

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Бугайчук Вікторія Валентинівна**

**УДК 621.791**

**Кваліфікаційна робота**

**Підвищення довговічності елементів трибоспряжень  
методами інженерії поверхні**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ В.В. Бугайчук

**Керівник роботи**

Савченко В.М.

к.т.н., доцент

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Бугайчук Вікторія Валентинівна. Підвищення довговічності елементів трибоспряжень методами інженерії поверхні.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі розроблено технологічні основи управління процесами структуро- та фазоутворення в покриттях та поверхневих шарах в умовах газополум'яного напилення, що базуються на використанні факторів, які стимулюють ініціативні дифузійні потоки, активують утворення адгезійних та когезійних зв'язків у сформованих покриттях та поверхневих шарах.

При розгляді деталі з покриттям як елемента динамічної системи, що розраховується на надійність, розроблено основи методології визначення необхідної величини адгезії напилених покриттів. Отримано чисельні рішення для покриттів, що наносяться на вали зі шківками та кривошипами, колінчасті вали, кульові опори, тонкостінні сферичні з'єднання, цапфи підшипників ковзання.

Розроблено метод активування процесу газополум'яного напилення покриттів із дротяних матеріалів за рахунок генерування в повітряному потоці ультразвукових коливань, які передаються дроту, що розпилюється. Дослідження характеристик опору втомному руйнуванню показали, що покриття, нанесені газополум'яним розпиленням дротів, викликають незначне зниження межі витривалості (10-13%) порівняно з покриттями, отриманими вібродуговою наплавкою, що знижують межу витривалості на 35-40%.

*Ключові слова:* газополум'яне напилення, технологія, трибоспряження, зносостійкість, довговічність, деталь.

## ANNOTATION

**Bugaychuk Victoria Valentinovna.** Improving the Durability of Tribocouple Elements by Surface Engineering Methods. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the master's work the technological bases of control of processes of structure and phase formation in coverings and surface layers in the conditions of gas-flame spraying based on use of the factors stimulating initiative diffusion streams, activate formation of adhesive and cohesive communications in the formed coverings and surface are developed. .

When considering a part with a coating as an element of a dynamic system based on reliability, the basics of the methodology for determining the required amount of adhesion of sprayed coatings are developed. Numerous solutions have been obtained for coatings applied to shafts with pulleys and cranks, crankshafts, ball bearings, thin-walled spherical joints, and bearings of plain bearings.

A method has been developed to activate the process of gas-flame spraying of coatings made of wire materials by generating ultrasonic vibrations in the air flow, which are transmitted to the sprayed wire. Studies of the resistance to fatigue failure have shown that gas-flame spray coatings cause a slight decrease in the endurance limit (10-13%) compared to coatings obtained by vibroarc surfacing, which reduces the endurance limit by 35-40%.

*Key words: gas-flame spraying, technology, tribocoupling, wear resistance, durability, detail.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. РОЗРОБКА ГАЗОПОЛУМ'ЯНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АКТИВОВАНОГО НАПИЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНІХ ПОТОКІВ.....	9
РОЗДІЛ 2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ГАЗОПОЛУМ'ЯНОГО НАПИЛЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ.....	35
ВИСНОВКИ.....	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Технологічні процеси інженерії поверхні належать до ефективних засобів поліпшення фізико-механічних і триботехнічних властивостей елементів вузлів тертя мобільних машин та технологічного обладнання. Методи інженерії поверхні включають як нанесення на робочу поверхню покриттів з іншого матеріалу (газотермічне напилення, електрохімічне осадження, фрикційне плакування, лазерна наплавка та ін.) [1-5], так і реконструкцію поверхні (зміна її структурно-фазового стану) без нанесення додаткових покриттів, до яких можна віднести мікродугове оксидування, трибомеханічну обробку, іонну імплантацію та ін [4-8].

Найважливішою причиною ефективного застосування методів поверхневої інженерії є їх активування, що забезпечує інтенсифікацію процесу обробки, модифікування структури шарів, що формуються, підвищення ефективності процесу обробки тощо. Як активуючі фактори при реалізації процесів поверхневої інженерії можуть виступати різні прийоми підвищення кінетичної енергії розпилювального струменя або зміни умов диспергування матеріалу, що розпорошується, а також методи зміни характеру структуроутворення формованих покриттів або поверхневих шарів, зокрема введенням до складу технологічних середовищ нанорозмірних компонентів.

Фізичною основою модифікування покриттів та поверхневих шарів нанорозмірними добавками є їх потенційні можливості утворювати іонні та координаційні зшивки, що обмежують рухливість молекулярних ланцюгів або їх сегментів, виявляти когезійні та адгезійні взаємодії та ін., дозволяють значно покращити експлуатаційні властивості гальванопокриттів. Наночастинки, осідаючи з іонами металу на поверхню підкладки, виступають у ролі додаткових центрів кристалізації, що забезпечує отримання покриттів з дрібнодисперсною структурою та високими фізико-механічними та триботехнічними характеристиками. Нанорозмірні алмазно-графітові добавки при фрикційному

плакуванні гнучким інструментом сприяють формуванню наноструктурованих покриттів, що відрізняються підвищеним рівнем антифрикційних та протизносних властивостей. Застосування вуглецевих наночастинок в електролітах для мікроплазмової обробки інтенсифікує швидкість кристалізації продуктів мікродугового впливу на поверхню, що оксидується, істотно скорочуючи тривалість мікроплазмової обробки виробів при одночасному забезпеченні підвищених фізико-механічних і триботехнічних властивостей оксидокерамічних покриттів. Наночастинки, введені до складу мастильного середовища, надають комплексний вплив на трибосистему в процесі контактної взаємодії, збільшуючи її довговічність за рахунок формування розділових шарів підвищеної несучої здатності, забезпечення стабільності реологічних характеристик мастильного шару в розширеному температурному діапазоні, а також модифікування поверхневих шарів елементів пари тертя шляхом зменшення шорсткості поверхні та її зміцнення.

У ряді модифікуючих добавок, що включає нанорозмірні частинки металів, оксидів, карбідів, боридів та ін., найбільше практичне застосування для модифікування покриттів та поверхневих шарів отримали вуглецеві наноматеріали (вуглецеві нанотрубки, фулерени, ультрадисперс). Застосування ультрадисперсних алмазно-графітових частинок детонаційного синтезу для одержання нанокомпозитів антифрикційного призначення є надзвичайно перспективним у силу як мінімум двох обставин. По-перше, нанорозмірні алмазнографітові частинки поєднують у собі надвисоку твердість їх алмазного ядра і високі антифрикційні властивості шаруватої графітовмісної оболонки з підвищеною поверхневою активністю та структуроутворюючими якостями ультрадисперсного середовища. По-друге, детонаційний синтез алмазно-графітової шихти є в даний час практично єдиним прикладом технології отримання наночастинок у промислових обсягах, що створює сприятливі передумови для розробки економічно виправданих технологій формування

покривів та поверхневих шарів антифрикційного призначення з використанням алмазнографітових нанорозмірів модифікуючих добавок (АНМД).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення зносостійкості поверхонь деталей сільськогосподарських машин методами інженерії поверхні.

Відповідно до мети досліджень передбачено рішення наступних задач:

- виявити закономірності структуро- та фазоутворення в покриттях та поверхневих шарах в умовах газополум'яного напилення;
- розробити технологію газополум'яного напилення з використанням супутніх потоків.

**Об'єкт дослідження:** процес газополум'яного напилення швидкозношуваних деталей сільськогосподарських машин.

**Предмет дослідження:** закономірності структуро- та фазоутворення в покриттях та поверхневих шарах в умовах газополум'яного напилення, що базуються на використанні факторів, які стимулюють ініціативні дифузійні потоки, активують утворення адгезійних та когезійних зв'язків у сформованих покриттях та поверхневих шарах.

**Методи дослідження.** Основні завдання роботи вирішувалися з урахуванням поєднання теоретичних і експериментальних методів дослідження. Дослідження проведені з використанням загальнонаукових методів пізнання, прикладної фізики, інженерії поверхні та триботехніки. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою методів математичної статистики.

#### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. Савченко В. М., Кукал Д. А., Новицький О. Р., Бугайчук В. В., Примак М. А. Обробка деталей сільськогосподарських машин наклепом. Збірник тез доповідей XXII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячену 121-річчю з дня народження академіка

Петра Мефодійовича Василенка, 16–18 жовтня 2021 року, м Ніжин. Ніжин. 2021. С. 204-206.

2. Савченко В. М., Шклярчук Ю.П, **Бугайчук В.В**, Федорчук А.М., Губерт Н. В. Вплив абразивних властивостей ґрунтів на інтенсивність зношування робочих органів. Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні: Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Бахмут, 25-26 листопада 2021 р.) / Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії [упоряд. П.О. Чикунов]. Бахмут: ННППІ УПА, 2021. С. 114-115.

3. Савченко В., Шклярчук Ю., Павлюк І., Літвінець В., Новицький О., Бугайчук В. Механізми мікролегування конструкційних сталей бором. Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. 2021.. С. 37

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблений спосіб підвищення зносостійкості швидкозношуючих робочих органів і деталей сільськогосподарських машин за рахунок використання газополум'яного напилення

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 45 сторінок комп'ютерного тексту, 19 рисунків.



## РОЗДІЛ 1

### РОЗРОБКА ГАЗОПОЛУМ'ЯНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АКТИВОВАНОГО НАПИЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНІХ ПОТОКІВ

Як випливає з відомих теоретичних досліджень процесу активування газополум'яного напилення супутніми потоками, для збільшення швидкості частинок розміром близько 50 мкм в 1,5-2 рази необхідно, щоб швидкість супутнього потоку перевищувала швидкість основного струменя в 1,3-1,6 рази. Найбільш простим методом підвищення кінетичних параметрів газопорошкового потоку є активація газовими струменями, що стискають факел полум'я і прискорюють політ частинок.

Активатори, що рекомендуються до використання на обладнанні з торговими марками «Metco» та «Castolin» для напилення порошків з тугоплавких матеріалів, є двома штуцерами, встановленими на кожусі розпилювальної головки пістолета і підключені до рукава високого тиску, по якому подається осушене повітря [13]. Струмені повітря, виходячи зі штуцерів під тиском 0,3-0,6 МПа, обжимають факел і збільшують швидкість польоту частинок порошку.

Розроблений повітряний активатор виконаний таким чином, щоб кут атаки струменя повітря по відношенню до осі факела полум'я міг змінюватися від 0 до 70 ° (рис. 1.1).

Експериментальні дослідження процесу повітряної активації виконувались на установках УПТР-1-90 та ТЕРКО при напиленні порошків окису алюмінію та карбіду хрому, плакірованого нікелем. Швидкість руху частинок реєструвалася за допомогою приладу ІССО-1.

При нульовому углі, тобто коли осі повітряних струменів активатора паралельні осі факела (схема, що реалізується в установках фірми «Castolin + Eutectic»), помітне збільшення швидкості польоту частинок на дистанції 100-150

мм вдається отримати при тиску повітря в рукаві більше 0,4 МПа (при витраті 0,35 м<sup>3</sup>/хв). Для збільшення швидкості польоту частинок окису алюмінію та карбиду хрому з 40 до 52 м/с необхідно збільшити тиск до 0,55 МПа. На дистанції понад 150 мм вплив струменя активатора незначний (Рис. 1.2).

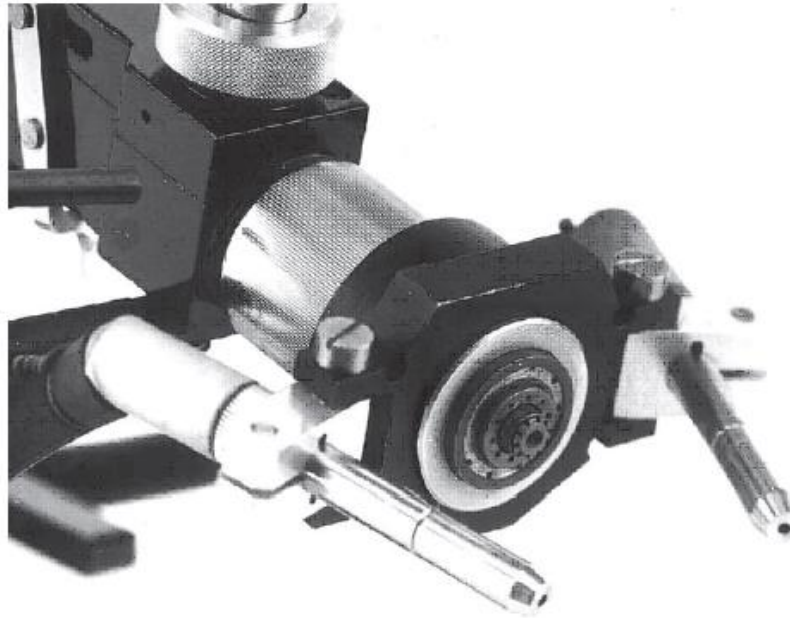


Рис. 1.1. Повітряний активатор встановлений на порошковому терморозпилювачі установки УПТР-1-90

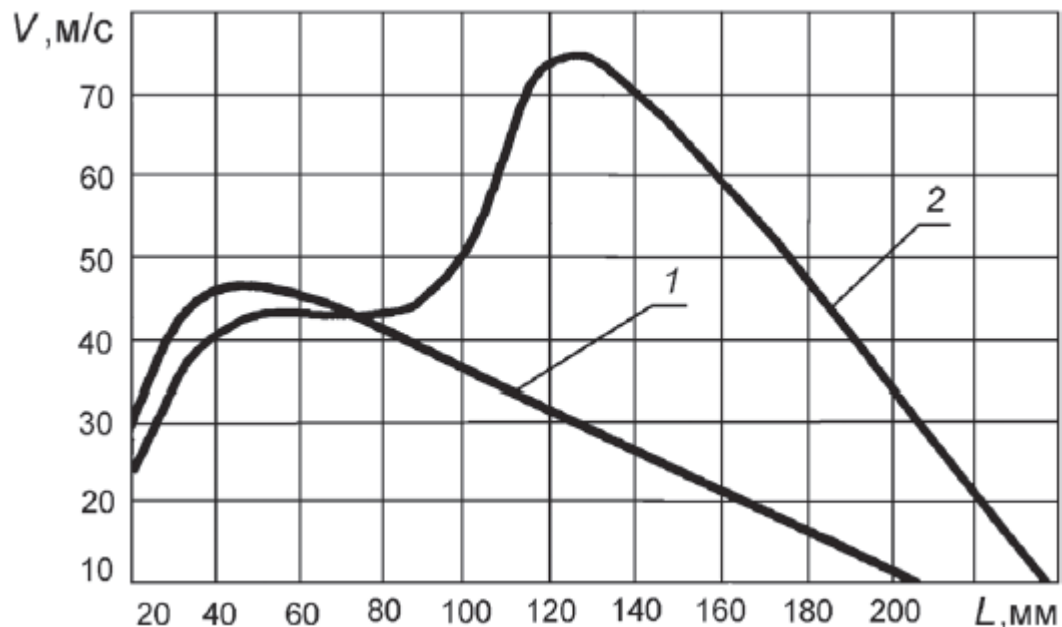


Рис. 1.2. Зміна швидкості руху частинок порошку  $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Ni}$  розміром 50–60 мкм за довжиною факела пропан-бутан кисневого полум'я без використання активатора (1) та з активатором (2) ( $\varphi = 30^\circ$ , витрата повітря 0,32 м<sup>3</sup>/хв).

Зі збільшенням кута атаки струменів швидкість польоту частинок на дистанції 100-150 мм зростає, досягаючи свого максимуму при кутах атаки близько  $30^\circ$  (Рис. 1.2), тобто на відстані близько 100 мм від зрізу сопла терморозпилювального пістолета. Подальше збільшення кута атаки знижує швидкість, і при кутах більше  $55^\circ$  струмені активатора мають гальмівну дію. Пористість покриттів (рис. 1.3) також досягає мінімуму при кутах близько  $30^\circ$ . Отримані експериментальні дані підтверджують результати теоретичних досліджень.

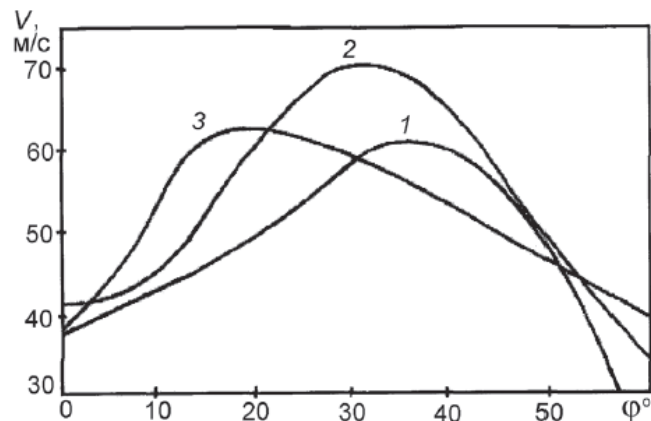


Рис. 1.2. Вплив кута атаки струменів активатора на швидкість польоту частинок порошків розміром  $\sim 50$  мкм на різних дистанціях:

1 – 90 мм; 2 – 120 мм; 3 – 150 мм (тиск повітря 0,5 МПа, витрата 0,32 м<sup>3</sup>/хв)

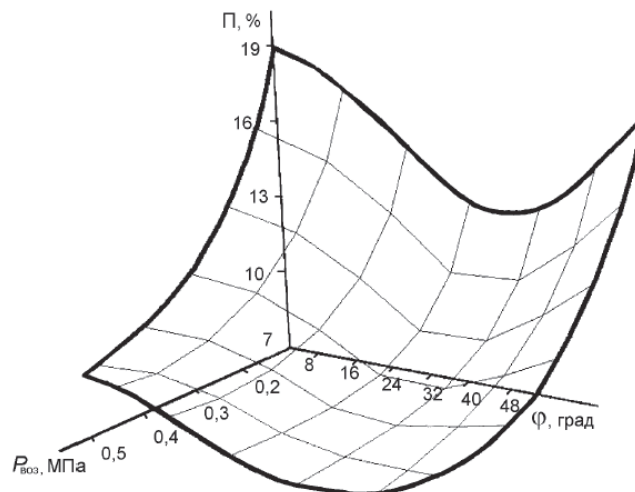


Рис. 1.3. Вплив тиску в супутньому потоці та кута атаки струменів активатора на пористість покриттів  $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Ni}$

Підвищення тиску повітря від 0,2 до 0,65 МПа у соплових каналах повітряного активатора (Рис. 1.1) викликає пропорційне збільшення швидкості частинок (Рис. 1.3). Зі зростанням розміру частинок порошку знижується їхня максимальна швидкість і подовжується дистанція до точки максимального розгону. Оскільки час перебування частинок у високотемпературному потоці зменшується зі збільшенням швидкості, падає і ступінь їхньої термічної активації. Виходячи з цього активатор доцільно використовувати при напиленні дрібних фракцій.

Для активованого напилення матеріалів з низькою теплопровідністю запропоновано використовувати додатковий факел, джерелом якого є газокиснева суміш, що є внутрішнім супутнім потоком. Додатковий факел горить на відстані, де частинки досягли максимально можливої температури від нагрівання в первинному факелі на відстані від зрізу сопла терморозпилювача.

У дослідженнях, присвячених газотермічному напиленню оксидів, скла та інших матеріалів з низькою теплопровідністю, зазначається, що традиційним методом ДПН дуже важко отримати якісні покриття з багатьох матеріалів, незважаючи на те, що їх температура плавлення близька до температури плавлення сплавів на основі міді або заліза. З одного боку, неможливо збільшити температуру полум'я або щільність теплового потоку, з іншого – не можна зменшити швидкість польоту частинок з метою їхнього кращого прогріву без зниження теплофізичних характеристик факела.

Виходячи з існуючих цих обмежень, з урахуванням технічних можливостей потенційних виробників обладнання ДПН та їх споживачів вирішувалося завдання розробки методу, що дозволяє за мінімальних додаткових витрат досягти можливості нанесення шарів із порошків матеріалів з низькою теплопровідністю.

У відомих роботах, присвячених підвищенню динамічних та теплофізичних параметрів газопорошкового потоку при ДПН, пропонується здійснювати додаткове нагрівання та прискорення частинок за рахунок

концентричного охоплення першого факела вторинного газового факела. Вторинний факел формують шляхом розташування ще одного соплового наконечника, що концентрично охоплює первинний факел. Другий сопловий наконечник роблять водоохолоджуваним, щоб виключити його нагрівання від первинного факела і запобігти налипанню частинок, що напиляються. Дана схема та пристрій для її реалізації мають низку істотних недоліків. Оскільки максимальна щільність теплового потоку вторинного факела в зоні його формування досягається на периферії фронтального перерізу первинного факела, а не в центрі, де летять частки порошку, останні не мають змоги прогрітися до температур, що дозволяють формувати якісні покриття. Необхідність використання води для охолодження додаткового сопла обмежує можливості обладнання.

Факел полум'я терморозпилювача є, за визначенням, прийнятим у газодинаміці горіння, стаціонарним дифузійним полум'ям і підпорядковується законам, встановленим Ле Шательє для поширення полум'я попередньо змішаних горючих газів.

Коли швидкість струменя суміші робочих газів невелика, перебіг продуктів згорання у факелі є ламінарним, межа полум'я стійка, горіння протікає спокійно. У міру збільшення швидкості струменя висота полум'я збільшується до певної граничної величини. При подальшому підвищенні швидкості струменя межа полум'я стає нестійкою, причому нестійкість спочатку виникає лише у вершини полум'я, а потім поступово поширюється вниз до зрізу сопла. Одночасно різко зменшується висота полум'я. При подальшому збільшенні швидкості струменя (збільшуючи плавно витрати робочих газів) висота полум'я перестає залежати від швидкості, межа полум'я різко пульсує, горіння супроводжується шумом. При ще більш високій швидкості струменя полум'я відривається від сопла і встановлюється на певній відстані над соплом. Полум'я такого типу у зарубіжній літературі називають «підніманням», а у вітчизняній – «палаючим з відривом» (рис. 1.4).

Використовуючи ефект горіння з відривом, було запропоновано утворювати вторинний факел на певній відстані від сопла терморозпилювача за рахунок високої швидкості подачі робочої суміші. При цьому можливе кілька варіантів газополум'яного наплення з використанням комбінованого смолоскипа. Один з них полягає в транспортуванні порошку первинним факелом, а вторинний факел формують первинним, що охоплює. У другому варіанті вторинний факел запалюється всередині співвісно розташованого первинного, а порошок транспортують між факелами (Рис. 1.5).

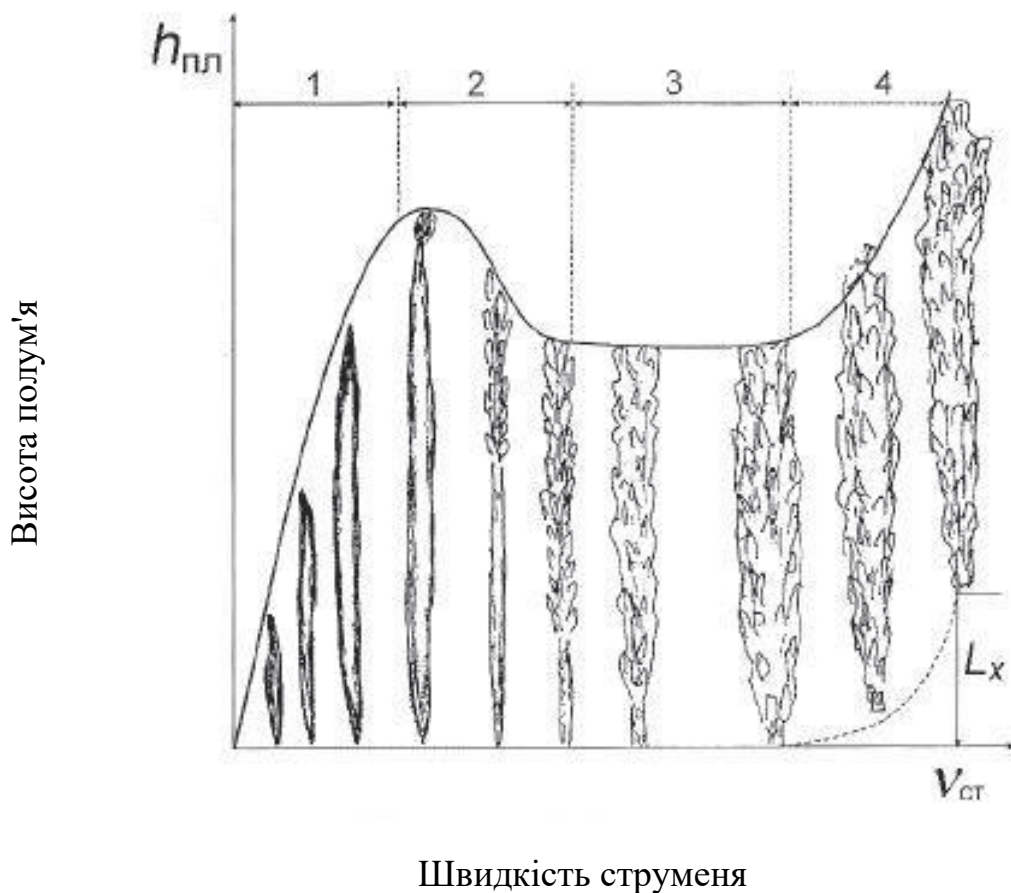


Рис. 1.4. Вид полум'я в залежності від швидкості закінчення робочих газів

Запалювання вторинного факела необхідно здійснювати у тій зоні, де зниження теплових параметрів первинного факела настільки відчутне, що припиняється зростання температури частинок. Виходячи з цього, було виконано теоретичну оцінку відстані  $L_x$ , в результаті якої визначили, що для часток розміром близько 50 мкм величина  $L_x$  знаходиться в межах 140-170 мм.

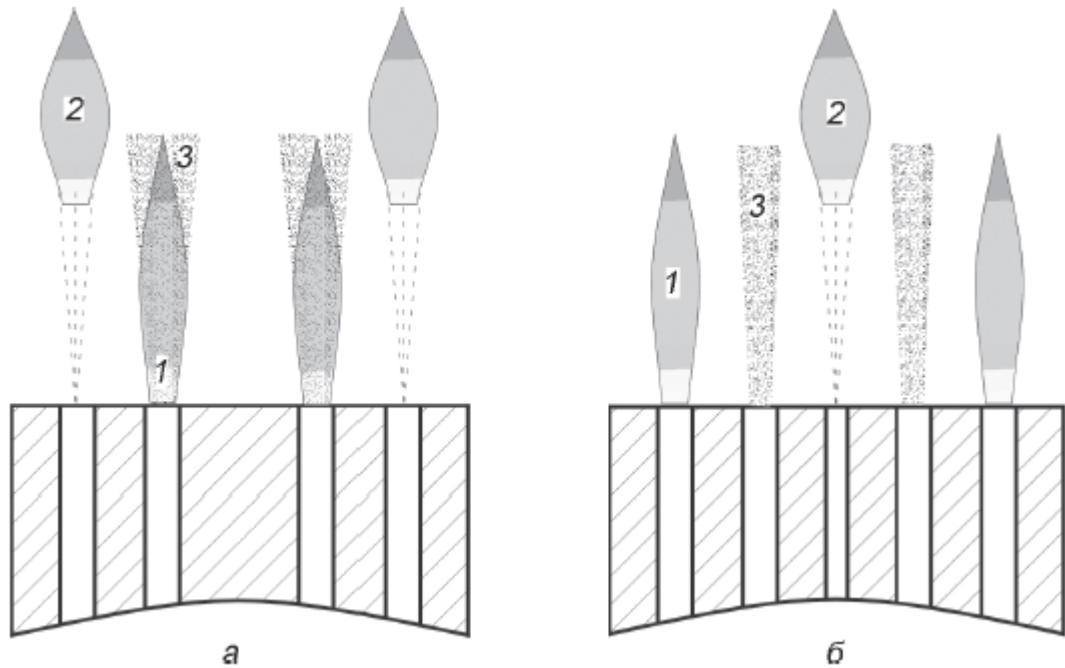


Рис. 1.5. Варіанти наплення комбінованим факелом з транспортуванням порошку первинним факелом (а) та з транспортуванням порошку між факелами (б): 1 – первинний факел; 2 – вторинний факел; 3 – порошок, що напеляється.

Можливість виникнення явища відриву полум'я залежить від перерізу сопла, що визначає швидкість закінчення горючої суміші при даній її витраті, і від складу суміші, що зумовлює витрату та швидкість поширення полум'я.

Для визначення діаметра прохідного перерізу сопла використовували формулу:

$$V_{cm} = 125\gamma_{cm}D\alpha, \quad (1.1)$$

де  $V_{cm}$  – гранично допустима швидкість закінчення суміші із сопла, м/с;

$\gamma_{cm}$  – коефіцієнт швидкості розповсюдження полум'я горючої суміші,  $s^{-1}$  ( $\gamma_{cm} = 1$  для стехіометричної суміші кисню з ацетиленом;  $\gamma_{cm} = 0,27$  для стехіометричної суміші кисню з пропан-бутаном);

$D\alpha$  – ефективний діаметр, м ( $D\alpha = d_c^{0,37}$ , де  $d_c$  – діаметр перерізу сопла, м).

Швидкість закінчення горючої суміші може бути визначена також із наступного виразу:

$$V_{cm} = \frac{k_q G_s}{d_c n_k}, \quad (1.2)$$

де  $G_s$  – витрата горючої суміші, що витікає з сопла,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$n_k$  – число каналів у сопловому наконечнику;

$k_g$  – коефіцієнт, що дорівнює 354,  $\text{м}^{-1}$ .

Вирішуючи спільно вирази (1.1) і (1.2), отримаємо формулу для визначення величини критичної витрати горючої суміші, нижче за яку факел горить у зрізу сопла, а вище – виникає явище відриву:

$$G = \frac{125 d_c D_a n_k \gamma_{cm}}{k_q}, \quad (1.3)$$

Підставляючи значення  $n_k$  і  $d_c$ , що відповідають діаметрам соплових отворів та їх числу в апаратів типу УПТР і у газозварювальних пальників типу ГС-57, ПММ-53, отримаємо, що гранична кількість ацетилен-кисневої суміші більша на 25-40 %, ніж гранична кількість суміші. Виходячи з цього, доцільніше для формування вторинного факела використовувати пропан-кисневу суміш.

Для дослідження залежності критичної витрати пропан-кисневої суміші від прохідного перерізу каналів соплового наконечника та впливу витрати на величину  $L_x$  були проведені експерименти з використанням пальника для газопорошкового наплавлення. Пальник працював у безінжекторному режимі, висота відриву полум'я реєструвалася при використанні різних сопел з каліброваними каналами діаметром від 0,75 до 4 мм.

Встановлено, що збільшення діаметра вихідного отвору (прохідного перерізу) більше 3,5 мм не істотно впливає на величину критичної витрати суміші (до появи ефекту відриву факела). У межах  $d_c$  від 0,75 до 2,5 мм значення критичної витрати суміші збільшується від 34 до 55  $\text{м}^3/\text{год}$ . Оскільки більшість апаратів для газополум'яного напилення (при використанні як пального газу пропану) розраховано на сумарний прохідний переріз 10,8-11,6  $\text{мм}^2$ , у подальших експериментах використано сопло з каналом діаметром 3,8 мм.



## **Висновок по розділу**

Досліджувалась залежність висоти відриву факела від витрати робочої суміші. Встановлено, що для досягнення дистанції відриву 150-160 мм потрібно забезпечити витрату суміші до 7 м<sup>3</sup>/год, що легко забезпечується використовуваними в установках ТЕРКО пультами керування подачею робочих газів.

## РОЗДІЛ 2

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження, виконані на модернізованому терморозпилювачі (рис. 2.1 а), показали, що при використанні подовженого факела вдається формувати покриття з порошкових матеріалів з теплопровідністю (2-5) Вт/м·град. На фото поверхні покриттів (Рис. 1.6 б, в), виконаних за допомогою скануючого мікроскопа «Stereoscan 240», чітко видно розплавлені та деформовані частинки склоемалей. Нічого подібного не можна було досягти з використанням традиційних газополум'яних систем.

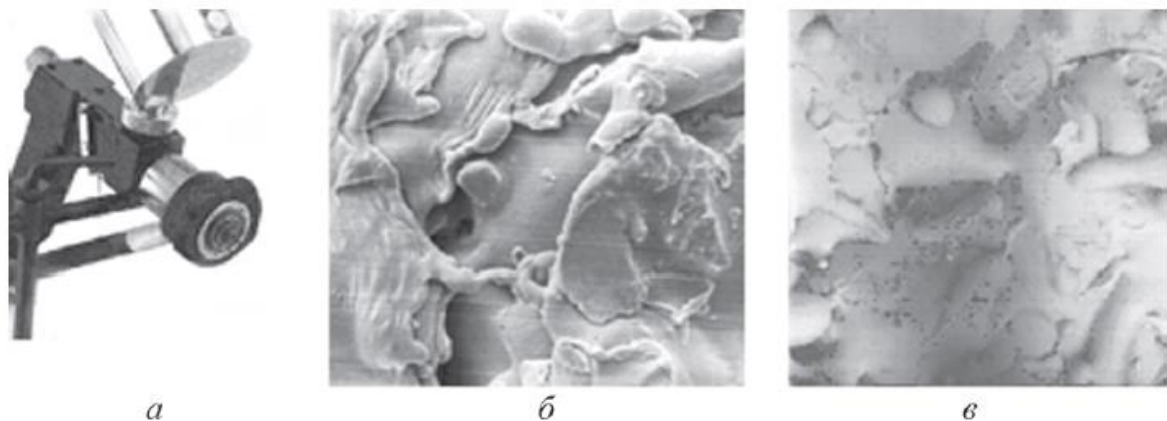


Рис. 2.1. Терморозпилювач УУТР з додатковим кільцевим соплом (а) та мікротопографії покриттів ( $\times 400$ ), отриманих активованим напиленням порошків емалей «Пес-104» (б) та «Грунт-117» (в).

Аналіз результатів дослідження температури факела за допомогою калориметричного зонда показав, що активну зону факела вдалося збільшити на 100-150 мм (рис. 2.2), причому дистанція напилення матеріалів із низькою теплопровідністю може становити 300-350 мм. Витрати нанесення покриттів дещо зросли у зв'язку із збільшенням витрат робочих газів. Але, враховуючи відносно невелику вартість пропану та кисню, загальна собівартість процесу залишилася значно нижчою за інші методи газотермічного напилення.

Для забезпечення високої щільності та адгезії покриттів (пористість менше 8 % і міцність зчеплення на відрив 45-50 МПа) у практиці газотермічного напилення використовують пристрої, що дозволяють підвищити динамічні параметри двофазного потоку та забезпечити швидкість частинок, що напиляються, більше 200 м/с. Досягнення таких швидкостей забезпечується, як правило, за рахунок витікання газових струменів під певним тиском через спеціальні сопла.

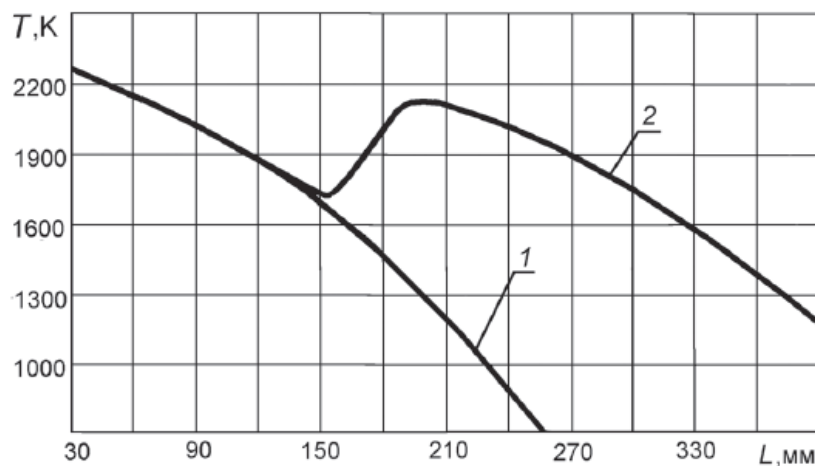


Рис. 2.2. Зміна температури по осі пропан-бутан кисневого факела (1) та комбінованого факела (2).

Принцип дії розроблених у США установок для високошвидкісного газополум'яного напилення заснований на тому, що утворену за рахунок спалювання в камері внутрішнього згоряння за певних умов різних вуглеводневих палив високоенергетичний струмінь, що витікає з сопла Лавалю, подають присадний матеріал, який потім формує покриття. Однак високошвидкісні установки мають камери згоряння великих габаритів (довжина  $\sim 270\text{--}350$  мм), витрачають не менше  $3,9$  м<sup>3</sup>/год пропану та до  $3$  м<sup>3</sup>/хв стисненого повітря при тиску  $0,4$  та  $0,6$  МПа відповідно, що зумовлює можливість використання вищезгаданих пристроїв тільки в стаціонарних умовах.

У ході теоретичного аналізу було показано, що для досягнення швидкості частинок близько  $300$  м/с необхідно створити супутній потік, що рухається зі швидкістю  $900\text{--}1000$  м/с. Запропоновано використовувати як джерело

високоенергетичного супутнього потоку камеру згоряння пропано-повітряної суміші. При цьому необхідно було розробити таку конструкцію камери, яка дозволяла спалювати досить велику кількість горючої суміші і в той же час повинна бути сумісна з порошковим терморозпилювачем, що має відносно невеликі розміри.

Відповідно до сучасних уявлень газової динаміки, струмінь, що витікає з камери згоряння в атмосферу, є затопленим газовим струменем, що має дві ділянки: початковий і основний. На початковій ділянці струменя параметри газу залишаються незмінними та рівними параметрам газу на зрізі сопла. На основній ділянці відбувається інтенсивне змішування газового струменя з навколишньою атмосферою, при цьому змінюються динамічні та теплофізичні параметри струменя.

Відомо, що максимальна швидкість закінчення газового струменя досягається під час руху через сопло з конфузorno-дифузornoним каналом, назване надзвуковим соплом Лавалю. При цьому швидкість струменя на зрізі сопла визначається за формулою:

$$V_c = \sqrt{2g \frac{k_a}{k_a-1} R_g T_0 \left(1 - \beta_p \frac{k_a}{k_a-1}\right)}, \quad (2.1)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;

$k_a$  – показник адіабати;

$R_g$  – газова стала;

$T_0$  – температура газу перед критичним перетином сопла Лавалю;

$\beta_p$  – показник перепаду тиску.

Збільшити швидкість струменя можна за рахунок підвищення температури та тиску газу перед критичним перерізом сопла.

Розрахунок швидкості закінчення струменя проводився для тиску газу перед критичним перетином сопла до 5,0 МПа та інтервалу температур від 2070 до 3420 К, що відповідає інтервалу температур полум'я вуглеводнів.

При розширенні надзвукового сопла газ збільшує швидкість і при цьому охолоджується. Температура на зрізі сопла визначається за формулою:

$$T_c = T_0 - \frac{V_c^2}{2g \frac{k_a}{k_a-1} R_2}, \quad (2.2)$$

Підставляючи значення  $T_c$  у рівняння стану можна визначити густину газового потоку на початковій ділянці струменя  $\rho_c$ .

$$\rho_c = \frac{\rho_{вн} T_{вн}}{T_c - \frac{V_c^2}{2g \frac{k_a}{k_a-1} R_2}}, \quad (2.3)$$

де  $\rho_{вн}$  – густина газу в навколишній атмосфері;

$T_{вн}$  – температура газу в навколишній атмосфері.

Представивши у графічному вигляді залежності швидкості та щільності струменя від тиску та температури, зауважимо, що при збільшенні тиску понад  $\sim 1,0$  МПа зростання швидкості струменя різко уповільнюється, а при подальшому підвищенні тиску аж до 5,0 МПа швидкість потоку зростає лише на 20 %.

Витрата газу визначається наступним виразом:

$$G_2 = \rho_c F_c V_n, \quad (2.4)$$

де  $G_2$  – витрата газу;

$F_c$  – площа поперечного перерізу випускного сопла.

Витрати газу збільшується прямо пропорційно швидкості газового потоку (при  $F_c = \text{const}$ ). Отже, підвищувати тиск понад 1,0 МПа нерационально.

Підвищення температури газу перед критичним перетином сопла призводить до безперервного зростання швидкості струменя.

Таким чином, збільшення температури газового струменя підвищує швидкість його закінчення і знижує щільність. Швидкісний напір струменя при цьому не змінюється. Підвищення тиску газу перед критичним перетином сопла збільшує швидкісний напір струменя, а отже, збільшує силу, що діє на частинку, поміщену в цей потік.

Аналіз отриманих результатів показує, що температуру попереднього нагріву супутного потоку, що активує, доцільно обмежувати величиною 2300-2500 К, а тиск - 0,8 МПа, так як подальше підвищення цих параметрів незначно впливає на теплові і динамічні параметри частинок.

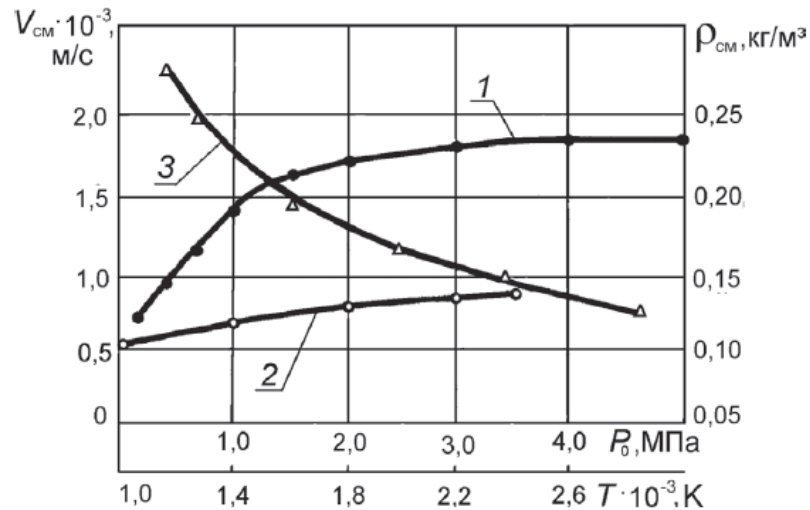


Рис. 2.3. Зміна швидкості (1, 2) та щільності (3) струменя зі збільшенням тиску (1) та температури (2, 3) пропано-повітряної суміші перед критичним перетином сопла.

Враховуючи дані по температурі та тиску, було виконано розрахунок розмірів камери згоряння, необхідних для формування високоенергетичного супутнього потоку. Використовуючи необхідні для формування супутнього потоку обсяги горючих сумішей, а також дані теплової напруженості камер і коефіцієнтів виділення тепла, були виконані розрахунки, що показали, що розміри камери при традиційному варіанті спалювання суміші значно перевищують розміри терморозпилювача, так як компоновка камери і пістолета в єдину установку дуже складна. Метою виконаних подальших досліджень було визначення можливих шляхів зменшення габаритних розмірів камери для формування високошвидкісного супутнього потоку за умови забезпечення у нього необхідних теплофізичних та динамічних параметрів.

Відомо, що горіння газоповітряних сумішей в макроскопічно неоднорідних гетерогенних системах з упорядкованим розподілом наскрізних отворів (перфорованих системах) дозволяє спалювати значно більшу кількість горючої

суміші в малих обсягах, без видимого полум'я і при зниженні вмісту окислів вуглецю та окислів азоту.

У перфорованій системі заздалегідь підготовлена газоповітряна суміш проходить через паралельні циліндричні канали певного перерізу. Горіння в початковий період відбувається в зоні малої товщини над поверхнею, а потім полум'я заходить в гирло каналів. Завдяки цьому вогнева поверхня розігрівається до температури 1000-1200 К.

Елемент прогрівається вглиб і здійснює попередній підігрів горючої суміші. Збільшення швидкості розповсюдження полум'я внаслідок підігріву суміші в каналах призводить до підвищення стійкості горіння на перфорованому елементі до відриву полум'я. Відрив полум'я в перфорованих насадках може бути досягнутий лише при дуже великих витратах газу, тому він не є межею, що обмежує область сталої роботи камери.

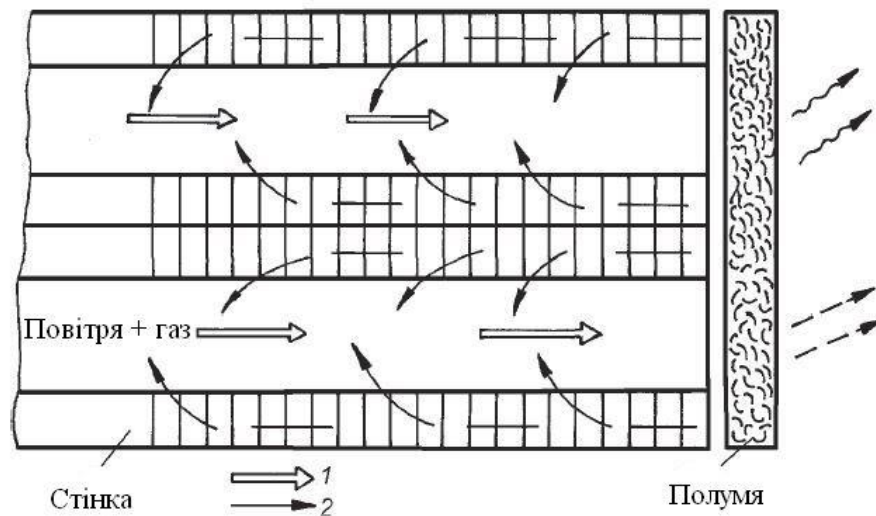


Рис. 2.4. Схема розподілу теплових потоків у керамічному перфорованому елементі при спалюванні газу на його поверхні.

Використовуючи принцип мікрофакельного спалювання газоповітряної суміші в каналах керамічного перфорованого елемента для отримання вихідного високошвидкісного потоку, було запропоновано два основних варіанти пристроїв, що реалізують ефект мікрофакельного горіння в активаторах установок високошвидкісного наплення (рис. 2.5).

Один з варіантів розробленого пристрою для високошвидкісного газотермічного напилення (рис. 2.5, а) складається з корпусу 1, що містить сопловий канал 2, вогнетривкого перфорованого елемента 3, встановленого в камері згоряння перпендикулярно її осі і розділяє об'єм камери на порожнину змішування 4 і порожнину спалювання суміші 5, вузла подачі витратного матеріалу (не показаний) з мундштуком 6, поміщеним в отвір перфорованого елемента 3, виконаного по його осі, пристрої запалювання робочої суміші 7, електроди якого встановлені в порожнині спалювання 5 в безпосередній близькості до вогневої поверхні 8 перфорованого елемента 3, паливного 9 і повітряного 10 жиклерів, що відкриваються безпосередньо в порожнину змішування 4. Окислювач і паливо надходять через повітряний і паливний жиклери 9 і 10 відповідно, порожнину змішування 4, де утворюється горюча суміш. З порожнини змішування 4 через канали, виконані в вогнетривкому перфорованому елементі 3, горюча суміш, продовжуючи інтенсивно перемішуватися, надходить у порожнину спалювання робочої суміші 5 і займається за допомогою пристрою запалювання робочої суміші 7, електроди якого встановлені в безпосередній близькості до вогневої поверхні 8 перфорованого елемента У процесі роботи, у міру того як нагріваються деталі та елементи пристрою високошвидкісного напилення, швидкість горіння робочої суміші збільшується і полум'я втягується у зазначені канали вогнетривкого перфорованого елемента 3. Причому горіння суміші за перфорованим елементом 3 йде в зоні малої товщини у вигляді плоского полум'я, без видимого язика. Отримуваний високошвидкісний потік гарячих продуктів згоряння паливно-повітряної суміші підхоплює частинки витратного матеріалу, що надходять у порожнину спалювання робочої суміші 5 за допомогою пристрою подачі витратного матеріалу 6, вихідне сопло якого поміщено в отвір перфорованого елемента 3, виконаного по його осі, прогріває і розплавляє стискає в пучок малого діаметра та розганяє до високих швидкостей.



Відстань від перфорованого елемента до зрізу сопла залежить від продуктивності процесу, теплофізичних характеристик матеріалу, що напильюється, величини щільності теплового потоку факела і може бути визначено наступною залежністю, отриманою емпіричним шляхом:

$$L_x = S_w N_n C \frac{\Delta T}{\Phi_g}, \quad (2.5)$$

де  $S_w$  – коефіцієнт,  $m^{-1}$  ( $S \sim (0,06-0,08) \cdot 10^{-4}$ );

$N_n$  – продуктивність напильнення,  $kg/s$ ;

$C$  – питома теплоємність напильюваного матеріалу,  $Dж/kg \cdot K$ ;

$\Delta T$  – різниця між початковою температурою напильюваного матеріалу та його температурою у критичному перерізі сопла,  $K$ ;

$\Phi_g$  – густина теплового потоку в порожнині горіння,  $Вт/m^2$ .

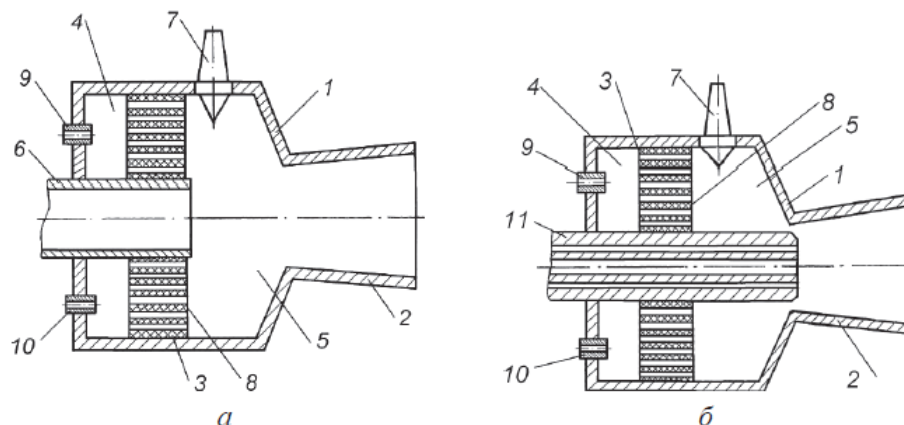


Рис. 2.5. Схеми розроблених пристроїв високошвидкісного напильнення, що використовують камеру мікрофакельного горіння: а – без використання супутнього газового потоку; б – з використанням супутнього газового потоку.

Наявність порожнини змішування дозволяє покращити умови сумішоутворення при роздільній подачі компонентів для формування горючої суміші та повністю виключити використання додаткового кисню як у момент запуску пристрою, так і на робочому режимі. Крім того, застосування принципів мікрофакельного спалювання дозволяє стабілізувати процес спалювання газоповітряної суміші при одночасному збільшенні швидкості її горіння в каналах перфорованого елемента без відриву та проскоку, що, у свою чергу, дає

можливість спалювати значну кількість горючої суміші в меншому обсязі. Причому горіння газу за перфорованим елементом на його вогневій поверхні йде в зоні малої товщини у вигляді плоского полум'я. Така форма полум'я дозволяє різко скоротити довжину порожнини спалювання описуваного пристрою.

В іншому варіанті (Рис. 2.5, б) як вузла подачі матеріалів використовується терморозпилювач, розпилювальна головка 11 якого розташована в отворі перфорованого елемента, виконаного по його осі.

Відстань від перфорованого елемента до зрізу головки терморозпилювальної установки визначається з виразу:

$$X_l = L_x + \ln A_k, \quad (2.6)$$

де  $A_k$  – у разі наплення порошкових матеріалів – 1,2-7,1; у разі наплення дротяних матеріалів – 0,13-0,3.

Таке конструктивне виконання дає можливість реалізувати двострумінну схему газотермічного наплення, коли первинний високотемпературний потік, що володіє відносно невисокою швидкістю, розплавляє частинки витратного матеріалу, що транспортуються, а вторинний низькотемпературний, але високошвидкісний потік розганяє розплавлені частинки до швидкостей більше 230 м/с. Причому первинний потік є високотемпературним струменем, виробленим терморозпилювальним пристроєм для газотермічного наплення, тоді як вторинний потік – це високошвидкісний струмінь продуктів згоряння паливно-повітряної суміші.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що товщина елемента прямо пропорційна логарифму температури факела і квадрату теплопровідності матеріалу елемента. Обробка результатів досліджень показала, що в кожному конкретному випадку товщину елемента можна визначити з виразу:

$$h_{\Xi} = k_w \lambda_{\Xi}^2 \ln T, \quad (2.7)$$

де  $k_w$  – коефіцієнт  $(4,35-4,51) \cdot 10^{-4}$ , м<sup>3</sup>·град<sup>2</sup>/Вт<sup>2</sup>;  $\lambda_{\Xi}$  – теплопровідність матеріалу елемента, Вт/м·град;  $T$  – температура факела, град.

Розроблена конструкція для реалізації схеми (рис. 2.5, б) мала наступні недоліки.

Частини порошку, що вилітають з розпилювальної головки, практично відразу ж підхоплюються високошвидкісним супутнім потоком і, не встигаючи нагрітися, розганяються до швидкостей вище 200 м/с. Для металевих порошоків з розміром частинок від 50 до 80 мкм така схема наплення може бути допустима, але для частинок розміром більше 100 мкм, а також для порошоків металокераміки, кераміки та матеріалів з низькою теплопровідністю (ситалів, скла) її використання не дає відчутних результатів.

Крім того, розпилювальна головка терморозпилювача розташована безпосередньо в порожнині спалювання робочої суміші камери, де температура досягає значень 1700-1900 К, що не дозволяє експлуатувати пристрій безперервному режимі більше 1,5-2 хв. Необхідність у періодичних зупинках пристрою знижує продуктивність процесу більш ніж у 2 рази.

Враховуючи вищевикладене, було розроблено установку для активованого газополум'яного наплення з водоохолоджуваною камерою згоряння та керамічним мундштуком, виконаним у вигляді усіченого конуса (рис. 2.6). В отвір великої основи керамічного мундштука на відстані 100-140 мм від соплового отвору встановлена головка пістолета.

У цьому пристрої повною мірою реалізується перевага двострумнинної схеми газотермічного наплення, коли високошвидкісний супутній потік з камери згоряння розганяє частинки порошку, попередньо нагріті у факелі терморозпилювача. Факел терморозпилювача 1 ізольований від порожнини горіння камери б і, таким чином, процеси, що відбуваються в порожнині горіння, не надають на нього впливу. При цьому розпилювальна головка 2 також захищена від теплової дії б камери.

Конічна форма керамічного напрямного елемента 10 дозволяє не тільки сконцентрувати первинний потік, але й забезпечити більш ефективну взаємодію первинного та вторинного потоків, оскільки максимальне прискорення

первинного струменя досягається при його взаємодії зі супутнім потоком під кутом 20-40 °. Діаметр отвору малої основи в 2,0-2,5 рази більше діаметра каналу 3 для подачі напилюваного порошку, причому мала основа мундштука 10 розташована в одній площині з отвором сопла 12 і утворює з ним щілинний зазор 13.

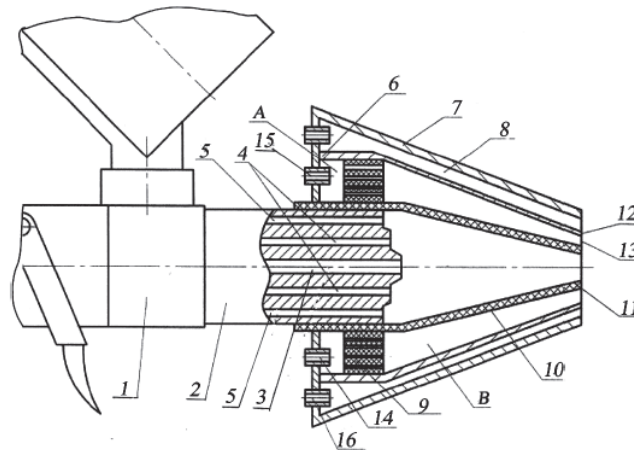


Рис. 2.6. Схема розпилювальної головки установки ГПН з водоохолоджуваною камерою згоряння та конічним мундштуком: 1 – порошковий терморозпилювач; 2 – розпилювальна головка; 3 – канал для подачі порошку; 4 – канали для горючої суміші; 5 – канали для повітря, що обтискає факел порошкового терморозпилювача; 6 – камера згоряння; 7 – корпус; 8 – водоохолоджувана порожнина; 9 – вогнетривкий перфорований елемент; 10 – керамічний напрямний елемент; 11 - мала основа елемента; 12 – сопловий отвір; 13 - щілинний зазор; 14 – паливний жиклер, 15 – повітряний жиклер; 16 – жиклер водяного охолодження.

Необхідність виконання вихідного отвору певного розміру в конічній основі напрямного елемента 10 викликана тим, що струмінь порошку, що виходить з центрального каналу 3 розпилювальної головки 2 терморозпилювача 1, поступово розширюється і діаметр перерізу струменя порошку на відстані 100-140 мм від розпилу 2,5 рази.

Більше збільшення діаметра вихідного отвору напрямного елемента 10 недоцільно, оскільки при цьому знизиться коефіцієнт теплообміну між первинним факелом і порошком, а зменшення діаметра нижче заявлених

показників викликає інтенсивне зношування вихідного отвору напрямного елемента 10 від ударів порошкових частинок.

В основу аналітичного визначення розмірів щілинного зазору між мундштуком і сопловим отвором камери були покладені рівняння руху газових струменів, що витікають з реактивних камер згоряння. При цьому зроблено такі припущення: перебіг продуктів згоряння через щілинний зазор адіабатний, тобто відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем, та ізоентропний, тобто без дисипації енергії при постійній ентропії; продукти згоряння камери підпорядковуються рівнянню стану ідеального газу. Продукти згоряння можна розглядати як рівноважну суміш, одержану після завершення процесу горіння. За відсутності незворотних явищ ідеальний процес перебігу є термодинамічний процес, що характеризується постійним значенням ентропії ( $S_{\Sigma} = \text{const}$ ). Це дозволяє розглядати такий процес як перехід системи з одного термодинамічного стану в інший і визначення параметрів використовувати методи термодинаміки. Для процесу перебігу від тиску  $P_{0c}$  до тиску  $P$  приймають справедливим рівняння ізоентропи, що записується як  $PV^n = \text{const}$ , де  $n$  – середній показник ізоентропи. Для вхідного та будь-якого іншого перерізу сопла з рівняння ізоентропи маємо наступний зв'язок між параметрами:

$$P_{0c}V_{0c}^n = PV^n, \quad (2.8)$$

де індекс « $0c$ » означає, що термодинамічні величини виміряні на виході з камери.

Середній показник ізоентропи, що визначається по зв'язку між тиском і питомим об'ємом, у разі суміші постійного хімічного складу не залежить від температури та тиску в початковій та кінцевій точках ізоентропійного течії. У суміші, що горить, з-за різного ступеня дисоціації продуктів згоряння залежно від температури і тиску рівняння (1.10) є апроксимуючою залежністю і значення  $n$  залежить від вибору параметрів початкової і кінцевої точок процесу.

З урахуванням рівняння стану ідеального газу та виразу (1.11) формула для знаходження показника ізоентропи має вигляд:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{P_{0c}}{P}\right)}{\frac{RT}{R_{0c}T_{0c}} \ln\frac{P_{0c}}{P}}, \quad (2.9)$$

При  $P = P_*$  і  $RT = P_* T_*$  (де індекс «\*» означає, що термодинамічні величини виміряні в критичному перерізі сопла) отримуємо значення  $n$  для апроксимації параметрів процесу перебігу на ділянці від входу до критичного перерізу. При  $P = P_a$  та  $RT = R_a T_a$  – від входу в сопло до вихідного перерізу.

Запишемо відомі рівняння термогазодинаміки ідеальних та реальних потоків:

рівняння Бернуллі для ізоентропійного процесу у вигляді

$$\frac{n}{n-1} \frac{P}{\rho_{cm}} + \frac{V^2}{2} = \text{const}; \quad (2.10)$$

рівняння ізоентропи у вигляді

$$\frac{P}{\rho_{cm}^n} = \text{const}; \quad (2.11)$$

де  $\rho_{cm}$  – щільність суміші;

рівняння стану у вигляді

$$\frac{P}{\rho_{cm}} = RT, \quad (2.12)$$

З рівняння Бернуллі, приймаючи  $V_{0c} = 0$ , отримуємо формулу для розрахунку швидкості потоку:

$$V_n = \left\{ 2 \frac{n}{n-1} R_{0c} T_{0c} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_{0c}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \right\}^{0,5}, \quad (2.13)$$

Отримуємо співвідношення для параметрів у критичному перерізі:

$$\frac{R_* T_*}{R_{0c} T_{0c}} = \frac{n}{n+1}; \quad \frac{P_*}{P_{0c}} = \left( \frac{n}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (2.14)$$

При  $P = P_*$  отримуємо формулу для розрахунку швидкості газів у критичному перерізі:

$$V_* = \sqrt{\frac{2nR_{0c}T_{0c}}{n+1}}, \quad (2.15)$$

Якщо замість тиску на виході із сопла задати відносну площу  $S_c$ , то секундна витрата потоку через сопло дорівнює  $m_p = S_c V \rho_{cm}$ . Використовуючи вирази (2.14) та (2.15), отримуємо:

$$m_p = A(n) \frac{P_{0c} S_c}{\sqrt{R_{0c} T_{0c}}}, \quad (2.16)$$

де функція  $A(n)$  замінює вираз  $A(n) = \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}}$ .

З рівняння (2.16) отримали вираз визначення площі перерізу сопла. Після певних перетворень формула для визначення площі перерізу сопла набула наступного вигляду:

$$S_c = \frac{k_2 m_p}{P_{max}} \sqrt{R_2 T}, \quad (2.17)$$

де  $m_p$  – витрата газової робочої суміші, кг/с;  $P_{max}$  – максимальний тиск у камері згоряння, Па;  $R_2$  – універсальна газова стала для використовуваної газової робочої суміші, Дж/кг·К;  $k_2$  – коефіцієнт, що залежить від використовуваного пального газу, рівний при застосуванні пропану – 1,54; ацетилену – 1,26; метану – 1,19.

Були виконані розрахунки для пропано-повітряної суміші з витратою від 30 до 38 м<sup>3</sup>/год (від 0,0108 до 0,0136 кг/с), температурою від 1750 до 2200 К,  $P_{max} = 0,4 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>,  $A(n) = 0,65$ . Проведені розрахунки за допомогою виразу (1.20) показали, що розмір площі перерізу зазору знаходиться в межах 30,5-38,0 мм<sup>2</sup>.

Експериментальний зразок терморозпилювача з реактивним активатором був виготовлений з урахуванням установки газополум'яного напилення порошків (рис. 2.7, а). Первинний факел утворюється в результаті горіння робочої суміші газополум'яного розпилювача, на сопловій частині якого монтується реактивний активатор. За допомогою спеціально передбаченого регулювального крана, що обмежує подачу повітря на сумішоутворення, можна створювати або окислювальну або відновлювальну атмосферу вторинного полум'я.

Малогабаритні високоефективні камери згоряння пропано-повітряної суміші використані також в установках активованої електродугової металізації.

Швидкісний напір потоку, що виражається ставленням кінетичної енергії до одиниці об'єму газу і характеризує тиск, що діє на частинку в потоці, становить  $234\ 000\ \text{Н/м}^2$  (для традиційної електрометалізації –  $75\ 000\ \text{Н/м}^2$ , для плазмового напилення  $14\ 000\ \text{Н/м}^2$ ). Це дозволяє розганяти частинки розплавленого металу в потоці  $500\ \text{м/с}$ .

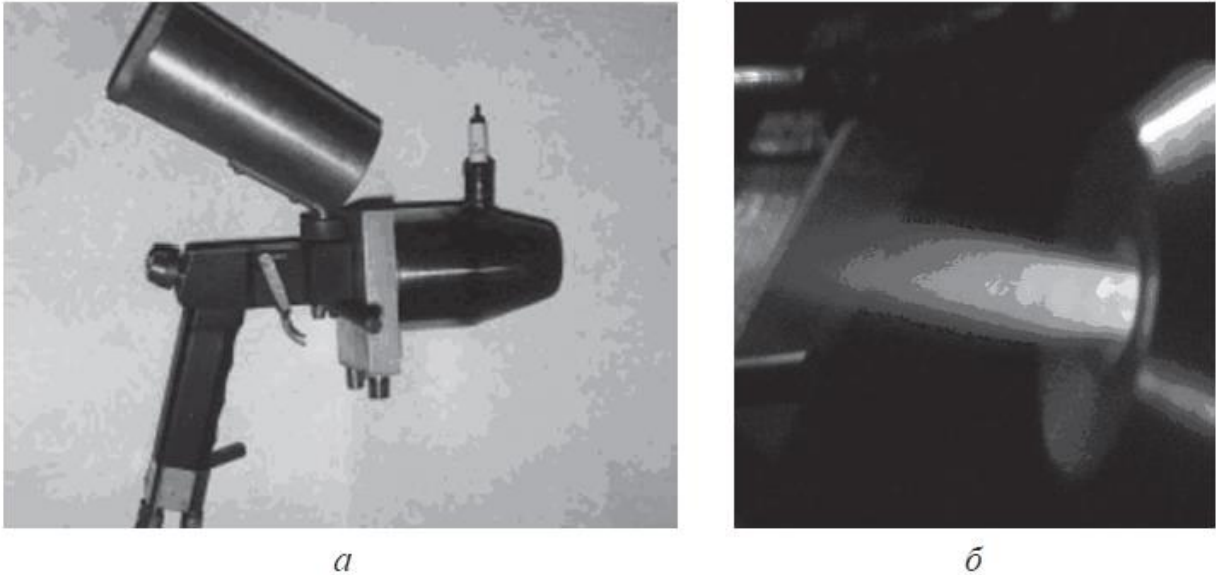


Рис. 2.7. Установки високошвидкісного напилення, що використовують камери мікрофакельного горіння: а – порошковий терморозпилювач із малогабаритним реактивним активатором; б – надзвуковий струмінь, що витікає з активатора (видимі скачки ущільнень).

Експериментальні дослідження здійснювалися з використанням порошків оксиду алюмінію, хрому карбиду, плакованого нікелем, а також композиційної порошкової шихти, що містить феросплави, частинки абразивного шламу, інтерметаліди і хромонікелевий сплав.

Вимірювання, виконані за допомогою приладу ІССО-1, показали, що максимальна швидкість, що розвивається частинками найлегшого порошкового матеріалу –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , становить  $400\text{--}440\ \text{м/с}$  і досягається на дистанції  $90\text{--}110\ \text{мм}$  при співвідношенні окислювача (повітря) та пропану  $\beta = 26\text{--}28$ .

Напилені покриття мали пористість трохи більше  $7\ \%$  (Рис. 2.10) і міцність зчеплення  $45\text{--}53\ \text{МПа}$ .



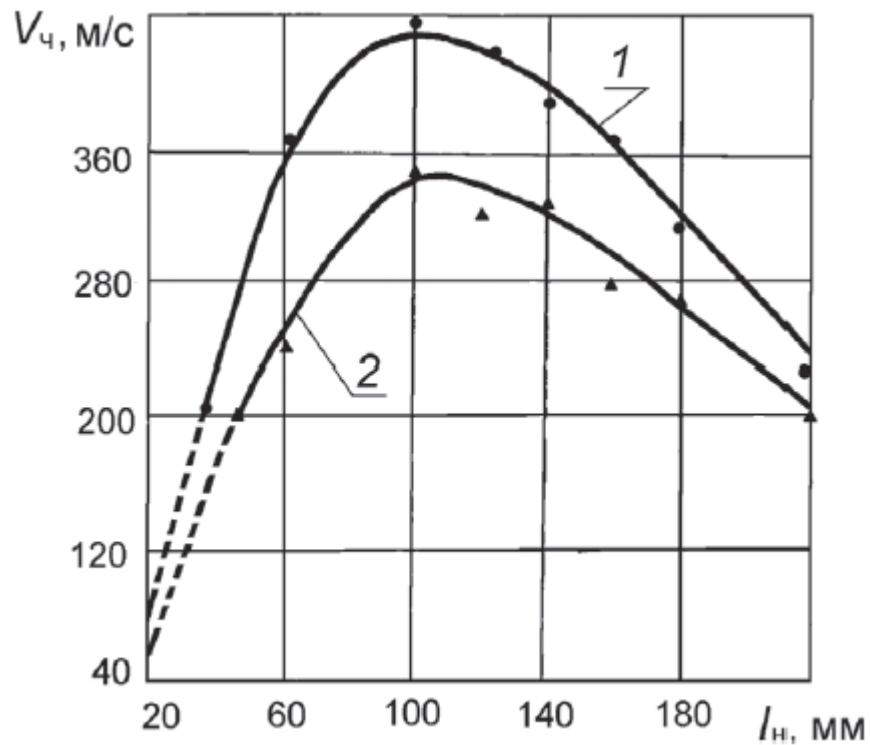


Рис. 2.8. Зміна швидкості польоту частинок порошків  $Al_2O_3$  (1) та  $Cr_3C_2$  (2) зі збільшенням відстані від сопла терморозпилювача

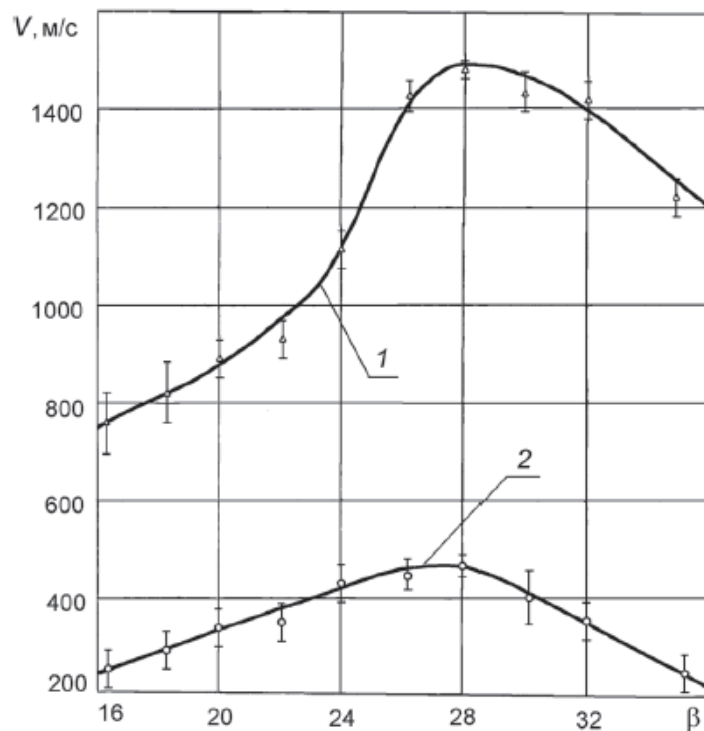


Рис. 2.9. Вплив складу горючої суміші на швидкість закінчення з камери активатора продуктів згоряння (1) та на максимальну швидкість польоту частинок порошку  $Al_2O_3$  розміром 50-63 мкм (2)

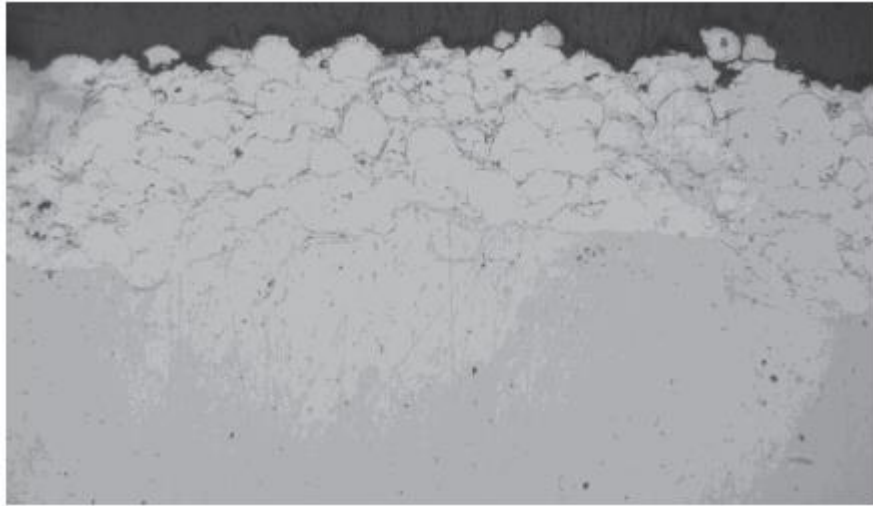


Рис. 2.10. Структура покриття отриманого напиленням частинок порошку  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( $\times 150$ ).

### **Висновки по розділу**

Проведені експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні способи та режими підвищення довговічності елементів трибоспряжень методами інженерії поверхні.

### РОЗДІЛ 3

## ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ГАЗОПОЛУМ'ЯНОГО НАПИЛЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Зміцнення і відновлення швидкозношувальних деталей машин і елементів конструкцій методами газотермічного напилення покриттів з порошкових, дротяних і пруткових матеріалів є одним з напрямків, що інтенсивно розвиваються в ремонтному виробництві, при створенні ресурсозберігаючих технологій, захисті від корозії.

Метод напилення покриттів із розплавлених металів було запропоновано у 1909 р. Максом Ульріхом Шоопом (M. U. Schoop). Слідом за створенням апарату для розпилення розплавленого металу в 1912 р. він виготовив апарат (названий ним «пістолет для пульверизації»), який використовує горючий газ для напилення дроту. У 1914 р. Ерікой Морф (Швейцарія) був запатентований портативний апарат для газополум'яного розпилення дротів, що започаткував розвиток процесу газополум'яного напилення дротяних матеріалів. У 30-50-х роках ХХ ст. з'явилися установки індукційного напилення, електродугової металізації та газополум'яного порошкового напилення. У 60-х роках почали розвиватися методи плазмового та детонаційного напилення.

Основними параметрами напилених покриттів, що визначають їх якість, є міцність зчеплення з поверхнею деталі та щільність шару. Ці параметри залежать від безлічі факторів, що характеризують склад і властивості застосовуваного робочого газу, матеріалу, що наноситься, деталі, навколишнього середовища, а також від режимів роботи обладнання при підготовці матеріалу, що наноситься і поверхні деталі, при нанесенні покриття і його подальшої обробки.

Оскільки напилене покриття формується шляхом послідовного укладання множини частинок, що супроводжується їх деформацією, структура та властивості покриттів відрізняються від литих матеріалів того ж складу. Чинниками, які зумовили ці відмінності, є такі структурні особливості:

- на відміну від компактного матеріалу, що має два типи границь: міжзеренні та міжфазні, напилене покриття має ще три типи границь, що визначають його властивості (границі між деформованими частинками, міжшарові границі та межі, що розділяють покриття та підкладку);

- кристалізуючись і охолоджуючись індивідуально, частинки мають будову, що відображає умови гетерогенної кристалізації з розвитком фронту кристалів, що ростуть у напрямку, протилежному відводу тепла, тобто перпендикулярно до поверхні формування;

- при послідовному укладанні частинок і шарів неминуче утворюються порожнечі (пори);

- будова шару, що формується за один прохід, неоднорідно і визначається різною температурою і швидкістю частинок, що летять в центральній і периферійних зонах потоку.

Крім того, при напиленні покриттів відбувається інтенсивна взаємодія елементів, що входять до їх складу, з навколишнім середовищем і робочими газами, зокрема киснем, що призводить до його розчинення в кількостях, що перевищують розчинність у рівноважних умовах кристалізації. Крім появи оксидів, багато з яких володіють властивостями твердих мастил, кисень, розчинений у покритті, здатний знижувати в порівнянні з вихідним напилюваним матеріалом енергію переходу в «активний» структурно-нестійкий стан, що забезпечує зменшення енергетичних витрат на відносно переміщення поверхонь, що контактують, кращої структурної пристосовності.

Всі перераховані вище фактори обумовлюють можливість формування методами ГТН робочих поверхонь ріжучих органів, деталей вузлів тертя, що працюють у дуже широкому діапазоні навантажень і швидкостей, елементів силових передач, ємностей для зберігання та переробки агресивних середовищ, деталей запірної арматури і т.п.

В літературі зазначається, на перспективність методу напилення для отримання покриттів триботехнічного призначення і наводяться приклади

підвищення довговічності вузлів тертя шляхом заміни бронзових деталей на напилені бронзові покриття. Автори цих робіт пояснюють менший знос покриттів порівняно з литим сплавом наявністю розвиненої пористості. Здатністю утримувати рідке мастило як у шарі, так і на робочій поверхні можна пояснити і той факт, що час, протягом якого настає заїдання валу з газотермічним покриттям після припинення подачі мастила, більше в 7-10 разів часу початку заїдання звичайного валу без покриття, причому у першому випадку заїдання настає поступово.

Основною важливою відмінністю процесу ГПН порошоків від газополум'яного розпилення дротів є необхідність нагрівання та розгону частинок у факелі терморозпилювача. Розпилення дроту не може здійснитися без його попереднього розплавлення для подальшого диспергування потоком газу, тому частинки, що утворилися, вже мають досить високі теплові і динамічні параметри. Процес ГПН порошоків більш складний, його ефективність та властивості покриттів значно значною мірою залежать від характеру руху та нагрівання частинок порошку у факелі терморозпилювача, тому доцільно відзначити особливості процесу ГПН саме для порошкових матеріалів.

Швидкість руху газів у факелі залежить від швидкості поширення фронту полум'я та кількості виділеної теплової енергії під час реакції горючий газ – окислювач. Дослідження, проведені за допомогою приладу ІССО-1, показали, що характер горіння суміші та швидкість руху газів у факелі та ядрі полум'я залежать від співвідношення обсягів окислювача та пального газу ( $\beta$ ). При  $\beta_{C_2H_2} = 1,1$  спостерігається нестійке горіння, ядро полум'я виражене нечітко, швидкість факела на дистанції до 40 мм вбирається у 40 м/с, частота пульсацій у ядрі 250–300 Гц, у факелі – до 80 Гц. Подальше збільшення  $\beta_{C_2H_2}$  до 2 призводить до підвищення швидкості газів у факелі до 80 м/с та в ядрі до 180 м/с, але при цьому спостерігається зрив полум'я. Найбільш оптимальним є співвідношення  $\beta_{C_2H_2} = 1,9$ .

Для суміші  $O_2: C_3H_8 + C_4H_{10}$  збільшення швидкості руху газів у полум'ї із зростанням значень  $\beta$  відбувається менш інтенсивно. Максимальна швидкість у факелі терморозпилювачів установок серії УПТР зафіксована на дистанції 30-40 мм при  $\beta = 4,5$  і становить 70 м/с, у ядрі – 140 м/с.

Швидкість газів у факелі змінюється відповідно до закону затопленого струменя і на відстані 250-300 мм від сопла терморозпилювального пістолета склала 40 м/с в ацетилен-кисневому полум'ї та 36 м/с – у пропан-бутан-кисневому полум'ї (рис. 3.1), що порівняно зі значеннями швидкостей плазмового струменя на тих же дистанціях для плазмотронів малої потужності.

Для охолодження соплового наконечника розпилювача, зменшення тепловіддачі в атмосферу та підвищення швидкості полум'я застосовується обдув стисненим повітрям.

Встановлено, що обдув (в досліджуваних діапазонах) істотно не впливає на швидкість газів в ядрі полум'я. При збільшенні витрати повітря, що обдуває, до  $3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с швидкість у факелі зростає на 20–25 % для досліджуваних газових сумішей, потім практично не змінюється. Аналіз результатів експериментальних досліджень швидкостей руху частинок у полум'ї показав, що зі зростанням швидкостей газового потоку підвищується і швидкість частинок, причому це збільшення в пропан-бутан-кисневому полум'ї відбувається дещо інтенсивніше, ніж в ацетилен-кисневому, що, мабуть, обумовлено більшою щільністю першого. Зі збільшенням питомої маси матеріалу порошку зменшуються прискорення та швидкість польоту частинок, підвищується відстань від соплового наконечника до точки, у якій частинки мають максимальну швидкість (рис. 3.1, а). Аналогічні результати отримані на ацетилен-кисневому полум'ї, причому швидкість польоту частинок на 15-20% вище, ніж у пропан-бутан-кисневому.

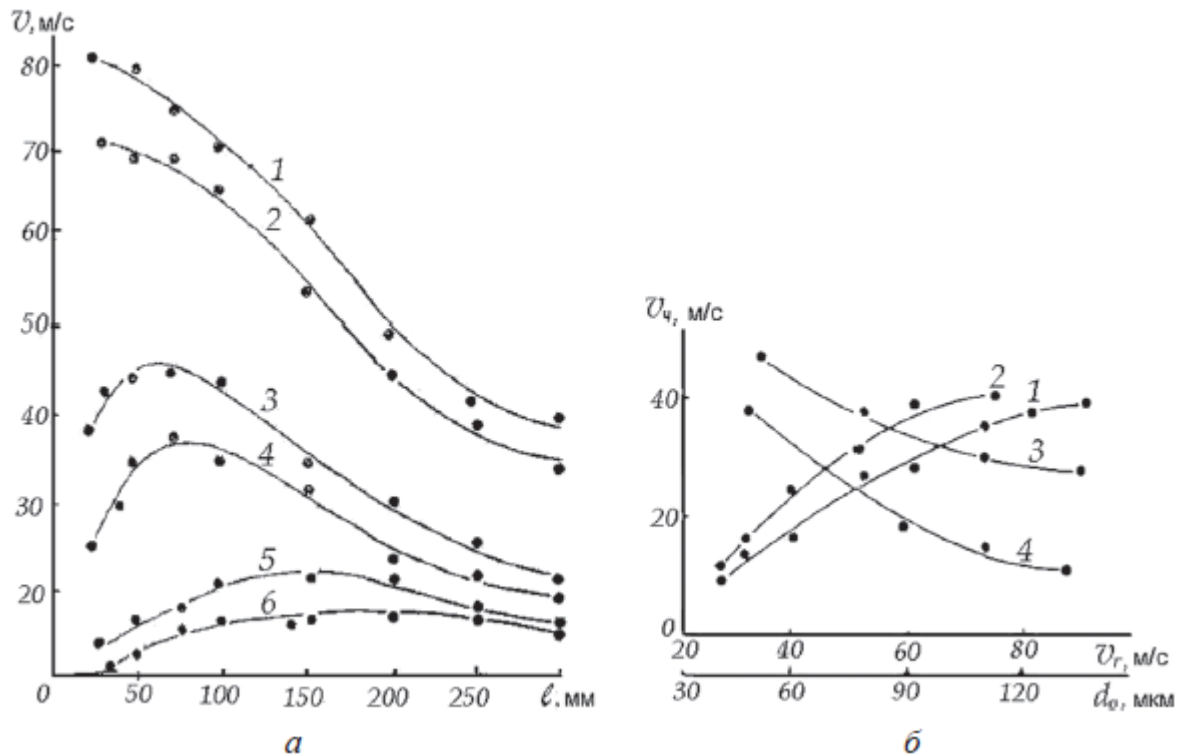


Рис. 3.1. Зміна швидкості руху газів (1, 2) та частинок порошків (3 – окис алюмінію; 4 – сплав ПГ-12Н-01; 5 – реліт; 6 – вольфрам) за довжиною факела ацетилен-кисневого (1) та пропан-бутан-кисневого (2–6) полум'я (а) та вплив швидкості руху газів на швидкість польоту частинок порошків різних фракцій (б).

Припинення обдування струменя стисненим повітрям спричиняє зниження максимальної швидкості частинок окису алюмінію до 38 м/с, сплаву ПГ-12Н-01 – до 30 м/с, вольфраму – до 15 м/с.

Встановлено, що збільшення розміру частинок бронзи від 40 до 160 мкм призводить до зниження швидкості їхнього польоту з 36 до 16 м/с, частинок сплаву ПГ-12Н-01 – з 43 до 30 м/с. При цьому максимум кривої швидкості зміщується у бік великих дистанцій.

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень отримано регресійне рівняння для визначення максимальних значень швидкості польоту частинок найдрібніших фракцій:

$$v_{ch} = v_g A_2 \rho_{ch}^\alpha, \quad (2.1)$$

де  $v_2$  – максимальна швидкість газів у факелі полум'я, м/с;  $A_2 = 2,206 \cdot 10^{-2} \text{ м}^4 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha = 0,316$ ;  $\rho_c$  – питома маса матеріалу частинок порошку,  $\text{кг/м}^3$ .

Оскільки максимальні швидкості польоту мають дрібніші частинки (30-60 мкм), їх краще використовувати при напыленні на внутрішні поверхні порожнистих деталей, оскільки в даному випадку дистанція напылення обмежена розмірами порожнини.

Експериментально були отримані дані про щільність теплового потоку, ентальпії, в'язкості та інших характеристик, що визначають умови та інтенсивність перебігу процесів теплообміну в газопорошковому струмені. Поля температур та щільності теплових потоків пропан-бутан-кисневого полум'я представлені на рис. 3.2.

Максимальні значення щільності теплового потоку та температури полум'я досягаються на відстані 20-30 мм від зрізу сопла на радіусі перерізу полум'я, що дорівнює 6 мм, тобто в зоні ядра. На осі полум'я у цьому перерізі значення щільності теплового потоку вдвічі менше і за віддалення від сопла їх максимальні значення зміщуються до осі полум'я, а мінімальні – до периферії. Результати збігаються з даними, отриманими іншими способами.

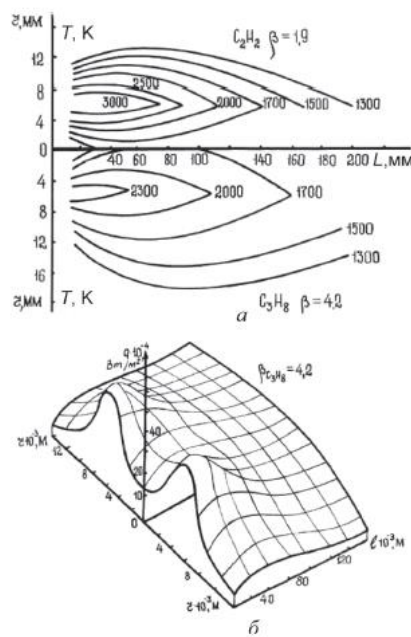


Рис. 3.2. Температурні поля (а) та щільність теплового потоку (б) факела полум'я терморозпилювача



Результати досліджень температури частинок порошку сплаву ПГ-12Н-01 в пропан-бутан-кисневому полум'ї методом вимірювання багатоколірної температури представлені на рис. 3.3.

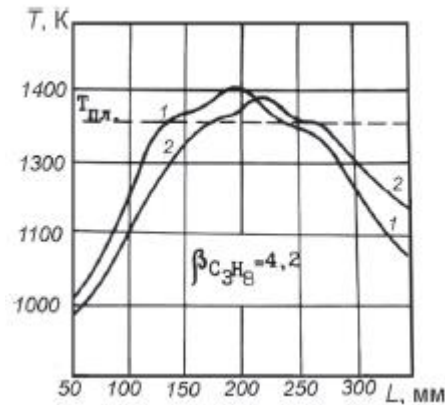


Рис. 3.3. Зміна температури частинок порошку сплаву ПГ-12Н-01 за довжиною факела пропан-бутан-кисневого полум'я.

Поверхня частинок нагрівається до температури плавлення на відстані 120-160 мм від зрізу сопла. Швидкість польоту частинок досягає максимальних значень з відривом до 50 мм. Враховуючи, що час контакту частинок із гарячою зоною становить близько  $(3-5) \cdot 10^{-3}$  с, швидкість нагрівання дорівнює 106 К/с. Зниження швидкості нагрівання на дистанції 120-180 мм свідчить про те, що після оплавлення поверхні відбувається глибинне проплавлення частинок. Максимальної температури частинки досягають на відстані 200 мм від сопла, а потім йде зниження температури до  $T_{\text{плавл}}$  на дистанції 250 мм.

На підставі аналізу результатів досліджень встановлено, що при використанні пропан-бутан-кисневої суміші мінімальна дистанція напилення порошків сплавів на мідній основі, систем Ni-Cr-B-Si і Ni-Al з розміром частинок 40-63 мкм становить 110-120 мм. Виходячи з цього мінімальний внутрішній діаметр відновлюваних за допомогою подовжувальної насадки деталей становить 135 мм.

Максимальна щільність покриттів досягається на дистанції, що відповідає максимальній температурі частинок та швидкості їх польоту (рис. 3.4). Показано,

що покриття мають максимальні значення міцності зчеплення (22–25 МПа) при дистанції наплення, що забезпечує максимальну щільність.

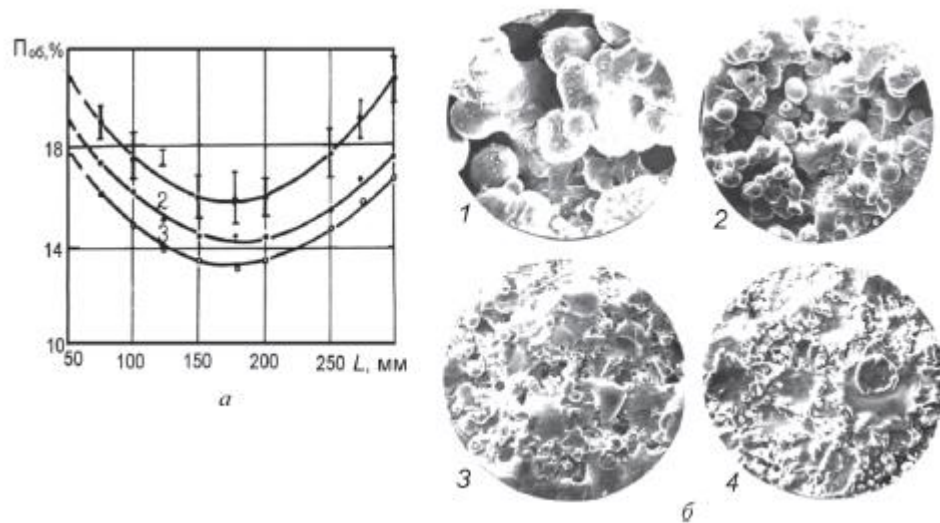


Рис. 3.4. Вплив дистанції наплення на загальну пористість покриттів (а) з різних матеріалів (1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ-19М-01; 3 – ПГ-12Н-02 ( $d_0 = 50-63$  мкм)) та мікроструктуру покриття зі сплаву ПГ-12Н-01 (б) (1 – 75 мм; 2 – 125 мм; 3 – 175 мм; 4 – 225 мм ( $d_0 = 50-63$  мкм) $\times 200$ ).

### Висновок по розділу

Отримані дані відносяться до металевих порошків, оскільки при напленні легкоплавкої кераміки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) пористість зростала в 1,5-2 рази, а міцність зчеплення не перевищувала 12 МПа. При використанні менш тугоплавких, ніж кераміка, але й менш теплопровідних матеріалів (теплопровідність 0,5–3,0 Вт/м·град), наприклад, склоемалей, якісні покриття традиційним методом ГПН взагалі отримати неможливо. Це зумовило необхідність створення високоенергетичних систем порошкового наплення.

## ВИСНОВКИ

Розроблено технологічні основи управління процесами структуро- та фазоутворення в покриттях та поверхневих шарах в умовах газополум'яного напилення, що базуються на використанні факторів, які стимулюють ініціативні дифузійні потоки, активують утворення адгезійних та когезійних зв'язків у сформованих покриттях та поверхневих шарах.

При розгляді деталі з покриттям як елемента динамічної системи, що розраховується на надійність, розроблено основи методології визначення необхідної величини адгезії напилених покриттів. Отримано чисельні рішення для покриттів, що наносяться на вали зі шківками та кривошипами, колінчасті вали, кульові опори, тонкостінні сферичні з'єднання, цапфи підшипників ковзання.

Розроблено метод активування процесу газополум'яного напилення покриттів із дротяних матеріалів за рахунок генерування в повітряному потоці ультразвукових коливань, які передаються дроту, що розпилюється. На основі результатів дослідження теплових характеристик факела розроблено методику розрахунку швидкості подачі дроту при газополум'яному напиленні, яка застосовувалася при виборі режимів відновлення – зміцнення деталей сільськогосподарських підприємств. Дослідження характеристик опору втомному руйнуванню показали, що покриття, нанесені газополум'яним розпиленням дротів, викликають незначне зниження межі витривалості (10-13%) порівняно з покриттями, отриманими вібродуговою наплавкою, що знижують межу витривалості на 35-40%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Математичне моделювання формування детонаційних покриттів / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, В.І. Мірненко, С.Д. Недайборщ // Технологические системы. 2016. № 2(75). С.82-88. COPERNIKUS
2. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в условиях повышенных температур. *Порошковая металлургия*. 2014. №1/2. С.81-89. SCOPUS
3. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных наноконпозиционных покрытий Cr-Si-B в условиях высоких температур. Матеріали 5-ї МК HighMatTech. 2015. С.160
4. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбаров В. С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526 с.
5. Кіндарчук В. М. Трибологія: підручник. Київ : НАУ-друк, 2009. 392 с
6. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев : Техника, 1974. 272 с
7. Перкас М. Д., Кардонский В. М. Высокопрочные мартенситно-старяющие сплавы. Москва : Металлургия, 1970. 224 с
8. Сорокина В. Г. Марочник сталей и сплавов. Москва : Машиностроение, 1989. 638 с
9. Мурашов В. В., Румянцев А. Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ч.1. Контроль. Диагностика. № 4, 2007. С. 1 – 17.
10. Семенченко В. П. Технологические процессы получения деталей самолетов методом порошковой металлургии: учеб. пособие. Харьков: ХАИ, 1992. 64 с.
11. . Рамакришнана П. Порошковая металлургия и высокотемпературные материалы. Челябинск : Металлургия. 1990. 352 с

12. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев : Наукова думка, 1980. 404 с.

13. Федорченко И. М., Крячек В. М., Пананоти И. И. Современные фрикционные материалы. Киев : Наукова думка, 1975. 336 с.

14. Бычков А. С. Анализ основных закономерностей изменения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий элементов конструкций от технологических параметров их формирования. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 2 (4). С. 19 – 28.

15. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев : Техніка, 1986. 223 с.