



УДК 621.3.035.183

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-1

ПРОЦЕСИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ВИРОБІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

Веселовська Наталія Ростиславівна, д.т.н., професор
Гайдамак Олег Леонідович, к.т.н., доцент
Карпійчук Михайло Федорович, аспірант
Кучеренко Юлія Сергіївна, аспірантка
Вінницький Національний Аграрний Університет

Nataliya Veselovska, Doctor of Technical Sciences, Professor
Oleg Gaidamak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Mykhailo Karpiichuk, Postgraduate student
Jylyia Kucherenko, Postgraduate student
Vinnytsia National Agrarian University

Стаття присвячена технології холодного газодинамічного напилення – технології створення функціональних покриттів, в якій використовуються звужено-розширювані сопла (сопла Де Лавалля), з яких із надзвуковою швидкістю (або близькою до неї) напилюються тверді порошки на поверхню деталі, де вони пластично деформуються і прилипають до неї.

Холодне газодинамічне напилення – інноваційний процес, який в останні роки отримав широко зростаючий науковий інтерес і промислове застосування у галузях автомобільної, аерокосмічної та біотехнологічної промисловості. Напилення таким способом різних порошкових матеріалів забезпечує захист від корозії та здатне збільшувати механічну міцність та зносостійкість деталей. Цим способом можна створювати функціональні покриття з різними теплопровідностями та електропровідностями, які можуть бути використані у якості утеплювачів, електропровідних та електроізоляційних поверхневих шарів, покриття для регулювання зазорів, відновлення та ремонту деталей.

У статті розглянуто сучасні розробки в області експериментального аналізу технологій та процесів холодного газодинамічного напилення, визначено системи холодного газодинамічного напилення та формування покриттів, описано параметри та принципи процесу. Представлена розроблена у ВНАУ установка для напилення поверхонь та проведені дослідження та аналіз можливості використання методу холодного газодинамічного напилення для відновлення деталей автотракторної техніки сільськогосподарського призначення.

***Ключові слова:** холодне газодинамічне напилення, функціональні покриття, параметри напилення, пластична деформація.*

Ф. 2. Табл. 3. Рис.11. Літ.13.

1. Постановка проблеми

Насамперед обладнання переробної промисловості, тваринництва, біоенергетичних комплексів, що використовується для переробки, зберігання або транспортування агресивних речовин. Функціональні покриття з інертних матеріалів не вступають у будь які хімічні реакції з харчовими продуктами, продуктами переробки, відходами тваринництва, кислотами та іншими агресивними середовищами.

Таким чином питання захисту обладнання від агресивних середовищ шляхом застосування процесів холодного газодинамічного напилення є актуальною проблемою розвитку захисних технологій та відповідного обладнання для реалізації процесу створення функціональних покриттів. Важливим аспектом є також створення електропровідних і електроізоляційних поверхонь електричного обладнання, яке широко використовується на підприємствах АПК.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Холодне газодинамічне напилення (ХГДН) є одним з широко поширених процесів порошкового напилення. Експериментально було доведено, що процес газодинамічного напилення



можна назвати методом «адитивного виробництва». Вперше 12 серпня 1902 року Терстон запатентував метод наплення газом під високим тиском зі швидкістю 300 м/с для прискорення металевих порошків, і згодом осадження було досягнуто шляхом високошвидкісного зіткнення з основним матеріалом. Основні інноваційні розробки почалися в 1950-х роках компанією Rochevill, яка використала потік газу зі швидкістю вище, ніж ті, які були отримані за допомогою існуючих в той час методів. Потік суміші газу та порошку через сопло, назване соплом Де Лавалю, дає однорідне тонке покриття [1].

Деякі матеріали, такі як метали, металеві сплави, композиційні матеріали та полімери, були успішно нанесені на матеріал підкладки українськими вченими і вони досягли дуже високої швидкості нанесення покриття за допомогою газодинамічного наплення [2]. Кількість промислових застосувань для холодного наплення у всьому світі зростає в області авіакосмічної, енергетичної, автомобільної, біотехнологічної та військової промисловості. Осадження під час ХГДН можна підсумувати як молекулярне тяжіння між відкладенням частинок на поверхні підкладки і вбудованим зростанням відкладень. Висока швидкість від 500 до 1500 мс⁻¹ газу-носія прискорює дрібнодисперсні частинки порошку (1-50 мкм) через звужено-розширене сопло Де Лавалю. З надзвуковою швидкістю частинки вдаряються об підкладку і пластично деформуються. Процес деформації призводить до адгезії поверхні [3].

3. Мета дослідження

Метою даної роботи є аналіз технологій холодного газодинамічного наплення та розробка способів створення функціональних покриттів для виробів сільськогосподарської техніки.

4. Виклад основного матеріалу

На даний час холодне газодинамічне наплення поділяється на два типи, в залежності від методу подачі порошку в горловину сопла, а саме, холодне газодинамічне наплення низького тиску (ХГДННТ) і холодне газодинамічне наплення високого тиску (ХГДНВТ). При холодному напленні низького тиску частки порошку подаються за допомогою прискореного газом порошку (Рис. 1). В системі ХГДННТ використовується відносно низький тиск в діапазоні від 5 до 10 бар і попередньо нагрітий до 50° С азот, гелій або чисте повітря в якості газу-витискувача, який потім пропускається через сопло. Попередньо нагрітий газ прискорюється зі швидкістю від 60 до 300 м/с. Тиск всередині сопла постійно підтримується нижче атмосферного.

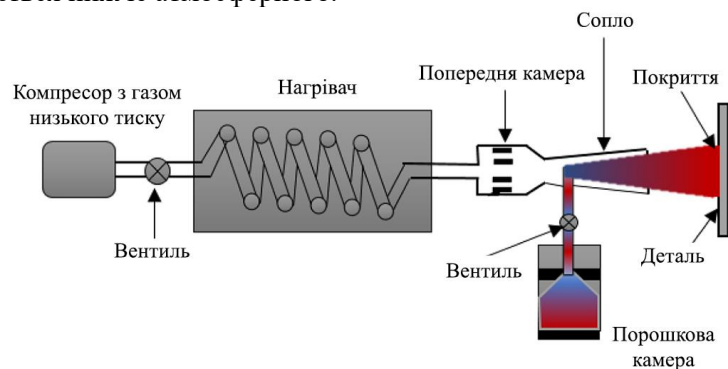


Рис. 1. Концептуальна схема холодного газодинамічного наплення низького тиску

Система холодного наплення низького тиску більш гнучка, портативна і значно знижує витрати на розпоршення, ніж система ХГДНВТ, в якій використовується подача під високим тиском. Але недоліком методу ХГДННТ є його можливість забезпечити ефективність осадження лише нижче 50%. Термін служби сопла ХГДННТ більше, оскільки частинки порошку проходять тільки через надзвукову область сопла, тим самим знижуючи знос стінки сопла. Холодне наплення під високим тиском змушує частинки порошку з повітрям, азотом (N_2) або гелієм (He) в якості пропелленту проходити через сопло Де-Лавалю при високому тиску від 25 до 30 бар і температурі попереднього нагрівання до 1000°С. Нагрітий газ прискорюється до надзвукової швидкості близько 1200 м/с, в той же час знижуючи його температуру.

Як показано на Рис.2, в зоні попередньої камери газ-пропеллент змішується з частинками порошку і проникає в потік газу в осьовому напрямку. Частинки порошку прискорюються до швидкості від 600 до 1200 м/с, вдаряються об поверхню підкладки з достатньою енергією (кінетичною),



щоб викликати металургійну або механічну адгезію. Ефективність системи високого тиску вище, ніж у низького, і становить до 90%.

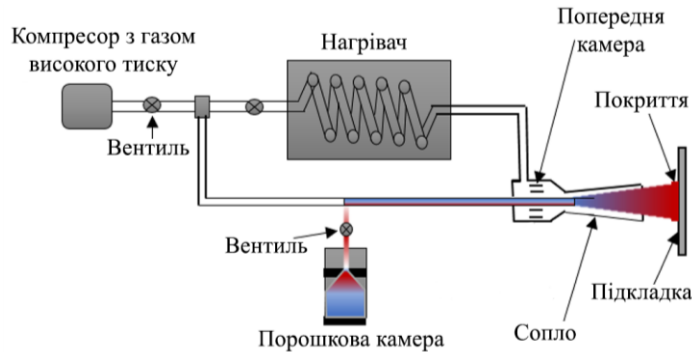


Рис. 2. Концептуальна схема холодного газодинамічного напилення високого тиску

Система ХГДННТ і система ХГДНВТ, розглянуті вище, мають деякі обмеження. ХГДННТ з більш простим устаткуванням має відносно низьке число Маха на виході (зазвичай >3) через обмеження конструкції сопла. За допомогою методів подачі нижче по потоку можуть бути досягнуті тільки низькі швидкості частинок, оскільки допускається тиск на вході 1 МПа. Компресори високого тиску для частинок мають великі розміри і високу вартість. Ще одним обмеженням є засмічення сопла, особливо при збільшенні швидкості і температури частинок. Ця проблема може бути подолана шляхом змішування частинок з високою межею плинності або частинок з більшим діаметром. Іншим обмеженням ХГДНВТ є ерозія частинок, яка виникає на межі поділу сполук, що викликає знос надзвукової горловини сопла. Це може бути більшою перешкодою при розпилюванні твердих порошків у якості сировини. Основними компонентами системи холодного газодинамічного напилення є порошки з частинками діаметром від 1 до 50 мкм, джерело стисненого газу, нагрівач для газу, сопло Де Лавалля, камера розпилення і система керування [4].

У технології ХГДН є кілька варіацій, які були введені для поліпшення її можливостей. Кінетична металізація (КМ) процесу є першим введеним методом. У цьому методі сопло, в умовах засмічення потоку, для досягнення швидкості газу на виході забезпечується розширенням сопла [5].

Імпульсне газодинамічне напилення (ІГДН) - це другий варіант, встановлений для ХН [6]. Частинки порошку в цьому процесі нагріваються до температури вище, ніж температура процесу ХГДН, але нижче температури плавлення. Цей метод має високу технологічну цінність за рахунок підвищення температури для зменшення критичної швидкості. Швидкість удару також може підтримуватися для досягнення більш високого рівня пластичної деформації. Цей процес використовує рухому хвилю тиску як переривчастий характер для створення одночасно більш високої температури і тиску, ніж в процесі ХН, який використовує безперервний, стаціонарний потік.

Холодне вакуумне напилення (ХВН) - ще один варіант ХН. ХВН працює при тиску нижче атмосферного. При низькому тиску частинки потрапляють в вакуумний резервуар. Вакуумний бак разом з вакуумним насосом забезпечує середовище з низьким тиском. Уловлювання газу і збір частинок відпрацьованого порошку можливі в вакуумному резервуарі.

Метод осадження аерозолів (МОА) - ще один варіант методу, подібний ХВН. Наночастки переміщуються гелієм або повітрям у вигляді потоку газу у вакуумній камері [7]. Пропеллент у цьому процесі знаходиться під тиском нижче атмосферного і має низьку швидкість у порівнянні з ХН. Осадження дрібних частинок порошку можливо, тому що в цьому процесі значно зменшується ударна хвиля або ефект головного удару підкладки.

Основними компонентами систем ХГДН, показаних на рис. 3, є подача газу під високим тиском, модуль управління з газовим нагрівачем, основний газ (пропеллент) від газового регулятора, вторинний газ (газ подачі частинок), поєднаний з порошком, порошок матеріал, система підтримки субстрату і компонент для розпилення (робоча станція). Ця конфігурація дозволяє використовувати різні гази. Основне джерело подачі газу з'єднане з соплом Де Лавалля на границі розділу попередньої камери для розпилення газу. Температура і тиск є основними входними параметрами робочого газу які є основним обмежувачем контролю системи. Ці входні параметри регулюються газовим нагрівачем і модулем-регулятором в системі керування. Рух опори для підкладки і порошкового компонента формують осадження порошку. Рух розпилювального компонента контролюється маніпулятором робота. Рух компонента підтримки підкладки може бути обмежений для осадження зігнутої або



плоскої поверхні. Компоненту також можна дозволити переміщатися для нанесення покриттів на обертові поверхні. Поверхні обертання можуть бути асиметричними, де рух розпилювального компонента може бути об'єднано з рухом робота для створення тривимірних складних форм або осесиметричних поверхонь.

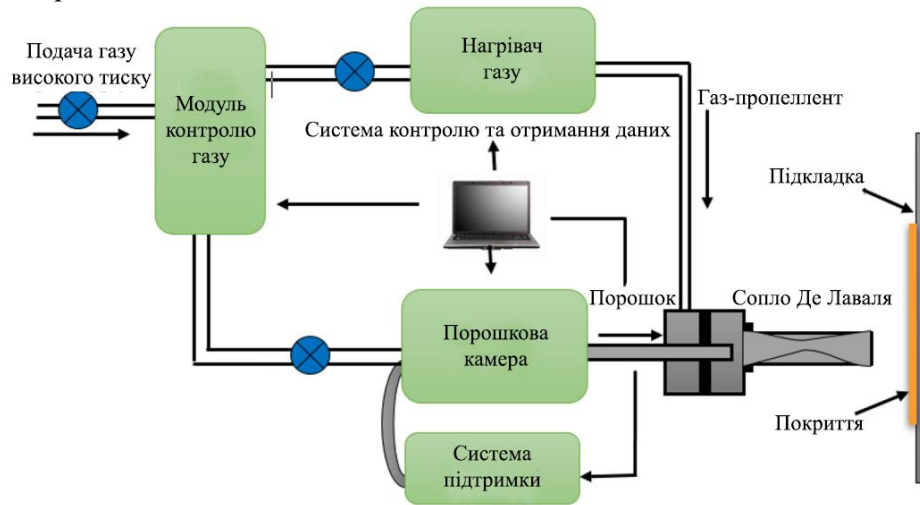


Рис. 3. Схема системи холодного газодинамічного напилення

Процес формування покриття ділиться на дві фази: формування першого шару, який представляє собою адгезію відкладення до субстрату і нарощування покриття, тобто зростання самого відкладення.

Поведінка механічної структури частки/підкладки під час удару визначає когезійну здатність напилення. В даний час передбачені дві консолідовані природи, і це залежить від того, чи деформуються порошки пластично на підкладці. Металеве з'єднання досягається за рахунок пластичної деформації, в той час як в міжфазній зоні під час напилення пластична деформація призводить до сильного удару. Як зазначалося раніше, трансформація структури матеріалу відбувається через суттєву пластичну деформацію, в той час як металургійне з'єднання може використовуватися для створення зчеплення частинок. Для посилення консолідації відкладень після формування першого шару були виділені наступні етапи. Зростання осаду починається як за рахунок обертального руху частинок, так і за рахунок деформації. Таке поєднання кінематики покращує щільність нанесення. На третьому етапі відбувається зв'язування між частинками, коли покриття пластично деформується на підкладці. В цьому випадку відбувається зменшення пористості. Під час останньої стадії спостерігається ущільнення покриття, яке продовжує збільшувати твердість частинок. Ці механізми, показані на рис. 4, дають докладне пояснення того, як пластичні частинки можуть бути нанесені під час холодного газодинамічного напилення.

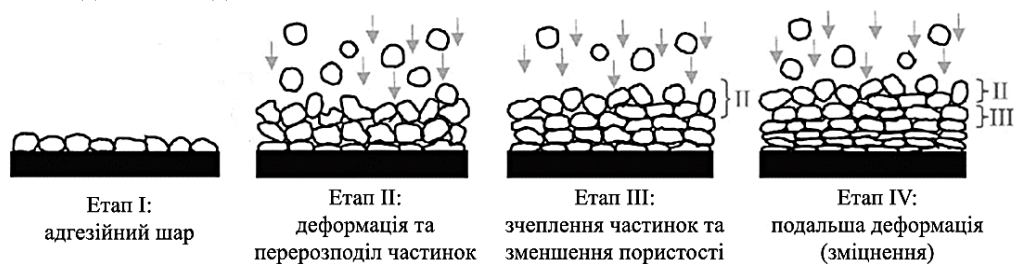


Рис. 4. Схематична діаграма нанесення металевих частинок під час процесу холодного газодинамічного напилення

Розмір частинок порошку є основним фактором, який сприяв успішному нанесенню покриттів холодним напиленням, а також визначенню типових розмірів частинок. Як правило, легше прискорювати і напилювати частинки розміром від 100 нм і нижче, в той час як частки, що перевищують цей діапазон, завжди мають труднощі з прискоренням. Тому дуже важливо бути обережним при виборі розміру часток. Загалом, швидкість часток (V_p) і ефективність осадження (DE) можуть бути зменшені і оптимізовані для отримання оптимального діапазону розмірів часток. У



літературі максимальний розмір часток варіюється від 20 до 60 нм для деяких матеріалів, за винятком того, що алюміній (відомий як легкий метал) і цинк (відомий як м'який метал) використовувалися з розмірами до 100 і 90 нм відповідно, як показано на рис 5.

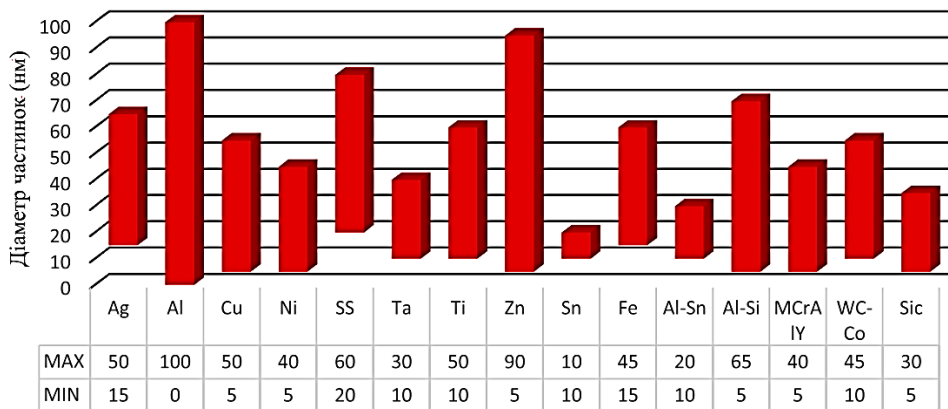


Рис. 5. Діаграма типових діаметрів частинок різних матеріалів, що можуть бути використані у процесах холодного газодинамічного наплення

В процесі холодного газодинамічного наплення в якості основного палива використовується повітря, азот або гелій. Гелій (He) має особливі характеристики, які роблять його більш ефективним, ніж повітря і азот (N_2). Низька молекулярна вага і більш висока газова постійна (R_s) гелію роблять його більш привабливим.

Одним з важливих параметрів холодного наплення, який зазвичай впливає на здатність до осадження, є швидкість часток (V_p) до удару. V_p також визначає стан пластичної деформації на межі поділу частинок і підкладки, а також ерозію поверхні підкладки. Критична швидкість (V_c) – це мінімальна швидкість частинки для даного матеріалу, достатня для досягнення адгезії частинки/підкладки. Покриття з відкладених частинок може бути досягнуто тільки за умови, що швидкість частинки перевищує критичну швидкість [8]. Швидкість частинок V_p також залежить від умов розпилення, таких як властивості і природа пропеллентного газу, початковий тиск і температура часток, геометрична форма сопла і деякі інші властивості (діаметр, розмір, морфологічна щільність тощо) використовуваного матеріалу.

Для металів, що потребують забезпечення дуже високих критичних швидкостей та для дорогих матеріалів рекомендується гелій. Крім того, гелій економічно невигідний і його не можна отримати вільно у порівнянні з азотом і повітрям, хоча він має кілька переваг, таких як поліпшення щільності покриття, висока продуктивність і підвищення робочої температури. Азот і повітря більше використовуються для управління виробничими витратами. Недоліком повітря є окислення, на відміну від азоту, який запобігає окисленню зразка.

Наприклад, для нанесення керметних з'єднань (наприклад, сплаву на основі нікелю і з'єднання $NiCrAlY$), потрібна дуже висока температура в діапазоні від $500^{\circ}C$ до $800^{\circ}C$. Для осадження оксидів і кераміки потрібні умови низького тиску і температури, в основному більше 2 МПа і $300^{\circ}C$. Для нікелю потрібний тиск наплавлення близько 4 МПа. М'які метали, такі як Zn і Sn , вимагають низького тиску і температури, в той час як відносно тверді металеві матеріали, такі як Al , Cu і Ti , можуть бути нанесені в тих же робочих умовах з використанням гелію в якості газу-пропелленту, а більш високий тиск і температура необхідні для повітря або азоту. Для успішного склеювання сплаву на основі титану і нержавіючої сталі потрібний високий тиск і температура. Тиск газу на вході і температура впливають на кінематику частинок під час процесів холодного наплення. Частинки в форсунках повинні бути впорснуті пропеллентним газом, це його основна функція, і тому тиск і температура повинні бути нижче, ніж температура і тиск впускного порошкового газу. Це призведе до збільшення температури і тиску в зоні звуження сопла, якщо відбудеться збільшення тиску і (або) температури пропеллентного газу, що приведе до ефективності осадження і міцності адгезійного покриття [9]. Подальше підвищення тиску порошкового газу може негативно позначитися на кінематиці газового потоку, особливо при більш високій температурі. У горловині сопла вище по потоку відбудеться значне зниження температури газу при об'єднанні газів з такою різницею температур, що призведе до падіння температури за рахунок обмеження кінематичної здатності газу.



Технологія холодного газодинамічного напилення доповнює інші відомі термічні напилення і тому не замінює їх. Функціональні покриття виконані методом ХГДН легко усувають будь-які дефекти без додаткових витрат на якість продукції. Наприклад, покриття можуть бути ефективними в ремонті дефектів машин та механізмів тощо.

Газодинамічне напилення також широко використовується в якості механізму реставрації, для сприяння оновленню антикварних предметів, як технічних, таких як автомобілі, літаки, так і мистецтва, таких як металеві скульптури [10]. Варто відзначити, що в аерокосмічній промисловості покриття з алюмінію і алюмінієвих сплавів для прискорювачів космічних кораблів наносяться цим методом для ремонту / відновлення. Він також діє як агент, що зменшує корозію, в протиковзких покриттях. Крім того, ефективними антикорозійні покриття є в нафтохімічній промисловості та в литих частинах газових турбін. На майданчиках для ремонту автомобілів і автомобільних майстерень покриття ХГДН допомагає усунути пов'язані з ними дефекти, відновити форму і герметизувати витоки. Метод також корисний для покриття твердих поверхонь і мідних сплавів, таких як перила ліжок, крани, вимикачі світла, дверні ручки, зони приготування їжі та інше обладнання, яке часто контактує з людьми. Цей метод нанесення покриття також знаходить застосування при виробництві титанових труб (безшовних).

ХГДН використовується для виконання функціональних покриттів при обробці зварювальних ліній, виробництві елементів оптичних окулярів. За допомогою цього процесу легко обслуговувати старе обладнання, дороги, дефіцитні і зношені деталі.

Устаткування для кондиціонування повітря в автомобілях і теплообмінники з алюмінієвими трубками також можуть бути виготовлені з використанням методу холодного газодинамічного напилення. Цей процес також може бути використаний для виробництва утеплювачів з високими теплоізоляційними властивостями, а також компонентів з високою корозійною стійкістю при менших витратах на виробництво [11].

Реалізація процесу ХГДН поверхонь деталей сільськогосподарської техніки. Однією з перспективних галузей застосування холодного газодинамічного напилення є відновлення поверхонь алюмінієвих блоків та головок двигунів сільськогосподарської автотракторної техніки. В процесі експлуатації в результаті дії різних видів корозії відбувається поступове руйнування поверхонь блоків та головок двигунів і втрата їхньої працездатності. Тому відновлення втрачених обсягів металу є важливою та актуальною задачею, яка може бути вирішена за допомогою процесу ХГДН.

Установка для холодного газодинамічного напилення функціональних покриттів представлена на рис. 6 [12]. Установка містить такі основні компоненти як нагрівач повітря 1 і сопло 2.



**Рис. 6. Установка для газодинамічного напилення функціональних покриттів:
1 – нагрівач повітря, 2 – сопло.**

В корпусі нагрівача 1 розташовано спіралевидний дріт з ніхрому який нагрівається до високих температур при проходженні через нього електричного струму. Навколо цього дроту проходить стиснуте повітря, яке нагрівається від ніхромового дроту і потрапляє у сопло 2, де прискорюється до швидкості, що перевищує швидкість звуку. За рахунок ефекту ежекції напилюваний матеріал – порошок алюмінію – всмоктується у нагрітий повітряний потік. Розігнаний та нагрітий у повітряному потоці порошок досягає поверхні підкладки і формує суцільне покриття.

Для проведення досліджень було використано алюмінієвий порошок ПА-4 з розміром частинок 60–100 мкм. Кількість порошку для одного напилення складала 0,47 г. Дистанція напилення становила 15 мм. У якості підкладки було використано сталеві пластини з сталі 3 товщиною 1 мм. Перед напиленням поверхня пластин додатково нічим не оброблялась.



Фіксація температури здійснювалась, за допомогою вбудованої термопари, на початку та наприкінці процесу напилення. Тиск повітря підтримувався на значенні 0,57 МПа. Підкладка на яку наносили покриття була зважена до і після напилення. Всі дані були занесені до таблиці 1, де T_1 , та T_2 – температура на початку та в кінці напилювання, M_1 та M_2 – маса підкладки до та після напилювання. M_n – маса фігури напилення, K – коефіцієнт використання порошку, який визначався як відношення маси фігури напилення до початкової маси порції порошку та помноженої на 100%. На рис. 7 показані фігури напилення.

Таблиця 1

Вплив режимів напилення на коефіцієнт використання порошку алюмінію

№ зразка	T_1 , °C	T_2 , °C	M_1 , г	M_2 , г	M_n , Г	K , %
I	320	330	10,41	10,45	0,04	8
II	320	360	10,55	10,67	0,12	25,5
III	320	460	10,79	10,99	0,2	42,5

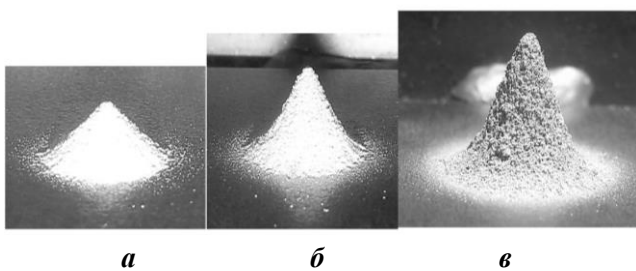


Рис. 7. Фігури напилення:
а – зразок I, б – зразок II, в – зразок III.

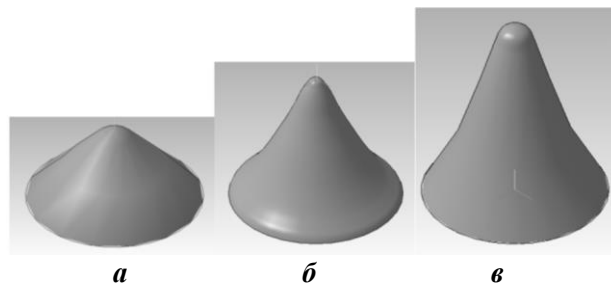


Рис. 8. Тривимірні моделі фігур напилення:
а – зразок I, б – зразок II, в – зразок III.

Для визначення пористості та густини напиленого покриття необхідно знати об'єм фігури напилення та її масу. Для визначення цих параметрів застосували програмний комплекс Компас 3D за допомогою якого було спроєктовано 3D моделі напилених фігур розміри яких точно відповідали розмірам напилених фігур (рис. 8) та використовуючи функцію «масоцентрувальні характеристики» визначили об'єм та масу фігури напилення як суцільного матеріалу з алюмінію А0, ГОСТ 11069-2001, густиною $\rho_1 = 0,002700 \text{ г/мм}^3$.

Густину покриття ρ_2 визначали як відношення маси зваженої фігури напилення до її розрахункового об'єму. Пористість фігури напилення J визначали за формулою (1):

$$J = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

Таким чином було визначено частку повітря в об'ємі фігури напилення. Результати дослідження приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Визначення пористості фігури напилення

№ Зразка	Розрахункова маса фігури напилення для алюмінію А0, г	Розрахунковий об'єм, мм ³	Зважена маса фігури напилення, г	Густина фігури напилення ρ_2 , г/мм ³	Пористість фігури напилення J , %
I	0,097759	36,206894	0,04	0,0011	41
II	0,227543	84,275364	0,12	0,0014	52
III	0,439850	162,907247	0,2	0,00158	58

Для визначення міцності зчеплення плями покриття з підкладкою, що є важливим при роботі сільськогосподарської техніки, було розроблено пристосування для випробовування на зсув (рис. 9).

Спочатку підкладка 2 з фігурою напилення 3 встановлюється у щілину 4 упору 1 і після цього на підкладку за допомогою гідравлічного пресу прикладається зусилля P .

За відомими зусиллям P зсуву плями напилення і площею контакту фігури напилення з підкладкою S розраховували межу міцності зсуву плями напилення τ_3 за формулою (2):

$$\tau_3 = P/S \quad (2)$$

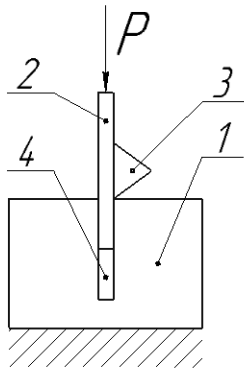


Рис. 9. Схема випробування на зсув фігури наплення: 1 – упор, 2 – підкладка, 3 – фігура наплення, 4 – щілина

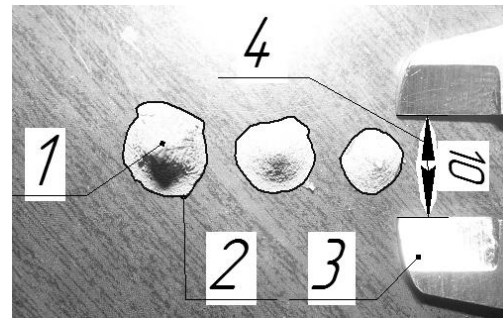


Рис. 10. Визначення форми та площі контакту фігур наплення з підкладкою: 1 – вид фігур наплення зверху (фігури № 3, 2, 1 зліва направо), 2 – крива Без'є, 3 – штангенциркуль для визначення масштабного коефіцієнта фото, 4 – відстань між губками штангенциркуля

Контур поверхні зсуву є досить хвилястим. Для визначення площі зсуву S використовували програмний комплекс Компас 3D. Для цього було сфотографовано фігури наплення зверху, як показано на рис. 10. Контур плями наплення на фото обведено замкнутою кривою Без'є, і за допомогою функції вимірювання площ програмного комплексу визначено площі контакту фігур наплення першого, другого і третього зразків з підкладкою.

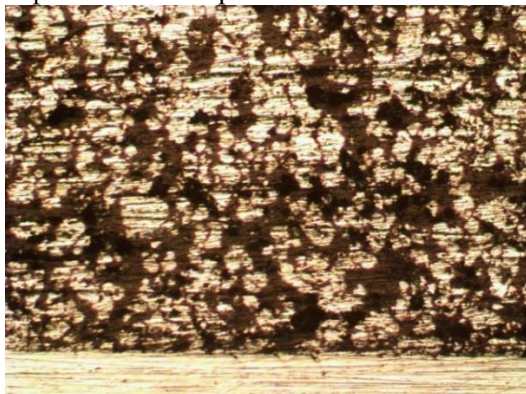
Результати вимірювань площ, сили зсуву фігури наплення і межі міцності на зсув наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

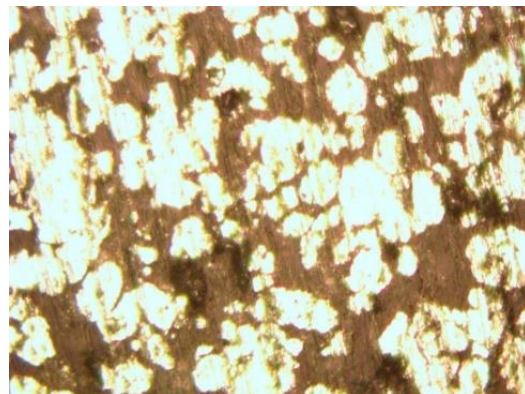
Результати вимірювань площ і межі міцності на зсув фігури наплення з підкладкою

№ зразка	Площа контакту фігури наплення з підкладкою, мм ²	Сила P в момент зсуву фігури наплення, Н	Межа міцності на зсув, МПа
I	29,47	173,6	5,79
II	44,69	188,2	4,12
III	58,55	151,5	2,55

Також було проведено металографічне дослідження покриття з порошку алюмінію. Відповідні мікрошліфи показані на рис. 11.



а



б

Рис. 11. Мікрошліфи покриття, напленого алюмінієвим порошком, при 80 кратному збільшенні (а) та при 200 кратному збільшенні (б).

Порошкові частинки алюмінію мають світлий колір на мікрошліфах, темний колір мають повітряні порожнини.



5. Висновки

Метод холодного газодинамічного напилення (ХГДН), крім того, що перетворився в один з всеосяжних процесів порошкового напилення з помітними результатами досліджень, значно розширився з роками. Продовжує вдосконалюватися обладнання для ХГДН з використанням сопла Де Лавала як інноваційного пристрою. Багато дослідників охарактеризували різні явища, що виникають в процесі формування функціональних покриттів.

Величезні можливості ХГДН були виявлені і ідентифіковані шляхом збору доступних в літературі даних. Грунтуючись на здатності ХГДН створювати покриття використовуючи кілька комбінацій матеріалів, метод систематично вдосконалюється. Метод ХГДН дозволяє формувати покриттів з різних композицій металевих та полімерних порошоків. Створюються теоретичні підходи до комп'ютерного моделювання процесів ХГДН, параметрів процесу, включаючи типи частинок порошку, їх розмір і морфологію, критичну швидкість, характеристики робочого газу, шорсткість поверхні підкладки і властивості матеріалів.

Розглянуто характеристики порошоків, що використовуються при ХГДН. Такими характеристиками є розмір, морфологія і властивості частинок. Розмір частинок порошку є основним фактором, який сприяв успішному нанесенню холодним напиленням, а також вибору типового розміру частинок на практиці. Попередній нагрів частинок також має важливу роль під час напилення, полегшуючи зв'язування за рахунок зміни механічних властивостей порошку. Показано, що нагрів порошкових часток знижує критичну швидкість, тим самим сприяючи адгезії та створенню покриттів на менших швидкостях.

Ефективність холодного газодинамічного напилення залежить виключно від: 1 – ударної поведінки параметрів процесу під час напилення, а також термічної кінетики частинок; 2 – оптимізації ефективності напилення; 3 – прогнозування структурних змін, які визначають остаточні властивості покриття.

В результаті експоненціального зростання результатів досліджень процесів ХГДН, у цьому десятилітті ми побачимо суттєве поліпшення технології за рахунок розробки і дослідження додаткових функціональних покриттів для використання в різних галузях промисловості.

У проведених дослідженнях показана можливість відновлення алюмінієвих блоків та головок двигунів автотракторної техніки сільськогосподарського призначення шляхом холодного нарощування алюмінію на пошкоджені ділянки відповідних поверхонь. Показано, що пористість отриманих покриттів коливається в межах 41–58 %. Коефіцієнт використання порошку коливається в межах 8–42,5 %, причому із збільшенням температури нагрівання порошку коефіцієнт його використання значно збільшується, але міцність зчеплення покриття з підкладкою зменшується. Результати дослідження міцності зчеплення алюмінієвого покриття з металевою підкладкою, яка коливається в межах 2,5–4,8 МПа, свідчать про можливість використання цих покриттів для відновлення деталей двигунів сільськогосподарської техніки.

Список використаних джерел

1. Villafuerte J. Current and future applications of cold spraying technology. *Met. Finish.* 2010. №108. P. 37–39.
2. Гайдамак О. Л., Матвійчук В. А., Кучеренко Ю. С. Перспективи створення полімерних функціональних покриттів із застосуванням газодинамічного напилення. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* №2(109). 2020. С. 105–112.
3. Шоринов А. В., Волков А. О., Маркович С. Е. Холодное газодинамическое напыление металлических покрытий на композиционные материалы и пластики: литературный обзор. *Вестник ХНАДУ*, вып. 81. 2018. С. 62–73.
4. Tinashe S. E. Conceptual Design of a Low Pressure Cold Gas Dynamic Spray (LPCGDS) System. *University of the Witwatersrand Paper.* 2010. P. 12–17.
5. Han Y. K., Birbilis N., Spencer K., Zhang M., Muddle B. C. Investigation of Cu coatings deposited by kinetic metallization, *Mater. Charact.* 61. 2010. P. 1167–1186.
6. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S., Jodoin B. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process, *Surf Coatings Technol.* 2009. №203. P. 2954–2960.
7. Hanft D., Glosse P., Denneler S., Berthold T., Oomen M. The aerosol deposition method: a modified aerosol generation unit to improve coating quality. *Material (Basel).* 2018. №11. P. 1–11.
8. Ganesan A., Yamada M., Fukumoto M. Cold spraying coating deposition mechanism on the thermoplastic and thermosetting polymer substrates. *J. Therm. Spray Technol.* 2013. №22. P. 1275–1282.
9. Yin S., Suo X., Liao H., Guo Z., Wang X. Significant influence of carrier gas temperature during the cold spraying processes. *Surf. Eng.* 2014. №30. P. 443–450.
10. Гайдамак О. Л., Савуляк В. И. Исследование функциональных покрытий, полученных газодинамическим напылением, и перспективы их применения в компьютерной технике. *Наукові праці ВНТУ.* 2017. №2 С. 1–7.
11. Yoon S., Kim H., Lee C. Fabrication of automotive heat exchanger using kinetic spraying process. *Surf. Coat. Technol.* 2007. №201. P. 9524–9932.



12. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу : пат. 110552 Україна, МПК С23С 24/00. заявник та патентовласник Гайдамак О. Л. №u201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. №1.
13. Oyinbo S. T., Jen T-Ch. A comparative review on cold gas dynamic spraying processes and technologies. *Manufacturing Rev.* 2019. 6, 25. P. 1–19.

References

- [1] Villafuerte, J. (2010) Current and future applications of cold spraying technology. *Met. Finish.* 108. 37–39. [in English]
- [2] Gaidamak, O.L., Matviichuk, V.A., Kucherenko, Y.S. (2020). Perspektivy stvorennia polimernih funkcionalnyh pokryttiv iz zastosuvannyam gazodynamichnogo napyleniia. *Technika, energetyka, transport APC.* 2(109). 2020. 105–112. [In Ukrainian].
- [3] Shorinov, A.V., Volkov, A.O., Markovich, S.E. (2018). Holodnoe gazodynamicheskoe napylenie metallicheskikh pokrytiy na kompozitsionnye materialy i plastiki: literaturniy obzor. *Vestnik HNADU*, 81. 62–73. [In Russian].
- [4] Tinashe, S.E. (2010). Conceptual Design of a Low Pressure Cold Gas Dynamic Spray (LPCGDS) System. *University of the Witwatersrand Paper.* 12–17. [in English]
- [5] Han, Y.K., Birbilis, N., Spencer, K., Zhang, M., Muddle, B.C. (2010). Investigation of Cu coatings deposited by kinetic metallization, *Mater. Charact.* 61. 1167–1186. [in English]
- [6] Robitaille, F., Yandouzi, M., Hind, S., Jodoin, B. (2009). Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. *Surf Coatings Technol.* 203. 2954–2960. [in English]
- [7] Hanft, D., Glosse, P., Denneker, S., Berthold, T., Oomen, M. (2018). The aerosol deposition method: a modified aerosol generation unit to improve coating quality. *Material (Basel)*, 11. 1–11. [in English]
- [8] Ganesan, A., Yamada, M., Fukumoto, M. (2013). Cold spraying coating deposition mechanism on the thermoplastic and thermosetting polymer substrates. *J. Therm. Spray Technol.* 22. 1275–1282. [in English]
- [9] Yin, S., Suo, X., Liao, H., Guo, Z., Wang, X. (2014). Significant influence of carrier gas temperature during the cold spraying processes. *Surf. Eng.* 30. 443–450. [in English]
- [10] Gaydamak, O.L., Savulyak, V.I. (2017). Issledovanie funkcionalnyh pokrytiy poluchennykh gazodynamicheskim napyleniem i perspektivy yh primeneniya v kompyuternoy tekhnike. *Naukovi praci VNTU*, 2. 1–7. [In Russian].
- [11] Yoon, S., Kim, H., Lee, C. (2007). Fabrication of automotive heat exchanger using kinetic spraying process. *Surf. Coat. Technol.* 201. 9524–9932. [in English]
- [12] Gaidamak, O. L (2016). Prustria dla gazodenamicheskoe npanesenia pokritei radialnogo podachi materialy. [3. Pat. 110552 Ukraine, IPC C23C 24/00. Device for gas-dynamic coating with radial flow of powder material; applicant and patentee Haidamak O.L. No. 201405543;] claimed 05/23/14; publ. 01/12/16, Bul. №1. [in Ukrainian].
- [13] Oyinbo, S.T., Jen, T-Ch. (2019). A comparative review on cold gas dynamic spraying processes and technologies. *Manufacturing Rev*, 6(25). 1–19. [in English]

ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Статья посвящена технологии холодного газодинамического напыления - относительно новой технологии создания функциональных покрытий в которой используются сужено-расширяющиеся сопла (сопла Де Лавалья), в которых со сверхзвуковой скоростью, или близкой к ней, напыляются твердые порошки в направлении детали, где они пластически деформируются и прилипают к ней.

Холодное газодинамическое напыление - инновационный процесс, который в последние годы получил широко растущий научный интерес и промышленное применение в областях автомобильной, аэрокосмической и биотехнологической промышленности. Напыление таким способом различных порошковых материалов обеспечивает защиту от коррозии и способно увеличивать механическую прочность и износостойкость деталей. Этим способом можно создавать функциональные покрытия с различными теплопроводностями и электропроводностями, которые могут быть использованы в качестве утеплителей, электропроводных и электроизоляционных поверхностных шаров, покрытий для регулирования зазоров, восстановления и ремонта деталей.

В статье рассмотрены современные разработки в области экспериментального анализа технологий и процессов холодного газодинамического напыления, определены системы холодного газодинамического напыления и формирования покрытий, описаны параметры и принципы процесса. Представлена разработанная в ВНАУ установка для напыления поверхностей и проведены исследования и анализ возможности использования метода холодного газодинамического напыления для восстановления деталей автотракторной техники сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, функциональные покрытия, параметры напыления, пластическая деформация.

Ф. 2. Табл. 3. Рис.11. Лим.13.



PROCESSES AND TECHNOLOGIES OF COLD GAS DYNAMIC SPRAYING OF AGRICULTURAL EQUIPMENT

The article is devoted to the technology of cold gas-dynamic spraying - a relatively new technology for creating functional coatings in which narrowed-expanding nozzles (De Laval nozzles) are used, in which solid powders are sprayed at or close to supersonic speed in the direction of the substrate, where they plastically deform and adhere.

Cold gas dynamic spraying is an innovative process that has received widespread scientific interest and industrial applications in the automotive, aerospace and biotechnology industries in recent years. Spraying various powder materials in this way provides protection against corrosion and can increase the mechanical strength and wear resistance of details. With that method it is possible to create functional coatings with different thermal conductivities and electrical conductivities, which can be used as insulation materials, conducting and isolation surface layers of parts, coatings for controlling gaps, restoring and repairing details.

The article discusses modern developments in the field of experimental analysis of technologies and processes of cold gas-dynamic spraying, the systems of cold gas-dynamic spraying and coating formation are determined and the parameters and principles of the process are described. The installation for spraying surfaces developed at VNAU is presented and researched and the analysis of possibility of use of a method of a cold gas-dynamic spraying for restoration of details of autotractor equipment of agricultural purpose are carried out.

Key words: cold gas-dynamic spraying, functional coatings, spraying parameters, plastic deformation.

F. 2. Table. 3. Fig. 11. Ref. 13.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: wnatalia@gmail.com).

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

Карпійчук Михайло Федорович – аспірант кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: ashenvale228@gmail.com).

Кучеренко Юлія Сергіївна – аспірантка кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: fortyna1910@gmail.com).

Веселовская Наталья Ростиславовна - доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Машин и оборудования сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: wnatalia@gmail.com).

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

Карпийчук Михаил Федорович - аспирант кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: ashenvale228@gmail.com).

Кучеренко Юлия Сергеевна - аспирантка кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: fortyna1910@gmail.com).

Nataliia Veselovska – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>).

Oleg Gaidamak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: gaidamak@vsau.vin.ua,).

Mykhailo Karpiichuk – Postgraduate Student of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: ashenvale228@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3958-4755>).

Jyulia Kucherenko – Postgraduate Student of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: fortyna1910@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3406-9850>).