

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-119-122>

УДК 621.3.035.183

КУЧЕРЕНКО Юлія

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3406-9850>

e-mail: [fortyna1910@gmail.com](mailto:fortyna1910@gmail.com)

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

На основі методу холодного газодинамічного напилення створюються технології для вирішення завдань енерго- та ресурсозбереження в різних галузях промисловості та вводяться в практику нетрадиційні і ефективні способи виробництва, ремонту, відновлення, антикорозійного захисту, отримання електро- та теплопровідних, антифрикційних та інших покриттів функціональних вузлів, а також елементів найрізноманітнішої техніки і обладнання.

У цій роботі проведено аналіз різноманітних матеріалів покриттів, що використовуються при відновленні деталей методом холодного газодинамічного напилення. Визначені сильні та слабкі сторони різних технологій нанесення покриттів, а також наведені рекомендації щодо вибору матеріалу при відновленні деталей методом холодного газодинамічного напилення.

**Ключові слова:** технології покриттів, захист від корозії, холодне газодинамічне напилення, адгезійна міцність, дефекти.

KUCHERENKO Yulia

Vinnitsia National Agrarian University

## SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF COATING MATERIAL WHEN RESTORING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

Based on the method of cold gas-dynamic spraying, technologies are being created to solve problems of energy and resource saving in various industries and non-traditional and effective methods of production, repair, restoration, anti-corrosion protection, obtaining electrical and heat-conductive, anti-friction and other coatings of functional units, and as well as elements of a wide variety of machinery and equipment.

The main feature of cold gas-dynamic spraying is the absence of high temperatures during the formation of metal coatings, therefore, the absence of oxidation of particle and base materials, non-equilibrium crystallization processes, and high internal stresses in the workpieces. Coatings created in this way are a metal matrix with ceramic particles embedded in it. They are characterized by high strength, good performance properties and can be applied in any thickness. One of the important characteristics of coatings is the adhesion strength. Before spraying on any part, it is necessary to find out which coating material will give the best strength characteristics between the two materials. Therefore, before spraying, it is important to study the specifics of the formation of a durable coating for a given part, as well as to compare the strength characteristics of the cold gas-dynamic spraying method with other methods for restoring parts. In this paper, an analysis of various coating materials used in the restoration of parts by the method of cold gas-dynamic spraying is carried out. The strengths and weaknesses of various coating technologies are determined, as well as recommendations for choosing a material when restoring parts by cold gas-dynamic spraying.

Key words: coating technologies, corrosion protection, cold gas-dynamic spraying, adhesive strength, spraying, defects.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Холодне газодинамічне напилення (ХГДН) – метод порошкового нанесення покриттів, в якому частинки з характерним розміром 10–150 мкм прискорюються в надзвуковому потоці газу до швидкостей 400–1200 м/с і при ударі об підкладку закріплюються на ній без фазових переходів.

На основі методу холодного газодинамічного напилення створюються технології для вирішення завдань енерго- та ресурсозбереження в різних галузях промисловості та вводяться в практику нетрадиційні і ефективні способи виробництва, ремонту, відновлення, антикорозійного захисту, отримання електро- та теплопровідних, антифрикційних та інших покриттів функціональних вузлів, а також елементів найрізноманітнішої техніки і обладнання.

Однією з важливих характеристик покриттів є адгезійна міцність зчеплення. Перед напиленням на якусь деталь, необхідно з'ясувати, яке покриття надасть найкращі показники міцності між двома матеріалами. Тому перед напиленням важливо вивчити специфіку формування міцного покриття для заданої деталі, а так само порівняти характеристики міцності методу ХГДН з іншими методами відновлення деталей [1].

### Виклад основного матеріалу

На сьогоднішній день при ремонті автомобільної техніки, застосовуючи технологію ХГДН, можна усувати дефекти наступних деталей:

- відновлення поверхні кузова (на стиках, за наявності дефектів, вм'ятин);
- антикорозійна обробка зварних швів, локальних зон кузова (цинкування) та зварних швів, локальних ділянок вихлопного тракту (алюмінівання);
- усунення дефектів у блоці циліндрів, усунення дефектів у головці блоку циліндрів (ГБЦ) (прогари, корозійні проміїни), реставрація свічкового різьблення в ГБЦ;

- реставрація посадкових місць підшипників;
- усунення дефектів в алюмінієвих, чавунних, сталевих деталях двигуна, їх герметизація (мікротечі, невеликі тріщини та інші дефекти в ГБЦ, блоці циліндрів, коробці перемикачів передачі тощо);
- усунення дефектів в елементах системи автокондиціонування (витік фреону);
- усунення прогарів, промоїн на бронзових поршнях [2].

Всі вище представлені види деталей, виготовлені з різних матеріалів, і при їх відновленні методом ХГДН необхідно враховувати даний фактор, так як адгезійна міцність безпосередньо впливає на довговічність покриття і ефективність відновлення того чи іншого вузла, або агрегату.

Як порошкові матеріали використовуються порошки металів, сплавів або їх механічні суміші з керамічними добавками. Порошкових матеріалів що застосовуються дуже багато, вони можуть бути як з легкоплавких металів (Al, Cu, Ni, Zn, V, Co, Fe), так і з тугоплавких (Ti, Mo, W). Тому перед напиленням необхідно визначити який порошок або їх суміш (у відсотковому співвідношенні) вибрати для напилення тієї чи іншої деталі, виготовленої з певного матеріалу і з певними властивостями.

Зацікавленість до технології ХГДН за останні роки значно зросла, про що свідчить велика кількість публікацій. Є дослідження адгезійної та когезійної міцності зчеплення різних матеріалів, а також порівняння характеристик міцності методу ХГДН з іншими методами відновлення деталей [3].

Для кількісної оцінки властивостей міцності використовувалися відомі методи: клейовий і штифтовий за ДСТУ 2639-94. При цьому зразки не зазнавали спеціальної поверхневої підготовки. В якості клею застосовувалася епоксидна смола та плівковий клей ВК-7. Діаметр напилених зразків складав 6–10 мм. Відрив зразка склеєного з шайбою, здійснювався за допомогою розривного пристрою, виготовленого на основі важільних ваг, і дозволяє вимірювати навантаження, які прикладаються, в діапазоні 0–300 кг з точністю 0,01 кг.

Характерні значення адгезійної та когезійної міцності зчеплення наведені в таблиці 1, де так само вказані характеристики міцності деяких покриттів, отриманих іншими методами напилення.

Таблиця 1

## Значення адгезійної та когезійної міцності зчеплення покриття з основою

Матеріал		Метод напилення	Метод випробування	Міцність зчеплення, МПа
Покриття	Основа			
Al	Mg+6Al+12Zn	Плазмовий	Штифтовий	44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al сплав	Детонаційний	Штифтовий	20-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ст. низьковугл.	Плазмовий	Клейовий	10
Al	Al	Ел. дуговий	Клейовий	9
Al	Ст. вугл.	Ел. дуговий	Клейовий	19
Al	Ст. вугл.	Газопламеневий	Клейовий	10
Al	Cu	ХГДН, $k_d < 1$	Клейовий	62-67
Al	ЛС-59	ХГДН, $k_d < 1$	Клейовий	64-65
Al	X18H9T	ХГДН, $k_d < 1$	Клейовий	62-65
Al	Cu	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	30-40
Al	Ст.35	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	20-30
Al	40X	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	38-40
Al	Д16Т	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	50-55
Al	ЛС-59	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	38-66
Cu	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	40-45
V	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	20
Zn	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	12-15
Al	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	10-20
V	Ст.35	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	25
Ni	Ст.35	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	35
Zn	Ст.35	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	15
X18H10T	ЛС-59	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	50-51
X18H10T	40X	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	22

З таблиці видно, що характеристики покриттів нанесених методом ХГДН досить високі, і величина зчеплення покриттів з основами становить  $\sigma_{br} = 10-66$  МПа, що практично не поступається значенням для покриттів, напилених газотермічними методами. Слід зазначити, що при випробуваннях штифтовим методом вищі значення отримані для основ з менш твердих матеріалів (латунь ЛЗ-59, дюраль Д16Т, мідь). Подібна залежність пов'язана, мабуть, з більш значною глибиною проникнення частинок у основу (~ 10 мкм) та більш розвиненою контактною поверхнею для цих матеріалів, ніж для зразків зі сталей, що підтверджується даними мікроскопічних спостережень.

Встановлено, що алюмінієві покриття, отримані в режимі  $k_d < 1$  ( $k_d$  – коефіцієнт напилення), істотно перевищують міцність зчеплення з основою покриття, отримані при  $k_d \sim 1$ , що також пояснюється, мабуть, ефектом ударного пресування.

Таким чином, дані клейових, штифтових випробувань показують, що когезійна міцність алюмінієвих покриттів, отриманих при  $k_d < 1$ , можна порівняти з міцністю компактного алюмінію, в той час як адгезійна міцність істотно залежить від матеріалу основи і може бути як нижчою когезійної (на основах з твердих матеріалів, наприклад, сталей), і вищою (на основах із пластичних матеріалів). Покриття з різних матеріалів, напилених при  $k_d \sim 1$ , володіють меншими властивостями міцності і порівняні з властивостями покриттів, одержуваних газотермічними методами.

Одним із важливих факторів при напиленні є коефіцієнт напилення. Коефіцієнт напилення – це відсоток частинок порошку, що закріпилися на поверхні, від загальної маси витраченої сировини. При напиленні чистого матеріалу (без змішування різних порошків) коефіцієнт напилення дуже малий (0,01-0,1%), що спричиняє перевитрату порошку та низьку якість покриття, без використання керамічних частинок у складі. Наявність керамічних частинок в напилюваному порошковому матеріалі є важливою особливістю технології формування покриттів так, як тверді керамічні частинки сприяють:

- очищенню поверхні від забруднень і створенню більш придатного до напилення мікрорельєфу поверхні основи, а це суттєво збільшує міцність зчеплення покриття з нею;
- зменшенню пористості та збільшенню когезії (міцності зчеплення частинок один з одним) завдяки деформації поверхні із-за ударів металевих частинок;
- зрізання з поверхні покриття металевих частинок, які слабо закріпилися, що покращує якість покриття.

Як керамічні частинки зазвичай використовують частинки з оксиду алюмінію (корунду), які є хімічно абсолютно інертними. Тому наявність або відсутність таких частинок не погіршуватиме корозійну стійкість покриття [4].

Якщо намагатися наносити покриття тільки з порошку металу, без корунду, то коефіцієнт напилення впаде до неприйнятних значень, а міцність зчеплення з основою може зменшитися в 2-3 рази, а порошок міді зазвичай або взагалі не закріплюватиметься на поверхні, або не створюватиме товстих покриттів.

Дані досліджень щодо залишкового вмісту компонентів у покритті дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту компонентів у покритті. Наприклад, максимальний залишковий вміст міді в покритті (95% міді в покритті) може бути отриманий при додаванні у вихідний порошок 30-40% алюмінію від загальної ваги. При такій вихідній концентрації алюмінію коефіцієнт напилення міді становитиме  $\approx 0,5\%$ , що все-таки помітно вище, ніж коефіцієнт напилення чистої міді (0,01%). Якщо, наприклад, потрібно отримати залишковий вміст міді  $\approx 50\%$  у покритті, необхідно додати у вихідний порошок  $\approx 60\%$  алюмінію від загальної ваги. У цьому випадку коефіцієнт напилення міді помітно зростає і буде  $\approx 15\%$  ( $k_d = 0,15$ ). Відсоток вмісту корунду зазвичай становить у суміші від 1 до 20% (від загальної ваги). При вмісті керамічних частинок більше 20% порошку, коефіцієнт напилення різко прямує до нуля [5].

З цього дослідження можна дійти невтішного висновку, що у процесі напилення компоненти суміші впливають один на одного. Імовірно, механізм взаємодії компонентів полягає в тому, що вони з різною ймовірністю закріплюються на поверхні, яка складається з різних матеріалів (тобто ймовірність закріплення мідних частинок на поверхні з алюмінієвих частинок вища, ніж ймовірність закріплення мідних частинок на поверхні зі сталі або самих мідних частинок).

Також більший вплив на адгезійну міцність мають технологічні режими встановлення холодного газодинамічного напилення, такі як нагрівання повітряного потоку, витрата порошкового матеріалу та робочий тиск повітря.

Найбільш якісне утворення покриттів відбувається за наступних технологічних режимів установки ХГДН:

- робочий тиск 0,5-0,7 МПа;
- енергетичний режим 2,3 та 4 (200, 300 та 400 СО відповідно);
- витрати порошку 0,2-0,4 г/с.

Таким чином, перед відновленням деталі методом ХГДН дуже важливо визначити склад покриття, який наноситься на деталь виготовлену з будь-якого матеріалу, а так само встановити технологічні режими установки ХГДН при яких, покриття, що наноситься, матиме найкращі показники адгезійної міцності.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

У статті проведено аналіз сучасних технологій відновлення деталей, визначені сильні та слабкі сторони різних технологій покриттів. Як результат, приведені рекомендації що до вибору матеріалу при відновленні деталей методом холодного газодинамічного напилення. Враховуючи ці аспекти, вибір залишається за споживачем, які технології відновлення підходять до конкретних потреб, виходячи з перерахованих основних видів і характеристик нанесення захисно-декоративних покриттів.

**Література**

1. Кучеренко Ю.С., Матвійчук В.А. Основні технології та способи нанесення покриттів газотермічним напиленням. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2021. № 6 (303). С. 240–242.
2. Гайдамак О.Л., Матвійчук В.А., Кучеренко Ю.С. Перспективи створення полімерних функціональних покриттів із застосуванням газодинамічного напилення. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 2 (109). С. 105–112.
3. Марьянко В. П. Газопламенное напыление полимерных порошковых красок. Промышленная окраска. 2014. № 1. С. 24–28.
4. Гайдамак О.Л. Дослідження властивостей покриттів на основі алюмінію, створених холодним газодинамічним напиленням. Вісник машинобудування та транспорту. 2015. № 1. С. 14–20.
5. Газотермічні покриття. Оборудование и технологии малого бизнеса. 2014. URL: <https://proizvodim.com/gazotermichni-pokrityya.html>.

**References**

1. Kucherenko YU.S., Matviychuk V.A. Osnovni tekhnolohiyi ta sposoby nanesennya pokryttiv hazotermichnym napylennyam. Herald of Khmelnytskyi National University. 2021. № 6 (303). S. 240-242.
2. Haydamak O.L., Matviychuk V.A., Kucherenko YU.S. Perspektyvy stvorennya polimerykh funktsional'nykh pokryttiv iz zastosuvanniam hazodynamichnoho napylennya. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2020. № 2 (109). S. 105-112.
3. Mar'yanko V. P. Hazoplamennoe napylenie polimerykh poroshkovykh krasok. Promyshlennaya okraska. 2014. №1. С. 24–28.
4. Haydamak O.L. Doslidzhennya vlastyvostry pokryttiv na osnovi alyuminiyu, stvorenykh kholodnym hazodynamichnym napylennyam. Visnyk mashynobuduvannya ta transportu. 2015. № 1. S. 14-20.
5. Hazotermichni pokryttya. Oborudovanie y tekhnologii malogo biznesa. 2014. URL: <https://proizvodim.com/gazotermichni-pokrityya.html>.