення забезпечує заповнення мікронерівностей поверхні, утвореної в результаті попереднього абразивного оброблення, і міцніший зв'язок на межі контакту поверхні підкладки та покриття.

Напилювання метал-матричних композиційних порошкових сумішей має кращі показники ефективності напилювання та фізико-механічних властивостей в порівнянні з напилюванням чистих металів. Зростання міцності зчеплення покриттів для ХГН низького тиску спостерігається при збільшенні вмісту керамічної складової Al_2O_3 в покритті, що підтверджується в роботі [18].

Висновки

В роботі проведено експериментальне дослідження впливу температури газу на вході в сопло на

адгезійну міцність покриттів, отриманих з порошкової суміші Ni+Zn+Al₂O₃, холодним газодинамічним напилюванням низького тиску. За результатами встановлено, що зі збільшенням температури газу, яке реалізується на використаному обладнанні шляхом встановлення температурного режиму (3–5), адгезійна міцність покриттів зростає в середньому з 9,5 МПа до 28,7 МПа. Мінімальне значення адгезійної міцності покриттів, що наносяться холодним газодинамічним напилюванням, відповідно до промислових рекомендацій, становить 15 МПа. Режими 4 і 5 роботи забезпечують необхідні значення міцності зчеплення покриття з підкладкою.

Результати мають важливе практичне значення для обґрунтування раціональних режимів холодного напилювання з метою забезпечення достатнього і надійного зчеплення покриття з підкладкою при розробленні технологічних процесів відновлення деталей з титанових сплавів. Напрямоком подальших досліджень є вивчення комплексного впливу параметрів холодного напилювання на адгезійну міцність покриттів.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. В. Шорінов, С. О. Поливняний**; формулювання мети і постановки задачі досліджень – **А. І. Долматов**; планування експерименту – **О. В. Шорінов**; проведення експериментальних досліджень – **С. О. Поливняний, К. Б. Балущок**; оброблення та аналіз отриманих результатів – **О. В. Шорінов, С. О. Поливняний**; формулювання висновків – **А. І. Долматов**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. 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. – P. 848-865. DOI: 10.1007/s11666-022-01382-4
2. 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.
3. Dissimilar metal joining and structural repair of ZE41A-T5 cast magnesium by the cold spray process [Text] / Jr. V. Champagne, D. Kaplowitz, V. K. Champagne III [et al.] // *Materials Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 33, Iss. 2. – P. 130-139. DOI: 10.1080/10426914.2016.1257137.
4. Properties of cold sprayed titanium and titanium alloy coatings after laser surface treatment [Text] / B. Bucholc, K. Kaszyca, K. Kowiorski [et al.] // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – Article no. 9014. – 17 p. DOI: 10.3390/ma15249014.
5. Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review [Text] / X. Xie, S. Yin, R. Raoelisona [et al.] // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2021. – Vol. 86. – P. 20-55. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.026.
6. Шорінов, О. В. Визначення енергетичних параметрів частинок порошку Ni+Al₂O₃ в надзвуковому соплі при газодинамічному напилюванні аналітичним методом [Текст] / О. В. Шорінов, С. О. Поливняний // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2022. – № 2. – С. 64-70. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-11.
7. Шорінов, О. В. Вплив діаметру частинок порошку нікелю на їх швидкість і температуру при холодному газодинамічному напилюванні [Текст] / О. В. Шорінов, С. О. Поливняний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4 спецвипуск 1 (173). – С. 110-116. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.15.
8. 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/akt.2022.4sup2.19.
9. ДСТУ 2639-94. Єдина система захисту від корозії та старіння. Покриття газотермічні. Метод визначення міцності зчеплення покриття з основою нормальним відривом в умовах температур до 1770 К [Текст]. – [Чинний від 1995-07-01]. – Вид. офіц. – Київ : УкрНДНЦ, 1995. – 21 с.
10. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness [Text] / A. Bruera, P. Puddu, S. Theimer [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 466. – Article no. 129651. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2023.129651.
11. Bonding mechanism in cold gas spraying [Text] / H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51, Iss. 15. – P. 4379-4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X.
12. Influence of cold spray parameters on bonding mechanisms: A review [Text] / S. Singh, R. K. Singh Raman, Ch. C. Berndt, H. Singh // *Metals*. – 2016. – Vol. 11, Iss. 12. – Article no. 2016. DOI: 10.3390/met11122016.
13. Influence of feedstock powder and cold spray processing parameters on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V cold spray depositions [Text] / V. S. Bhattiprolu, K. W. Johnson, O. C. Ozdemir, G. A. Crawford // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 335. – P. 1-12. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.014.
14. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition [Text] / T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi, H. Kreye // *Acta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, Iss. 3. – P. 729-742. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
15. Influence of the nozzle inner geometry on the particle history during cold spray process [Text] / C. A. Bernard, H. Takana, O. Lame [et al.] // *Journal of*

Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31. – P. 1776-1791. DOI: 10.1007/s11666-022-01407-y.

16. Garmeh, S. *Three-dimensional modeling of cold spray for additive manufacturing [Text]* / S. Garmeh, M. Jadidi, A. Dolatabadi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol. 29. – P. 38-50. DOI: 10.1007/s11666-019-00928-3.

17. Dykhuizen, R. C. *Gas dynamic principles of cold spray [Text]* / R. C. Dykhuizen, M. F. Smith // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1998. – Vol. 7. – P. 205-212. DOI: 10.1361/105996398770350945.

18. *Adiabatic shear instability based mechanism for particle/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process [Text]* / M. Grujicic, C. L. Zhao, W. S. DeRosset, D. Helfrich // *Materials & Design*. – 2004. – Vol. 25, Iss. 8. – P. 681-688. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.03.008.

References

1. Sun, W., Chu, X., Lan, H., Huang, R., Huang, J., Xie, Y., Huang, J. & Huang, G. Current implementation status of cold spray technology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, vol. 31, pp. 848-865. DOI: 10.1007/s11666-022-01382-4.

2. Han, X., Sun, X., Li, G., Huang, S., Zhu, P., Shi, T. & Zhang, C. 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.

3. 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. *Materials Manufacturing Processes*, 2018, vol. 33, iss. 2, pp. 130-139. DOI: 10.1080/10426914.2016.1257137.

4. Zybala, R., Bucholc, B., Kaszyca, K., Kowiorski, K., Sobon, D., Zorawski, W., Moszczynska, D., Molak, R. & Pakiela, Z. Properties of cold sprayed titanium and titanium alloy coatings after laser surface treatment. *Materials*, 2022, vol. 15, article no. 9014. 17 p. DOI: 10.3390/ma15249014.

5. Xie, X., Yin, S., Raelisona, Rija-nirina, Chen, C., Verdy, C., Li, W., Ji, G., Ren, Z. & Liao, H. Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 86, pp. 20-55. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.026.

6. Shorinov, O. & Polyviany, S. Vyznachennia enerhetychnykh parametriv chastynok poroshku Ni+Al₂O₃ v nadzvukovomu sopli pry hazodynamichnomu napyliuvanni analitychnym metodom [Determination of energy parameters of Ni+Al₂O₃ powder particles in a supersonic nozzle during cold gas-dynamic spraying using the analytical method]. *Novi materialy i tekhnolohiyi v metallurhii ta mashynobuduvanni – New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2022, no. 2, pp. 64-70. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-11.

7. Shorinov, O. & Polyviany, S. Vplyv diametru chastynok poroshku nikeliu na yikh shvydkist i temperaturu pry kholodnomu hazodynamichnomu napyliuvanni [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. 4 spetsvypusk 1 (173), pp. 110-116. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.15.

8. Shorinov, O., Dolmatov, A. & Polyviany, S. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu parametriv hazodynamichnoho napyliuvannya 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. 4 spetsvypusk 2 (182), pp. 123-128. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.19.

9. DSTU 2639-94. *Yedyna systema zakhystu vid korozii ta starinnia. Pokryttia hazotermichni. Metod vyznachennia mitsnosti zcheplennia pokryttia z osnovoiu normalnym vidryvom v umovakh temperatur do 1770 K* [Ukrainian State Standard 2639-94. Unified system of corrosion and ageing protection. Thermal sprayed coatings. Method for determining bonding strength by normal tearing at temperatures up to 1770 K]. Kyiv, 1995. 21 p.

10. Bruera, A., Puddu, P., Theimer, S., Villa-Vidaller, M., List, A., Bolelli, G., Gärtner, F., Klassen, T. & Lusvardi, L. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 466, article no. 129651. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129651.

11. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T. & Kreye, H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 15, pp. 4379-4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X.

12. Singh, S., Singh Raman, R. K., Berndt, Ch. C. & Singh, H. Influence of cold spray parameters on bonding mechanisms: A review. *Metals*, 2016, vol. 11, iss. 12, article no. 2016. DOI: 10.3390/met11122016.

13. Bhattiprolu, V. S., Johnson, K. W., Ozdemir, O. C. & Crawford, G. A. Influence of feedstock powder and cold spray processing parameters on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V cold spray depositions. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 335, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.014.

14. Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H. & 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.

15. Bernard, C. A., Takana, H., Lame, O., Ogawa, K. & Cavaillé, J.-Y. Influence of the nozzle inner geometry on the particle history during cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, vol. 31, pp. 1776-1791. DOI: 10.1007/s11666-022-01407-y.

16. Garmeh, S., Jadidi, M. & Dolatabadi, A. Three-dimensional modeling of cold spray for additive manufacturing. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, pp. 38-50. DOI: 10.1007/s11666-019-00928-3.

17. Dykhuizen, R. C. & Smith, M. F. Gas dynamic principles of cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, pp. 205-212. DOI: 10.1361/105996398770350945.

18. Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W. S. & Helfritch, D. Adiabatic shear instability based mechanism for particle/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials & Design*, 2004, vol. 25, iss. 8, pp. 681-688. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.03.008.

Надійшла до редакції 05.04.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

STUDY OF THE EFFECT OF THE GAS TEMPERATURE OF THE COLD GAS DYNAMIC SPRAYING PROCESS ON THE ADHESION STRENGTH OF NICKEL-CONTAINING COATINGS

Oleksandr Shorinov, Anatolii Dolmatov, Sergii Polyviany, Kostyantyn Balushok

The subject of the research is the influence of low-pressure cold spraying process parameters on the adhesive strength of the coatings. **The goal** is to ensure the maximum values of the adhesive strength of nickel-based coatings deposited by cold spraying by controlling the gas temperature at the nozzle inlet. **The task** is to investigate the effect of the temperature mode of the DYMET-405 machine on the adhesive strength of the coatings obtained from the Ni+Zn+Al₂O₃ powder mixture at constant other spraying parameters. **Research methods.** The experimental study of the adhesive strength was conducted on the tear using adhesive method in accordance with DSTU 2639-94. The metal-matrix composite powder mixture Ni+Zn+Al₂O₃ was used as powder material. VT3-1 titanium alloy was chosen as substrate material. Coatings were deposited using DYMET-405 low-pressure cold spraying machine. Temperature regulation at the nozzle inlet was performed by turning on the required temperature mode on the equipment control panel. Other spraying parameters remained constant during coating deposition process. **The results.** It was established that with an increase in the temperature of the gas in the nozzle, an increase in the adhesive strength of coatings is observed, on average from 9.5 MPa to 28.7 MPa. This can be explained by the fact that an increase in gas temperature leads to an increase in the velocity of the gas flow and, accordingly, of the powder particles in this flow. Higher particle impact velocity has a positive effect on the process of their deforming, filling of pores, densifying of coating layers, and finally increasing the adhesive and cohesive strength. The scientific novelty of the obtained results is that the dependence of the gas temperature at the nozzle inlet during low-pressure cold spraying on the adhesive strength of Ni+Zn+Al₂O₃ powder mixture coatings deposited on VT3-1 titanium alloy substrates was obtained. **Conclusions.** The practical value of the obtained results is that the obtained dependences of adhesive strength on gas temperature can be used for the development of cold spraying recommendations for the deposition of restorative coatings on parts made of titanium alloys, in particular in aircraft engines to eliminate operational defects.

Keywords: adhesion; bonding; powder; restorative coatings; spraying parameters; cohesion.

Шорінов Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доц. каф. технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Долматов Анатолій Іванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Поливяний Сергій Олександрович – заст. дир. з виробництва авіаційних двигунів – начальник виробничого управління АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Балушок Костянтин Броніславович – канд. техн. наук, головний інженер 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.

Anatolii 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.

Sergii Polyviany – Deputy Director for Manufacturing of Aircraft Engines - Head of Manufacturing Department at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergeypolyviany@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-1353, Scopus Author ID: 57224730128.

Kostyantyn Balushok – PhD, Chief Engineer at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: motor@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275, Scopus Author ID: 6504118748.