

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО”**



**І. І. Білик,
С. О. Руденький**

ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як
навчальний посібник для здобувачів ступеня магістр
за освітньо-професійною програмою «Нанотехнології та комп'ютерний
дизайн матеріалів»
спеціальності 132 Матеріалознавство

Електронне мережне навчальне видання
Видання друге, перероблене і доповнене

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент: *Смирнов І. В.*, д. т. н., професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: *Мініцький А. В.*, д. т. н., професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 30.03.2023 р.)
за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту матеріалознавства та
зварювання ім. Є. О. Патона (протокол № 4/23 від 27.03.2023 р.)*

У навчальному посібнику розглядаються технології напилювання газотермічних і вакуумно-конденсаційних покриттів, технологічні операції, їх особливості для різних способів напилювання. Приведені характеристики обладнання, його особливості, основні параметри напилювання. Показані оптимальні режими операцій технології напилювання.

Наводяться довідкові дані про установки для напилювання різних матеріалів, які найбільш широко використовуються для нанесення покриттів.

Для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за спеціальністю «Матеріалознавство»

Реєстр. № НП _____ Обсягом 5,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056

<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК №
5354 від 25.05.2017р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ДОДАТКИ	115
Додаток А	115
Додаток Б	116
Додаток В	117
Додаток Г	118

ВСТУП

Різні види покриттів на деталі машин та конструкцій знаходять все ширше застосування тому, що дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики машин та механізмів, збільшити термін їх роботи, зменшити витрати металів, поновити зношені деталі. Найбільші втрати металів в промисловості мають місце внаслідок корозії та передчасного виходу з ладу деталей внаслідок зносу. Ці збитки оцінюються в десятки млрд. доларів на рік. Тому застосування корозіє- та зносостійких покриттів дозволяє різко скоротити витрати металів та збільшити надійність, довговічність машин та механізмів. Крім того, застосування покриттів для відновлення зношених деталей дозволяє також економити сировину та матеріали, тому що відновлення зношених деталей, наприклад, вала легкової автомашини, коштує в 2–3 рази дешевше, ніж виготовлення нового, тому не складно уявити ефект застосування напилення для відновлення спрацьованих деталей.

Найпоширенішими для нанесення захисних та відновлюваних покриттів в умовах масового виробництва є різні способи наплавлення та газотермічного напилювання (плазмове, газополуменеве і детонаційне). Для отримання покриттів спеціального призначення (жаростійких, теплоізоляційних, корозієстійких тощо) застосовують вакуумно-конденсаційні способи напилення. У сучасній техніці використовують і інші методи напилення, наприклад, електродіодні, дифузійні тощо.

Завдання цього посібника – вивчення основних технологічних процесів напилювання покриттів високотемпературним розпиленням, схем обладнання для напилення, а також матеріалів, які застосовують для напилення. У посібнику наведено характеристики способів напилення, у яких матеріал, напилюваний у вигляді порошку, дроту, зливку, перетворюється в краплинногазову або парову суміш і переноситься на поверхню деталі, де формується покриття.

До таких способів напилення належать плазмовий, електродуговий, газополуменевий, детонаційний та вакуумно-конденсаційний. Загальні переваги

цих способів такі:

1. Майже нема обмежень на матеріали покриття і деталей. Для нанесення покриттів можна використовувати різні метали, сплави, сполуки, їх суміші у вигляді порошків, дроту, зливків, стержнів. Ці матеріали можуть бути нанесені на деталі з різних матеріалів (металів, скла, деревини, паперу, тканину тощо).

2. Рівномірна товщина покриттів і майже необмежені розміри деталей (для плазмового, газополуменевого та детонаційного способів напилювання).

3. Мала термічна дія на напилену поверхню порівняно з наплавленням та дифузійним насиченням. Деталь не нагрівається вище 400 °С, що знижує напруження та зменшує можливу деформацію деталей.

4. Висока продуктивність напилювання для газотермічних способів і значна чистота покриттів за вакуумно-конденсаційного напилювання.

Розділ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ НАПИЛЮВАННЯМ

Усі наведені способи нанесення покриттів напилюванням можна розділити на дві групи:

- газотермічні: напилювання частинками матеріалу розміром 10–200 мкм за атмосферного або підвищеного тиску;
- вакуумно-конденсаційні: напилювання атомами або іонами, які конденсуються на деталі і формують покриття в умовах низького тиску.

Кожну групу можна класифікувати за способом формування потоку частинок для напилювання (рис. 1.1).

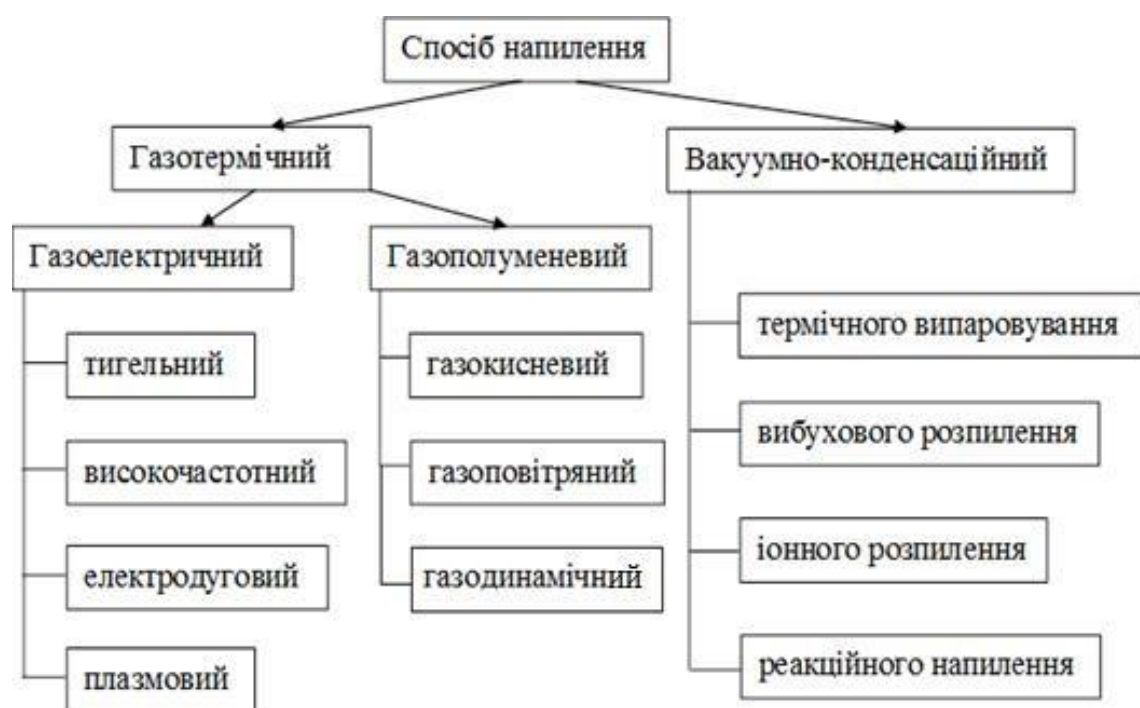


Рисунок 1.1 – Класифікація способів напилювання покриттів

1.1 Газотермічні способи нанесення покриттів

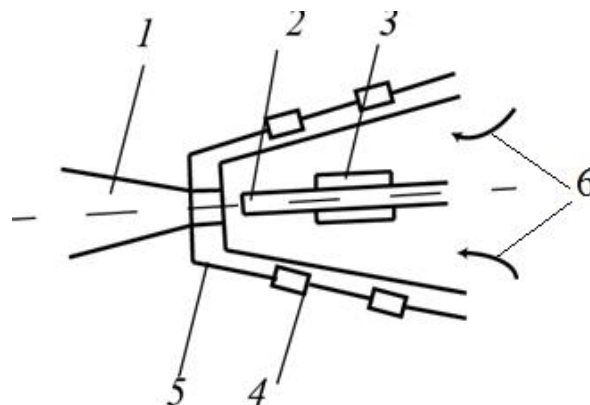
1.1.1 Тигельний спосіб

Матеріал нагрівають у тиглі до температури плавлення, а потім розпилюють гарячим повітрям струмінь металу, що виливається, і спрямовують

потік до поверхні напилення. У 1902 році швейцарський інженер М. І. Шооп уперше запропонував такий спосіб напилення, який був запатентований у Германії, Франції та Англії під назвою шопіювання. Натепер цей спосіб не використовують, оскільки він малопродуктивний і не дає можливості напилити матеріали з температурою плавлення вище за 500 °С. М. І. Шооп розробив також перші конструкції газополуменевого дротяного металізатора в 1912 році і електродугового дротяного металізатора в 1918 році.

1.1.2 Високочастотний спосіб

Матеріал нагрівають до плавлення струмом високої частоти, а рідкий метал розпилюється стисненим повітрям або інертним газом (рис. 1.2). У високочастотних індукційних головках високочастотне електромагнітне поле концентрується спеціальним соплом 5 з конічним індуктором 4. Під дією високочастотного магнітного поля в матеріалі 2 виникає вихровий струм, який нагріває матеріал до плавлення. Розплавлений матеріал розпиляється стисненим повітрям, утворюючи краплинногазовий потік 1, який направляє на поверхню напилювання. За потреби для розпилення розплавленого металу можна використовувати інертні гази (аргон, гелій тощо).



- 1 – краплинногазовий потік; 2 – напилюваний матеріал;
3 – спрямовувальна втулка; 4 – конічний індуктор; 5 – сопло, що концентрує електромагнітне поле; 6 – подача транспортуючого газу

Рисунок 1.2 – Схема високочастотної індукційної головки розпилення

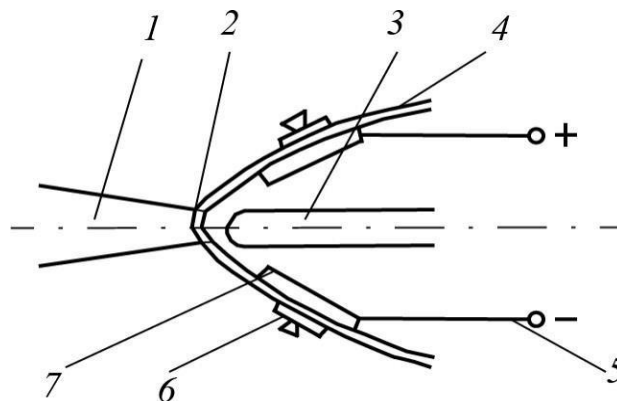
Переваги цього методу такі: висока стабільність краплинногазового потоку, оскільки під час виходу із сопла він являє собою ламінарний потік, що підвищує якість покриттів (збільшується твердість, міцність, зносостійкість, коефіцієнт використання матеріалу). У зв'язку з ламінарною характеристикою потоку знижується рівень шуму в процесі роботи, у конструкції не має деталей, які швидко спрацьовуються, що значно збільшує ресурс роботи.

Недоліком цього способу є громіздкість обладнання, особливо генераторів ВЧ, низька мобільність індукційного розпилювача, який може працювати не далі двох метрів від генератора, тому що в струмопідвідних шинах відбуваються великі втрати енергії.

1.1.3 Електродуговий спосіб

Цей спосіб дозволяє наносити покриття лише з електропровідних матеріалів у вигляді дроту.

Схема електродугового напилення подано на рисунку 1.3.



- 1 – краплинноповітряний потік; 2 – електрична дуга; 3 – повітряне сопло;
4 – дрітні електроди (матеріал напилення); 5 – підводи електроенергії;
6 – прижимні планки; 7 – направляючі пластини

Рисунок 1.3 – Схема електродугового напилення

Напилюваний матеріал у вигляді дроту 4 по спрямовувальним

електропідводам 7 безперервно подається в зону утворення дуги 2, де плавиться. Під дією стисненого повітря, що подається через сопло 3, матеріал розпилюється і утворює краплинноповітряний потік 1, який переносить розплавлений матеріал на поверхню напилення.

Із схеми видно, що дуга горить в досить нестабільних умовах, оскільки вона концентрується на малій площі поверхні дроту, що призводить до нерівномірного плавлення матеріалу з одного боку і з другого боку дуга горить під дією швидкісного газового потоку. У таких умовах можливі два види горіння: з періодичним коротким замкненням між електродами або постійне горіння дуги без короткого замкнення.

Другий тип горіння має переваги, оскільки підвищує стабільність процесу напилення.

Вид горіння дуги залежить від роду струму (постійного чи змінного) і швидкості подачі дроту. Постійний струм забезпечує горіння дуги без короткого замкнення, що дозволяє рівномірніше подавати дріт в зону дуги. Тому більшість обладнання для електродугової металізації має джерела струму з постійною напругою.

Суттєво впливає на формування потоку напилюваних частинок кут зустрічі електродів (дротів). Так, якщо кути зустрічі малі, виникають два потоки частинок із кожного дроту. Якщо кути зустрічі великі, утруднюється процес розпилення та ускладнюється конструкція розпилювача. Тому в результаті теоретичних розрахунків і практичних досліджень узято оптимальний кут зустрічі електродів – 30° .

У процесі роботи електродугового металізатора струмінь розпилювального повітря унаслідок зустрічі з електродами частково розсікається на дві частини, що призводить до формування неоднорідного краплинногазового потоку внаслідок його турбулізації. На турбулізацію потоку впливає також розмір та форма сопла. У разі використання циліндричних сопел вихід газу із сопла супроводжується різким зменшенням тиску, що спричиняє різке підвищення турбулізації потоку та до зниження якості покриття. Тому

для підвищення стабільності краплинногазового потоку використовують циліндричні сопла з розширеною конічною частиною (діаметр циліндричної частини 4–6 мм, діаметри конічної частини 6,5–8,5 мм при довжині до 8 мм). Недоліком таких сопел є налипання розплавленого матеріалу на циліндричній частині сопла. Тому застосовують сопла з керамічних матеріалів з мінімальною довжиною циліндричної частини (0,1–0,5 мм).

Для отримання стабільного потоку напиленого матеріалу використовують джерела струму потужністю 5–40 кВт, тиск газу для розпилення 0,35–0,55 МПа при продуктивності 60–150 м³/год. Використовуючи для розпилення повітря, треба враховувати можливу зміну хімічного складу напилених матеріалів (вигорання вуглецю, легуючих елементів – силіцію, мангану, а також утворення нітридів).

Електродуговий спосіб напилення має такі переваги: висока продуктивність (при струмі дуги 750 А можна розпилити до 30 кг/год сталевого дроту 40X); висока міцність зчеплення покриттів з основою, оскільки майже всі частинки матеріалів попадають на поверхню в розплавленому вигляді.

До недоліків способу відносяться: перегрівання напилюваних матеріалів та вигорання легуючих елементів, а також можливість напилювати лише матеріали у вигляді дроту, що суттєво зменшує номенклатуру напилюваних матеріалів.

У промислових масштабах випускають комплекти для електродугової металізації, до складу яких входять електрометалізаційні розпилювачі, джерело струму дуги, система подачі стисненого газу, касети для дроту та пульт управління. Випускають такі типи електрометалізаційних розпилювачів: ЕМ–14М, ЕМ–12, ЕМ–15, ЕМ–17 тощо.

Електрометалізатор ЕМ–14 – призначений для ручних робіт. Для подачі дроту в цьому розпилювачі використовується повітряна турбіна з індукційним регулятором швидкості подачі дроту. Принцип дії регулятора наступний: робоче колесо турбіни – це ротор, що обертається в корпусі-статорі. Статор має магніт, який може пересуватися вздовж осі ротора. Під час обертання ротора-турбіни в магнітному полі в ній виникає індукційний струм, що гальмує ротор. Значення

індукційного струму i , відповідно, гальмівної сили, залежать від положення постійного магніту. Чим більше магнітних ліній перетинає ротор, тим більше гальмівне зусилля.

Індукційний регулятор забезпечує широкий діапазон плавної зміни швидкості 1–12 м/хв. Переваги індукційного регулятора швидкості є його невелика вага за високої потужності завдяки великій кількості обертів турбіни (до 30000 об/хв).

Електрометалізатор ЕМ–12 призначений для напилення покриттів у стаціонарних умовах. Приводом механізму подачі дроту є електродвигун. Змінні шестерні редуктора дозволяють отримати 8 ступенів швидкості подачі дроту. Особливістю конструкції ЕМ–12 є також те, що ведучі ролики подачі дроту змонтовані на підвісці, яка гойдається, що забезпечує надійну подачу дроту, особливо тонкого та м'якого.

Електрометалізатор ЕМ–15 є удосконалена модифікація ЕМ–12. Основна відмінність – це вузол подачі дроту, який має двигун постійного струму з тиристорним регулятором кількості обертів, що забезпечує плавне регулювання швидкості подачі дроту в інтервалі 1–14 м/хв.

Промисловість випускає комплекти для електродугової металізації КДМ–2, КДМ–4. В комплект КДМ–2 (табл. 1.1) входять два електрометалізатори для ручних та стаціонарних робіт, тиристорне джерело струму ТІМЕЗ–500, стояк з двома котушками для дроту, пульт керування, повітряний фільтр та системою автоматичного захисту.

Комплект електродугової металізації КДМ–4М (табл. 1.2) призначений для ручного нанесення антикорозійних покриттів з цинку та алюмінію для захисту металевих конструкцій від корозії, для підвищення жаростійкості сталі, декоративної обробки поверхні, екранування тощо.

Характеристики установок для електродугового напилювання приведено в Додатку А.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики установки КДМ–2

№ п/п	Параметри	Величина
1.	Робочий струм дуги (ПР=100%), А	50-400
2.	Робоча напруга, В	17-44
3.	Продуктивність при розпилюванні дроту, кг/год: - алюміній - сталь	12,5 10,0
4.	Діаметр розпалюваного дроту, мм	1,5-2,0
5.	Витрати стисненого повітря, м ³ /год	90
6.	Робочий тиск стисненого повітря, МПа	0,5-0,6
7.	Габаритні розміри, мм	1080x618x1640
8.	Вага комплекту, кг	470

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики КДМ–4

№ п/п	Параметри	Величина
1.	Робочий струм дуги (ПР=100%), А	50-350
2.	Робоча напруга, В	15-40
3.	Продуктивність при розпилюванні дроту, кг/год: - алюміній - цинк	7,5 21,5
4.	Діаметр розпилюваного дроту, мм	1,5-2,0
5.	Витрати стисненого повітря, м ³ /год	90
6.	Робочий тиск стисненого повітря, МПа	0,5-0,6
7.	Габаритні розміри, мм	880x618x1340
8.	Вага комплекту, кг	86

1.1.4 Плазмовий спосіб

За цього способу напилені матеріали нагріваються енергією плазми, а нагрітий матеріал транспортується на напилювану поверхню продуктами

розпаду плазми. Як відомо, плазма – це повністю або частково іонізований газ; температуру плазми визначає рівень іонізації.

Для напилення використовують низькотемпературну плазму з електронною температурою $5-55 \cdot 10^3$ К. Характеристика плазмового потоку, якість покриттів значною мірою залежать від плазмотвірного газу. Різні гази та їх суміші, які використовують для напилення, вибирають виходячи з їх фізико-хімічних характеристик, інертності до матеріалів конструкції плазмотронів і напилюваних матеріалів, низької собівартості та дефіцитності.

Для плазмового напилення використовують аргон, гелій, азот, водень, пропан-бутан, повітря та їх суміші. Вибирають гази за такими основними властивостями: густиною, в'язкістю, теплоємністю, коефіцієнтом теплопровідності та потенціалом іонізації, тому що ці властивості суттєво впливають на характеристику плазмового потоку.

Так ККД нагрівання газу максимальний за високої теплопровідності плазмотвірного газу. Використання водню зумовлює найвищий ККД (80 %). Але водень в чистому вигляді не застосовують, оскільки воднева плазма агресивно діє на електроди плазмотрона, що різко знижує тривалість їх роботи. Із цієї ж причини не використовується в чистому вигляді і гелій.

Для збільшення ресурс роботи плазмотронів використовують воднево-азотну або воднево-аргонову суміш газів, які дозволяють отримати ККД 60 %. Об'ємна кількість водню в цих сумішах дорівнює 10 %.

Щоб зменшити витрати у процесі напилення застосовують дешевші гази для плазмотворення. Це повітря з пропан-бутаном (10 %) та вуглекислотою. Але використання таких газів можливе лише у плазмотронах, деталі яких виготовлено з матеріалів з високою стійкістю до ерозії та окиснення.

Використовуючи плазмовий потік для напилення, отримують такі переваги:

1. Можливість отримувати різні середовища (інертне, відновлювальне, окисне).
2. Швидкість теплопередачі напилюваному матеріалу у 20–25 разів

вища, ніж за газополуменевого, та в 3–5 разів, ніж в умовах електродугової металізації.

3. Висока кінетична енергія частинок.
4. Незначна зона термодії на напилювану поверхню.
5. Легкість отримання та регулювання робочих температур в діапазоні $2 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$ °С.

Для генерації плазми використовують плазмотрони, в яких джерелом іонізації газів можуть бути електрична дуга, лазерний промінь, надвисокочастотна енергія тощо.

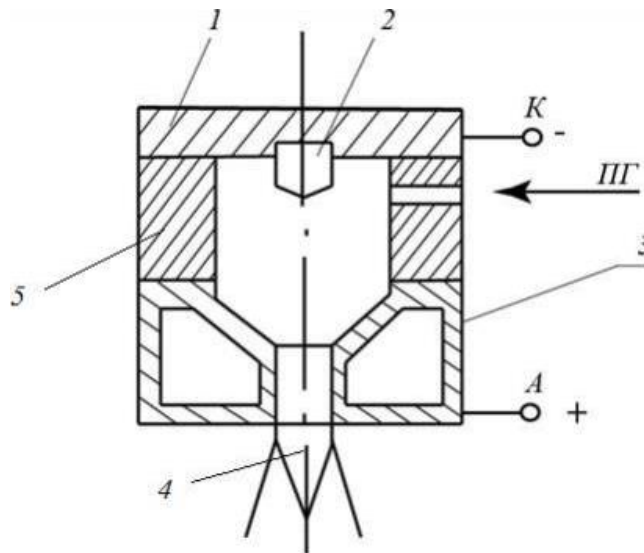
Для напилення переважно використовують плазмотрони, у яких для генерації плазми застосовують електричну дугу. Такі плазмотрони надійніші та простіші в експлуатації. Натепер в промисловості існує багато плазмотронів різних конструкцій. Це зумовлено необхідністю створення надійних та довговічних конструкцій, які дозволяють отримувати покриття високої якості з надійними експлуатаційними характеристиками.

Загальні вимоги до конструкції плазмотронів можна сформулювати так:

1. Тривала надійна генерація плазми з високим ККД. перетворення первинної енергії на енергію плазми.
2. Висока надійність проти дії електроерозії та температури.
3. Досить довга зону взаємодії плазмового потоку з дисперсними частинками напилюваного матеріалу.
4. Можливість інтенсивної та ефективної передачі енергії напилюваному матеріалу.
5. Багаторазове надійне запалювання і стабільне функціонування дугового розряду в заданому діапазоні робочих струменів і напруг.

Найуразливішими деталями плазмотрона, які лімітують його роботу, є катод та анод. Тому їх виготовляють із високоерозійних, термостійких матеріалів, і вони обов'язково мають водяне охолодження.

Принципова схема плазмотрона показана на рисунку 1.4.



1 – катодний вузол; 2 – катодна вставка; 3 – анодний вузол;
4 – плазмовий потік; 5 – ізолятор – вузол подачі плазмотвірного газу

Рисунок 1.4 – Принципова схема дугового плазмотрона

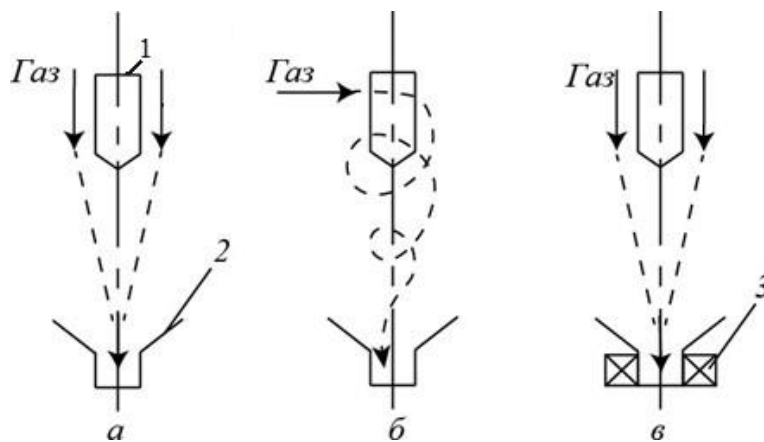
Як видно зі схеми, плазмотрон складається із трьох головних вузлів: катодного, анодного, вузла подачі матеріалу та плазмотвірного газу (ПГ).

Принцип роботи плазмотрона такий. Між катодною вставкою 2 і анодом 3 запалюється електрична дуга, через яку пропускають плазмотвірний газ, який дисоціює, іонізується і утворює плазмовий потік 4, у який вводиться напилюваний матеріал. За характером процесів, у плазмотроні, його можна розділити на дві ділянки, які відокремлює анодна пляма – місце на аноді, де фіксується дуга. На ділянці від катодної вставки до анодної плями відбувається накопичення енергії плазмотвірним газом за рахунок дисоціації та іонізації. Стовп дуги на цій ділянці відшунтований і займає невелику частину перерізу соплового каналу завдяки великій швидкості газу та електромагнітному полю дуги.

За анодною плямою теплоємність плазмового потоку зменшується, інтенсивно відбуваються процеси рекомбінації, з виділенням енергії, яку використовують для нагрівання матеріалів напилення.

Оскільки електрична дуга є нестабільним об'єктом, то для її стабілізації

використовують різні способи (газові, електромагнітні, водяні). Найпоширеніші схеми стабілізації у дугових плазмотронах зображено на рисунку 1.5.



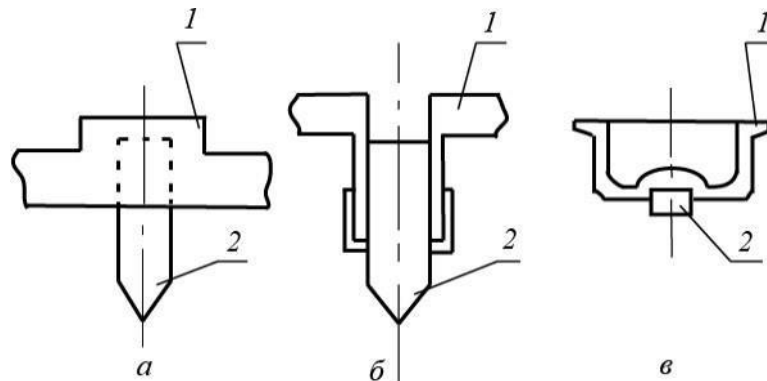
a – газова стабілізація (аксіальний потік); *б* – газова стабілізація (вихровий потік); *в* – електромагнітна стабілізація; 1 – катод; 2 – анод; 3 – магніт

Рисунок 1.5 – Схема стабілізації електричної дуги в плазмотроні

Основним способом стабілізації є газовий. Для стабілізації використовують плазмотвірний газ. Газова стабілізація може бути аксіальною (рис. 1.5, *a*), коли газ подається вздовж катоду і дуги, або вихровою (рис. 1.5, *б*), коли газ подається перпендикулярно до осі катоду та дуги й утворює вихор, всередині якого знаходиться дуга. Магнітну стабілізацію (рис. 1.5, *в*) плазмового потоку забезпечують магнітні лінії електромагніту, який знаходиться на сопловій частині плазмотрона. Цей спосіб стабілізації застосовується нечасто, оскільки він робить плазмотрон більш громіздким та збільшує його вагу.

Найбільшого поширення для стабілізації електричної дуги в плазмотроні набула вихрова, що забезпечує надійну роботу плазмотрона з одночасним підвищенням його енергетичних характеристик, бо дозволяє ізолювати плазму від стінок соплового каналу та збільшити інтенсивність взаємодії газу з дугою. Недоліки вихрової стабілізації – деякі труднощі при отриманні ламінарного потоку в процесі введення напилюваного порошку в плазмовий струм і підвищений рівень шуму.

Катодний вузол. Найбільш поширеним катодним вузлом є конструкція, де ерозійно стійкий електрод закріплюється в водоохолоджуваному мідному корпусі. Метод закріплення суттєво впливає на ресурс роботи катодного вузла. Найпростішим для заміни електрода є нарізне або цангове з'єднання електрода з корпусом (рис. 1.6, *а, б*). Але через недостатній контакт в таких з'єднаннях збільшується електричний опір переходу «катодна вставка-корпус плазмотрона», що призводить до підвищення температури в зоні контакту, а це в свою чергу, зменшує термін роботи катодної вставки. Найкращі результати отримують, коли вставка катода з'єднується з корпусом рідким штампуванням або електрозварюванням (рис. 1.6, *в*). Ресурс роботи катодного вузла залежить від матеріалів електродної вставки й інтенсивності охолодження.



а – різьбове кріплення; *б* – цанговий затискач; *в* – рідке штампування:

1 – корпус катода; *2* – катодна вставка

Рисунок 1.6 – Схема кріплення катодних вставок

Електродна вставка виготовляється з ерозійностійкого матеріалу. За густини струму до 20 А/мм² використовується чистий вольфрам, понад 20 А/мм² – вольфрам, легований торієм, оксидом торію, лантаном. Легування лантаном підвищує емісійні властивості вольфраму, що забезпечує кращі умови для запалення і стабільного горіння дуги.

Вольфрамові електроди можна використовувати лише в плазмі, утвореній з інертних та нейтрально-відновлювальних газів. У разі використання плазмотвірних газів, які мають в своєму складі азот і кисень, електродні вставки виготовляють із цирконієвих сплавів (цирконій, гафній, оксиди неодиму та

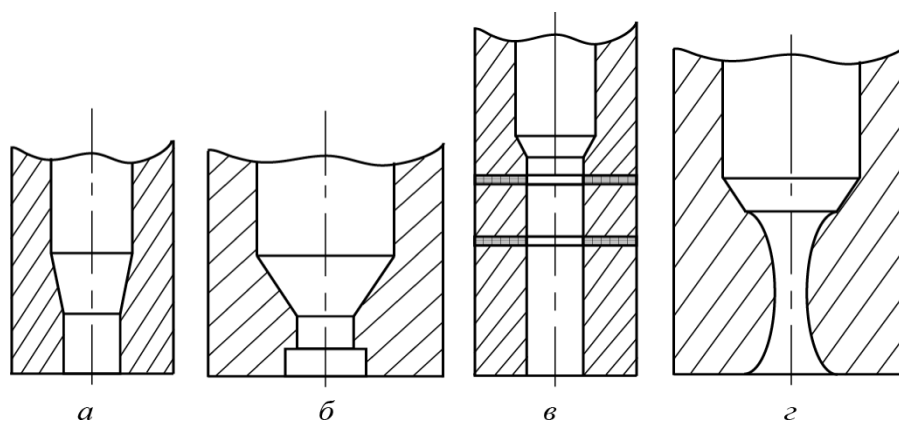
ітрію) або графіту. Застосування графіту ускладнює конструкцію плазмотрона, оскільки графіт під час роботи спрацьовується, і потрібно мати пристрій, який подає графітовий електрод, підтримуючи стабільною відстань «катодна вставка – анод».

Інтенсивність охолодження вставки залежить від способу її кріплення. Чим більша щільність з'єднання вставки з корпусом і чим менші розміри електродної вставки, тим інтенсивніше її охолодження.

Анодний вузол. Це відповідальна частина плазмотрона, бо його конструкція задає довжину дуги, її стабільність, швидкість і характер плазмового потоку. Анодний вузол утворюється соплом та іншими елементами. У більшості плазмотронів сопло є анодом і знаходиться під дією інтенсивного термічного навантаження, тому його виготовляють з міді і воно інтенсивно охолоджується.

Головні параметри конструкції сопла – його геометрична форма та розміри. Схеми конструкції сопел, широко використовуваних в дугових плазмотронах, подано на рисунку 1.7.

Найпростішу форму має сопло з нефіксованою дугою (рис 1.7, *a*). Воно має гладкий циліндричний канал невеликої довжини (10–30 мм), тому точка фіксації дуги непостійна і залежить від параметрів роботи плазмотрона (сила струму, витрати плазмотвірного газу, тощо).



a – з нефіксованою дугою; *б* – з частково фіксованою дугою;
в – з міжелектродними вставками; *г* – профільовані сопла

Рисунок 1.7 –Схеми конструкції анодних сопел

Для більш постійного місця фіксації дуги на виході соплового каналу

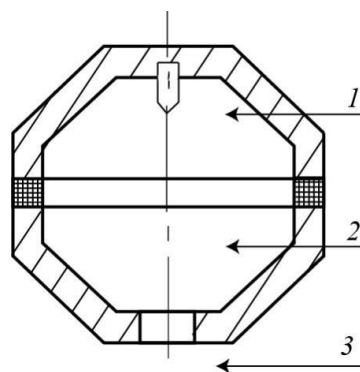
роблять виступ (рис. 1.7, б), на якому фіксується дуга, що дозволяє мати більш стабільні параметри роботи, ніж в першому випадку.

Найбільший ефект одержують при використанні сопла з міжелектродними вставками (рис. 1.7, в), які дозволяють розтягнути дугу та зафіксувати її на виході каналу сопла. Це дозволяє знизити струм дуги і підвищити напругу дуги, не змінюючи потужність. Зменшення струмового навантаження збільшує ресурс роботи аноду, а збільшення довжини дуги призводить до підвищення середньомасової температури плазмового потоку в наслідок збільшення часу взаємодії плазмотвірного газу й електричної дуги.

Профільовані сопла (рис. 1.7, г) використовують для створення надзвукових швидкостей плазмового потоку, зниження турбулізації потоку. Знаходять застосування також сопла, внутрішня поверхня яких захищена тугоплавкими матеріалами (вольфрам, цирконій, гафній).

Вузол подачі напилюваного матеріалу. Його конструкція залежить від місця введення матеріалу в плазмотрон та виду напилюваних матеріалів (порошок або дріт).

Схему, де показано місця введення матеріалів у плазмотрон ілюструє рисунок 1.8.



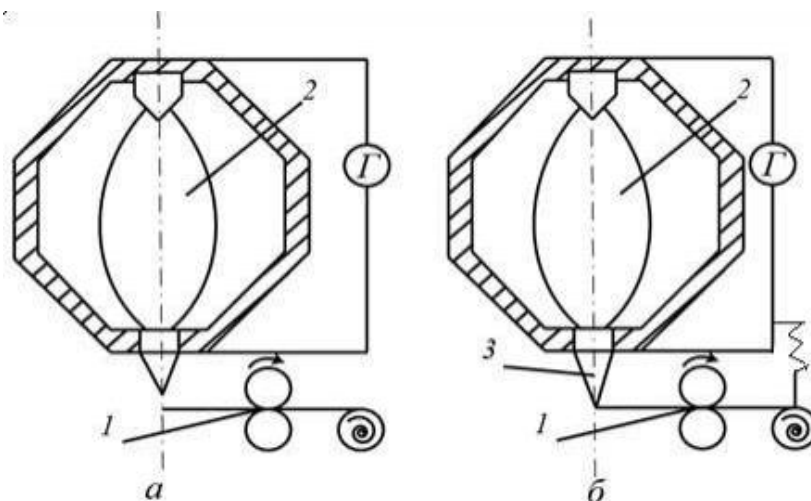
1 – до анодної плями; 2 – в анодну пляму; 3 – після анодної плями

Рисунок 1.8 – Схема введення матеріалів в плазмотрон

Із подачею дротяних матеріалів проблем мало, оскільки дріт являє собою компактний об'єкт, який подрібнюється тільки після плавлення. Тому подача дроту до анодної плями не використовують через те, що розплавлені краплі

матеріалу можуть налипати на внутрішні частини анодного сопла. Це призводить до зміни геометрії сопла і стабільності процесу напилення.

У більшості випадків дріт подається в плазмотрон після анодної плями. Можна застосовувати два способи (рис. 1.9): дріт нейтральний (рис 1.9, *a*) і дріт - анод (рис. 1.9, *б*).



a – нейтральний дріт; *б* – дріт-анод; 1 – механізм подачі дроту;

2 – основна дуга; 3 – допоміжна дуга

Рисунок 1.9 – Схема плазмового напилювання дроту

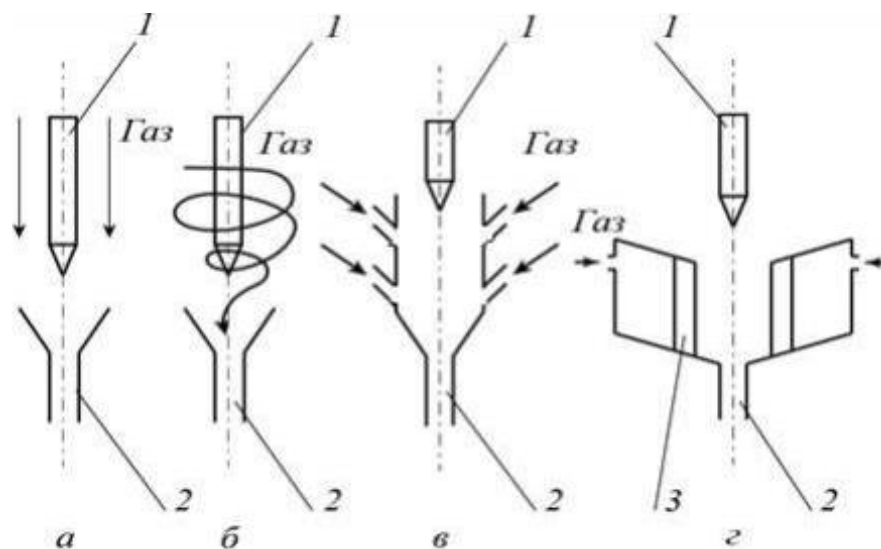
За схеми *дріт нейтральний* нагрівання, плавлення та розпилення дроту виконує плазмовий потік; за схеми *дріт-анод* на дріт подається плюсовий потенціал джерела струму дуги, тому дріт одержує від допоміжної дуги додаткову енергію. Порошок можна подавати в осьовому та радіальному напрямках. За умови осьової подачі порошку в конструкції однодугових плазмотронів виникають деякі труднощі. Тому в більшості конструкцій однодугових плазмотронів використовують радіальну подачу порошків.

Найбільш ефективною є подача порошку вище анодної плями, оскільки порошок більше часу знаходиться в плазмовому потоці і встигає нагрітися до температури плавлення і вище. Конструкція для подачі порошку до анодної плями являє собою спеціальну шайбу, яка разом з соплом-анодом утворює кільцевий канал для транспортування порошку. Із кільцевого каналу шайби порошок по спрямовувальним отворах вводиться в дуговий розряд. Залежно від

кута нахилу спрямовувальних отворів порошок може вводиться в різні зони дугового розряду.

Недолік цього способу подачі порошку такий самий, як і при подачі дроту. Тому частіше використовують подачу порошку після анодної плями: в анодне сопло, або під зріз сопла.

Вузол подачі плазмотвірного газу. Основні схеми подачі плазмотвірного газу в плазмотрон, від яких залежить конструкція цього вузла, показано на рисунку 1.10.



a – аксіальна; *б* – тангенціальна (вихрова); *в* – розподільна; *г* – транспіраційна; 1 – катод; 2 – анод; 3 – розподільна шайба

Рисунок 1.10 – Схема подачі плазмотвірного газу

Конструкція для аксіальної подачі плазмотвірного газу (рис. 10, *a*) досить складна і має кільцеву форсунку та інші деталі, які дозволяють вводити газ в катодний вузол. Аксіальна подача газу ускладнює конструкцію плазмотрона, збільшує його вагу, але дає стабільний плазмовий потік і якісніше покриття.

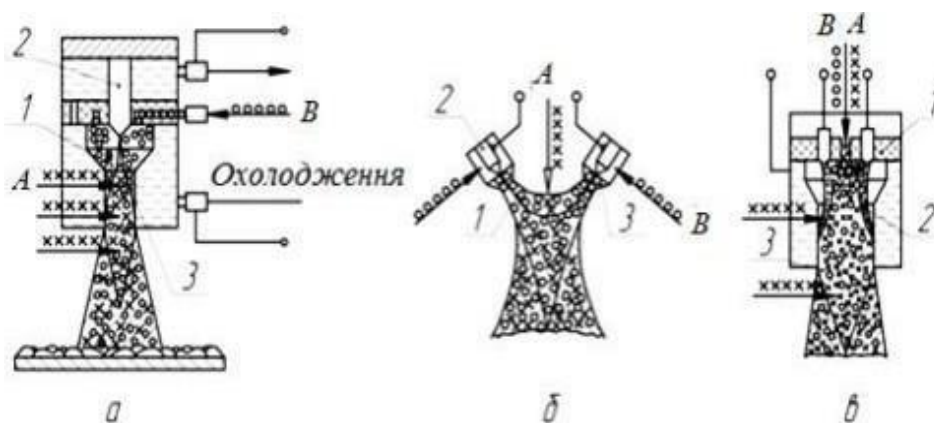
Найбільш широко застосовують вихрову стабілізацію (рис. 1.10, *б*). Конструкція вузла подачі в цьому випадку дуже проста: циліндрична форсунка, через яку подається стабілізувальний (плазмотвірний) газ, вмонтована в катодний вузол. Оскільки така система подачі плазмотвірного газу має багато недоліків (труднощі з подачею порошку, високий рівень шуму, низька

стабільність плазмового потоку), у конструкції вузлів подачі є антизавихрювач – шайба з прорізаними щілинами та закрилками, що зменшує завихрення і стабілізує потік плазмотвірного газу. Установлюють антизавихрювач біля початку соплового каналу аноду. Це дозволяє використовувати переваги аксіальної та тангенціальної систем подачі плазмотвірного газу.

Конструкція вузла при розподільній подачі (рис. 1.10, в) являє собою циліндрову шайбу з отворами, осі яких знаходяться під кутом до осі плазмотрона. Відмінність конструкції вузла для транспіраційної подачі плазмотвірного газу (рис. 1.10, з) у тому, що шайбу виготовлена з пористого матеріалу і газ через пори подається в плазмотрон і рівномірно розподіляється в ньому, обтискуючи дугу. Дві останні конструкції не знайшли широкого використання в дугових плазмотронах.

1.1.5 Конструкції плазмотронів

У промисловості застосовують плазмотрони різних конструкцій, які можна класифікувати за трьома групи: однодугові, багатодугові (багатострумкові) і трифазні (рис. 1.11).

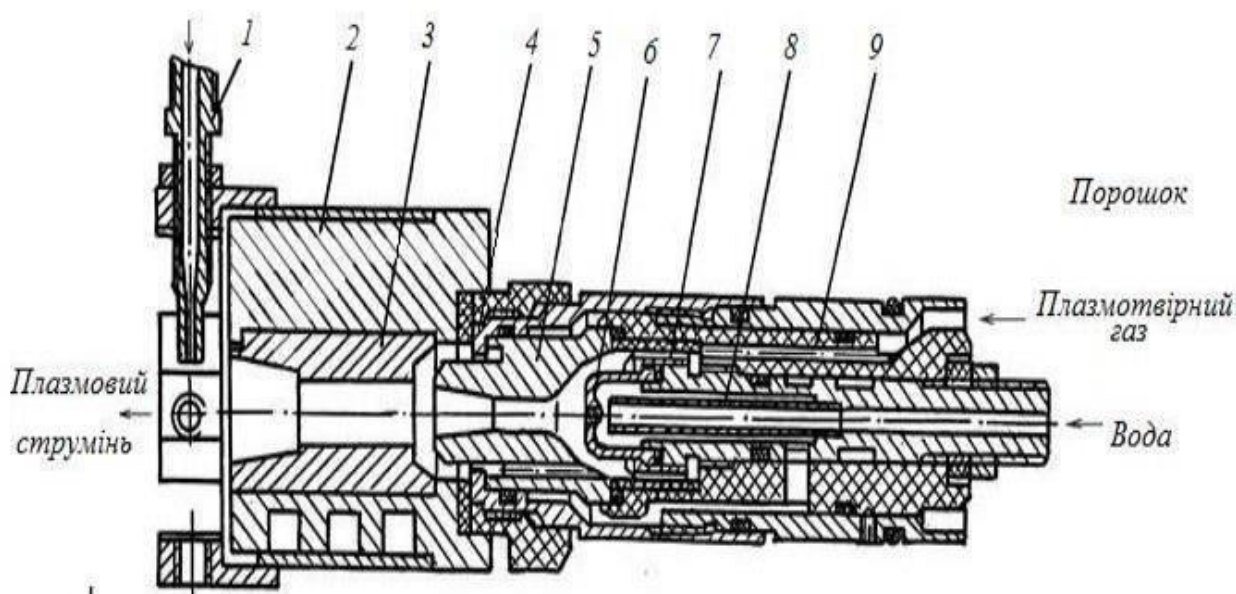


a – однодугові; *б* – двострумкові (дводугові); *в* – трифазні; 1 – катод; 2 – анод;
3 – плазмова дуга; *A* – подача розпилюваного матеріалу; *B* – подача
плазмотвірного газу

Рисунок 1.11 – Схеми плазмотронів

Однодугові плазмотрони. Найбільше поширення знайшли однодугові плазмотрони. Плазмотрон ПУН-1 (рис. 1.12) складається з катодного 4 та анодного 7 вузлів, з'єднаних через електроізоляційну шайбу. Рівномірний розподіл плазмотвірного газу по кільцю міжелектродного проміжку створює антизавихрювач.

Катодна вставка 6 виготовлена з тантал-ніобієвого сплаву і закріплена в катодотримач способом рідкої штамповки. Плазмотвірний газ – аргон або суміш повітря з метаном (до 10 %). Однодугові плазмотрони широко застосовують у промисловості, оскільки порівняно з іншими конструкціями вони менш габаритні та менш конструкційно складні. Існує багато конструкцій плазмотронів, які мають одну принципову схему, але відрізняються конструктивними елементами.



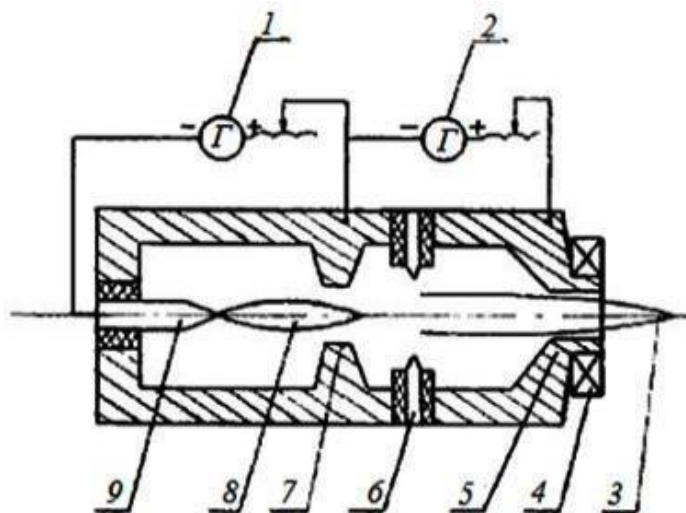
1 – подача напилюваного матеріалу; 2 – корпус ; 3 – міжелектродна вставка; 4– анодний вузол; 5 – сопло-анод; 6 – катодна вставка; 7 – катодний вузол; 8 – канал водяного охолодження; 9 – канал подачі плазмотвірного газу

Рисунок 1.12 – Плазмотрон ПУН-1

Водяне охолодження відбувається через штуцери катода і анода. Перевагу надають роздільному охолодженню катода і анода, тому що послідовне охолодження є менш ефективним. Подається та зливається вода через пустотілі

електрокабелі.

Багатоелектродні плазмотрони. Їх застосовують у промисловості досить нечасто, оскільки вони складні конструктивно, але мають великий ресурс роботи катодного і анодного вузлів. Схему багатоелектродного плазмотрона зображено на рисунку 1.13. Збільшення ресурсу роботи такого плазмотрона відбувається, по перше, завдяки розщеплення дуги по декільком електродним вставкам, що зменшує їх ерозійне руйнування. По-друге, допоміжний плазмотрон підігріває катодні вставки основного плазмотрона перед його увімкненням. Порядок роботи плазмотрона такий: вмикається допоміжний плазмотрон, плазмовий потік 8 якого, підігріває вісім катодних вставок, запресованих в мідні катодотримачі рівномірно розміщених по периметру катодного вузла.



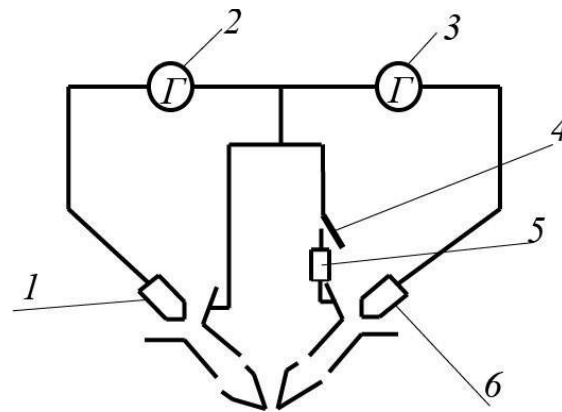
1,2 – джерела струму основного і допоміжного плазмотронів; 3 – плазмовий потік основного плазмотрона; 4 – магніт; 5 – сопло основного плазмотрона; 6 – катодні вставки основного плазмотрона; 7 – анод допоміжного плазмотрона; 8 – плазмовий потік допоміжного плазмотрона; 9 – катоддопоміжного плазмотрона

Рисунок 1.13 – Схема багатоелектродного плазмотрона

Після підігрівання катодних вставок до температури 1000–1200 °С вмикається джерело струму основного плазмотрона. При цьому струмове навантаження дуги основного плазмотрона рівномірно розділяється між вісьмома катодними вставками. Після початку роботи основного плазмотрона

допоміжний вимикається.

Багатодугові (багатострумові) плазмотрони. Переваги багатодугових плазмотронів – збільшення продуктивності напилювання, підвищення якості напилюваних покриттів. Порядок ввікнення плазмотронів (рис.1.14) такий: спочатку вмикають два плазмотрони, а потім ключем 4 вимикають плазмотрон бі система працює на один анод плазмотрона 1. Така схема має ряд недоліків: необхідність мати два джерела струму, труднощі контролю параметрів плазмового потоку та нерівномірне навантаження на анод.



1, 6 – плазмотрони; 2, 3 – генератори; 4 – ключ; 5 – реостат
Рисунок 1.14 – Схема ввікнення дводугових плазмотронів

Стабільніший плазмовий потік дає чотиридуговий плазмотрон, де чотири плазмотрони розміщено симетрично центральній осі. Крім того, така конструкція має згладжувальне кільце, що знаходиться під потенціалом анодів. Тому плазмові потоки кожного плазмотрона витягуються в кільце і формують єдиний стабільний потік.

Головний недолік багатодугових плазмотронів – потреба в кількох джерелах струму і труднощі регулювання потужності.

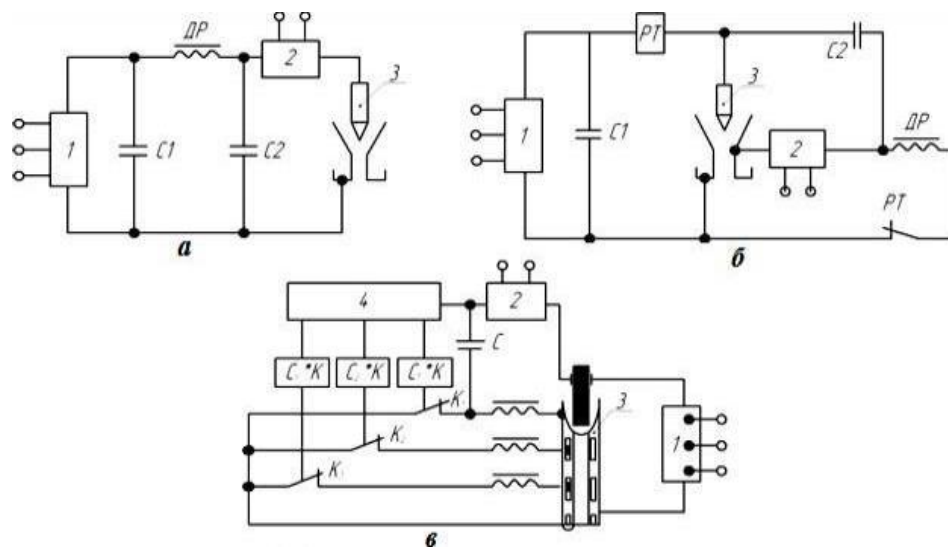
Схеми збудження дуги в плазмотронах. У плазмотронах відстань між катодом та анодом дорівнює 5–20мм, що зумовлює труднощі під час збудження дуги. Оскільки напруга джерела струму низька, то пробою такого прошарку газу не відбувається. Тому існує дві системи збудження дуги в плазмотронах: механічна й електрична.

Механічна система простіша: анод та катод закорочуються дротом діаметром 0,7–1 мм, через який протікає струм дугового розряду, що нагріває дріт до температури випаровування. Через пари металу запалюється дуга. Недоліком механічної системи збудження є ускладнення конструкції плазмотрона (потрібні механізм подачі дроту – електромагнітний чи інший, запас дроту). Тому така схема не знаходить широкого використання.

Електрична система більш складна, але вона не змінює конструкції плазмотрона. Вона являє собою малопотужний високовольтний високочастотний генератор (осцилятор), який встановлюється в пульті керування і з'єднується зі струмопідводами плазмотрона.

Осцилятор видає високовольтні (до 1000 В), високочастотні (до 300 Гц) імпульси, що пробивають газовий проміжок катод–анод і запалюють основну дугу. Після запалення дуги осцилятор вимикається. Існує декілька схем підключення осцилятора і плазмотрону (рис. 1.15).

У разі послідовного включення (рис. 1.15, а) осцилятора і плазмотрона їх потужність має бути однакова, оскільки робочий струм плазмотрона протікає через осцилятор увесь час його роботи.



а – послідовне; б – паралельне; в – підключення осцилятора та плазмотрона міжелектродними вставками; 1– джерело струму; 2 – осцилятор; 3 – плазмотрон; 4 – пульт керування; $C1, C2, DP$ – система захисту

Рисунок 1.15– Схеми підключення осцилятора і плазмотрона

Паралельне ввімкнення (рис. 1.15, б) дозволяє використовувати малопотужні осцилятори і плазмотрони будь-якої потужності. Після запалення дуги спрацьовує струмове реле (РС) і своїм нормально замкнутими контактами вимикає осцилятор із системи живлення плазмотрона.

Щоб застосувати плазмотрони з міжелектродними вставками для запалення дуги, використовують схему, подану на рисунку 1.15, в, яка дозволяє послідовно розтягнути дугу по всіх міжелектродних вставках. Для цього схема має пульт керування 4, який через систему реле дозволяє запалити дугу на першу вставку, а після її запалення перемикає осцилятор на іншу вставку, а першу вимикає, і так далі до останньої вставки.

1.1.6 Джерела струму плазмових та електродугових установок напилювання

Характеристики, які вибирають для джерел живлення установок напилення, залежать від умов горіння електричної дуги, яку використовують в установках. За електродугового напилення дуга горить між двома електродами, що плавляться, і наявний режим періодичного короткого замкнення. За плазмового напилення дуга горить між двома електродами, охолоджуваними водою, і режиму короткого замикання немає.

За електродугового напилення на дугу безперервно діє потік стисненого газу, від швидкості якого залежить циклічність роботи дуги. Для запалення дуги в цьому випадку не потрібна висока напруга, бо електроди закорочуються. Значення потрібної напруги 40–50 В. Оскільки продуктивність процесу напилення залежить від сили струму дуги, то потрібне джерело з робочим струмом 300–1000 А і плавне його регулювання. Крім того, оскільки циклічність горіння дуги велика (250–5000 Гц), треба мати джерело струму з високими динамічними характеристиками, тобто з великою швидкістю наростання струму $\frac{dI}{dt} = 500\text{--}1200 \text{ А/с}$.

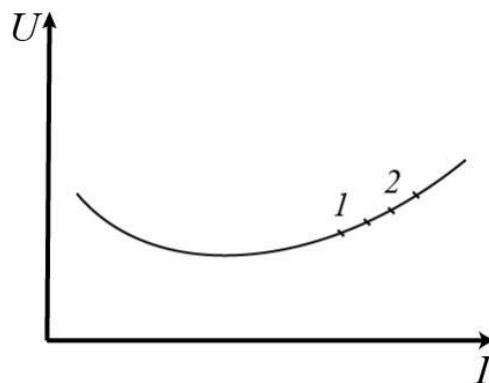
За плазмового напилення дуга горить між двома постійними електродами

в замкнутому об'ємі, стиснена плазмотвірним газом. Напруга запалення дуги в цьому випадку має бути висока, бо відстань між електродами може досягати 20 мм. Це потребує спеціальних прийомів для запалення дуги, а також наявність джерела струму з підвищеною напругою холостого ходу. Крім того, плазмотвірні гази мають високий потенціал іонізації. Так, для роботи на аргоні потрібне значення напруги 90–120 В, на азоті– 160–180 В, а на газах, які мають в своєму складі водень – 180– 320 В. Тому напругу холостого ходу джерел струму для плазмового напилення має відповідати 120–320 В. Крім того, генерація плазми потребує великої потужності, тому джерело струму має бути високоамперним і дозволяти плавне керування в діапазоні 100–1000 А.

Умови горіння дуги в плазмотронах стабільні (оскільки відстань між електродами постійна), і немає необхідності використовувати джерела струму з високими динамічними характеристиками.

1.1.7 Вольт-амперна характеристика дуги і джерел струму

Статичну вольт-амперну характеристику дуги (ВАХ), що відображає фізичні умови існування дугового розряду, показано на рисунку 1.16.



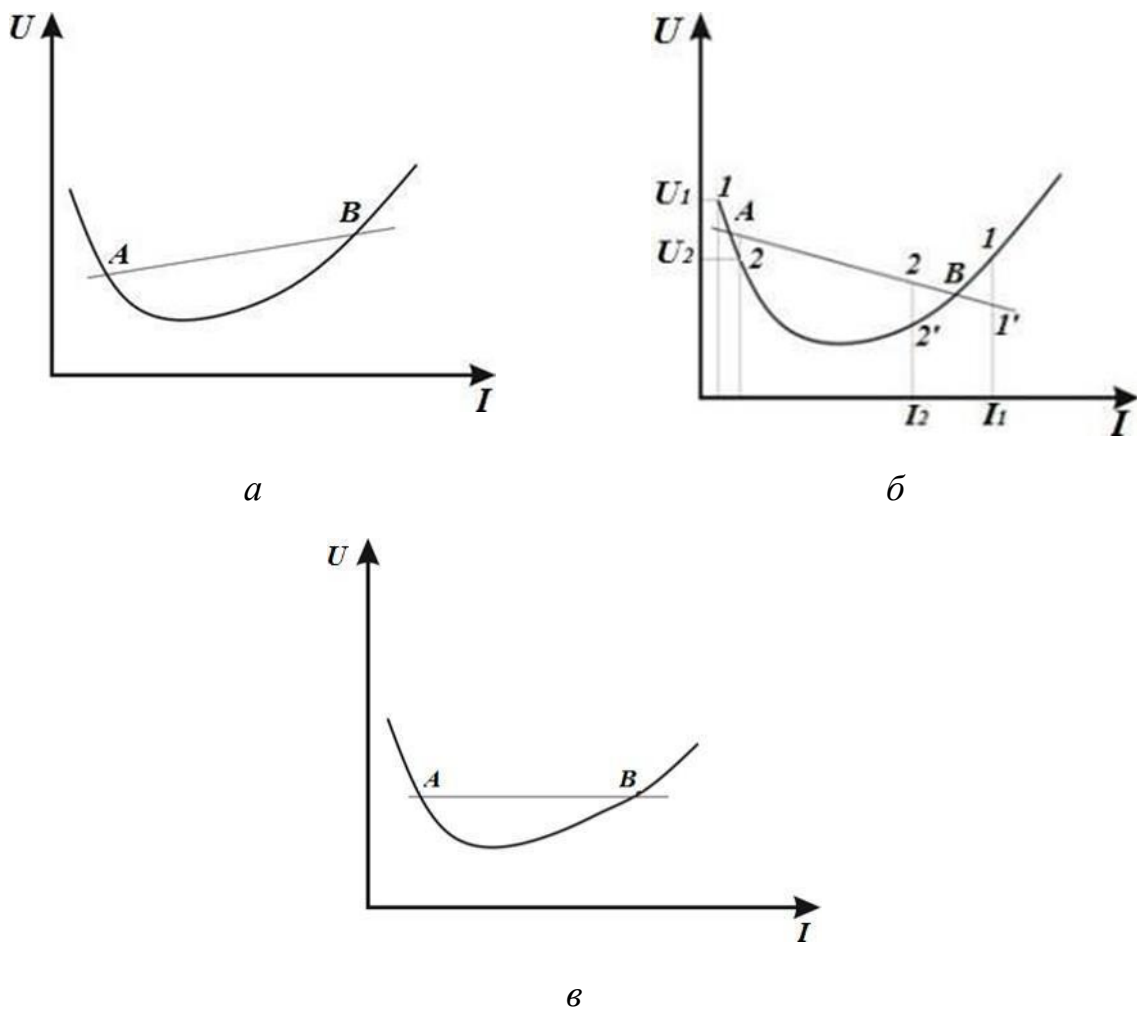
1 – ділянка, характерна для дуги, що горить у плазмотроні; 2 – ділянка, характерна для дуги, що горить в електродуговому металізаторі

Рисунок 1.16 – Статична ВАХ дуги

Згідно з цими умовами за низької густини струму ВАХ спадна, за середньої – жорстка і за високої – зростаюча. Це пов'язано з фізичними умовами

існування дугового розряду. Зі збільшенням струму на початковій ділянці ВАХ дуги збільшується іонізація частинок і напруга спадає. Подальше зростання струму зумовлює збільшення кількості носіїв електричного струму і зменшення опору міжелектродного проміжку. Тому струм зростає, а напруга залишається незмінною. Після встановлення динамічної рівноваги між кількістю – заряджених частинок, що виникають і що виділяються в результаті дифузії в навколишнє середовище та рекомбінації, подальше підвищення струму супроводжується збільшенням напруги дуги. На графіку (рис. 1.16) позначено дві ділянки: перша ділянка для дуги, що горить у плазмотроні, а друга – для дуги, що горить в електродуговому металізаторі.

Вибираючи джерело струму дуги, слід виходити із його ВАХ. Вольтамперні характеристики дуги і джерела струму ілюструє рисунок 1.17.



а – спадна; б – жорстка; в – зростаюча

Рисунок 1.17 – Зовнішня ВАХ джерела струму і статична ВАХ дуги

Зовнішня ВАХ джерела струму визначає стабільність дуги в установленому режимі. Принципову придатність джерела струму для живлення дуги можна визначити, розглядаючи відповідність ВАХ джерела струму і дуги. У точках перетину статичної ВАХ дуги із зовнішньою ВАХ джерела струму (A , B на рис.1.17, a) існує рівність струму і напруги. Щоб вирішити питання про стабільне горіння дуги в точках перехрещення необхідно розглянути умови горіння при невеликих відхиленнях струму від точки рівноваги (точки A і B). З рисунка видно, що у разі горіння дуги в точці A напруга і струм дуги і джерела рівні. За умови зниження струму дуги (точка 1) треба мати більш високу напругу згідно з ВАХ дуги для її горіння. З приведених графіків видно, що напруга, потрібна для підтримки горіння дуги (точка 1) набагато більша, ніж можуть дати джерела, і тому струм дуги знижується до значень точки A . У разі збільшення струму дуги (точка 2) потрібно зменшити напругу, щоб зменшити струм дуги до точки A . Але в точці 2 джерело струму не зменшує напругу, а навпаки, збільшує, і значення струму неконтрольовано зростає. Це доводить, що використовувати дугу в спадаючій області не доцільно, оскільки є великі труднощі зі стабілізацією горіння дуги.

У точці B за зменшення величини струму до точки 2 напруга джерела струму вища (точка $2'$), ніж в точці 2 , тому енергія джерела збільшить значення струму дуги до точки B . У разі підвищенні струму до точки 1 напруга джерела струму менша (точка $1'$) ніж в точці 1 тому струм дуги, не маючи енергетичної підтримки, знизиться до значення точки B .

Отже точка B є точкою стійкого горіння дуги. В цій точці виконується нерівність

$$\frac{dU_d}{dI_d} > \frac{dU_{дж}}{dI_{дж}}, \quad (1)$$

де U_d , $U_{дж}$, I_d , $I_{дж}$ – відповідно напруга і струм дуги та джерела струму.

Нерівність (1) є умовою стабільного горіння дуги та джерела струму. Її можна записати в зручнішому вигляді через загальний динамічний опір дуги і джерела струму:

$$K_d = \left(\frac{dU_d}{dI_d} - \frac{dU_{дж}}{dI_{дж}} \right) > 0 \quad (2)$$

Аналізуючи графічні залежності, можна зробити такі висновки:

1. Для стабільного горіння дуги зі спадаючою ВАХ $\left(\frac{dU_d}{dI_d} \right) < 0$ потрібно використовувати джерела струму тільки із зовнішньою спадною ВАХ.
2. За умови жорсткої ВАХ дуги $\left(\frac{dU_d}{dI_d} \right) = 0$ джерела струму повинні мати зовнішню спадну характеристику.
3. Для стабільного горіння дуги, яка має зростаючу ВАХ, можна використовувати джерело струму з будь-якою ВАХ, крім джерел з її зростанням.
4. Оскільки робочі ділянки статистичної ВАХ в плазмотроні та електродуговому металізаторі розміщено на зростаючій кривій залежності, то для їх живлення можна використовувати джерела струму з будь-якою характеристикою, для якої виконується нерівність $K_d > 0$.
5. Для живлення дуги в плазмотроні треба використовувати джерела струму з ВАХ, що круто падає, оскільки в цьому випадку з коливанням напруги дуги величина струму змінюється мало.
6. Для живлення дуги в електродугових металізаторах слід застосовувати джерела струму з жорсткою або зростаючою ВАХ, оскільки в цьому разі покращується саморегулювання дуги і стабільність процесу.

1.2 Газополуменеві способи напилювання покриттів

1.2.1 Газокисневий (детонаційний) спосіб напилювання

Розробка нових способів напилення спрямована на збільшення енергії частинок матеріалів, що зумовлює підвищення якості покриттів. Найширшого розвитку набули способи напилення, у яких використано енергію вибуху газових сумішей. Такі способи названо детонаційними.

Явище детонації газів являє собою поширення горіння з рівномірною, фіксованою для кожного горючого газу надзвуковою швидкістю.

Процеси, що перебігають у трубі, закритій з одного боку, можна згрупувати так:

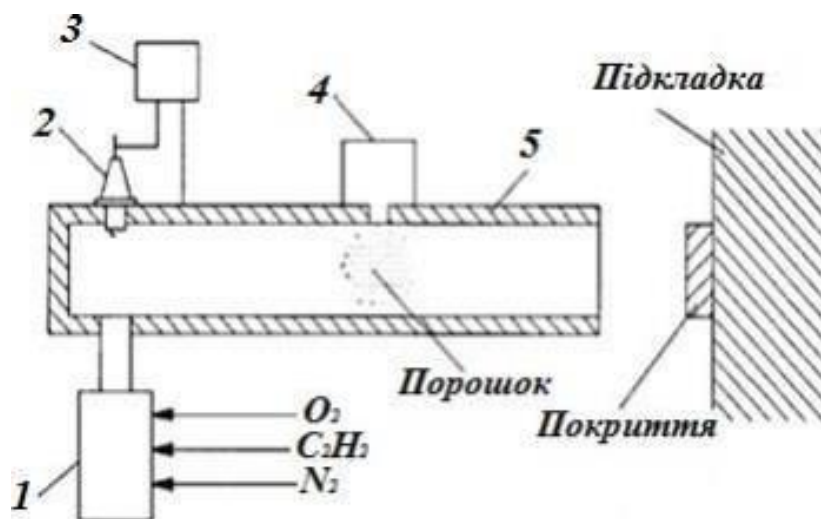
1. У наслідок запалення суміші виникає сферичне полум'я, що поширюється радіально.

2. Після досягнення полум'ям бокових стінок подальше розширення нагрітого газу відбувається тільки в напрямі відкритої частини ствола. Полум'я приймає куполовидну форму з вершиною, що рухається з прискоренням до відкритої частини ствола і діє як поршень.

3. У ствол подається напилюваний матеріал, який змішується з продуктами детонації, нагрівається, розганяється в напрямку виходу зі ствола.

4. Напилюваний матеріал потрапляє на напилювану поверхню і формує покриття.

Схема роботи детонаційних установок приведена на рисунку 1.18.



1 – блок газів; 2 – підпалювач; 3 – блок керування підпалювачем;

4 – дозатор порошку; 5 – ствол

Рисунок 1.18 – Схема детонаційної установки

На першому етапі газова суміш подається в ствол установки в заданому технологією напилення об'ємі. У другий етап подається напилюваний матеріал, одночасно запалюється газова суміш. Третій етап – взаємодія продуктів

детонації з порошком, його захоплення і транспортування на вихід зі ствола установки. І четвертий етап – транспортування матеріалу до поверхні напилення і утворення покриття. Швидкість частинок матеріалу може досягати 2000 м/с.

Детонаційне напилення має такі переваги:

1. Завдяки великій швидкості можна отримати покриття з меншою тепловою енергією.
2. Висока активація процесу з'єднання частинок і поверхні, на яку напилюється матеріал, завдяки великій швидкості частинок.
3. Немає обмежень щодо складу напилюваних матеріалів.
4. Якість покриттів (фізико-хімічні, експлуатаційні властивості) вища за якість покриттів, одержаних іншими методами.

Недоліки цього способу: не вдається отримати покриття на поверхні, яка має твердість більше 60HRC. Крім того, під час роботи устаткування для детонаційного напилення створюється високий рівень шуму (до 140 дБ).

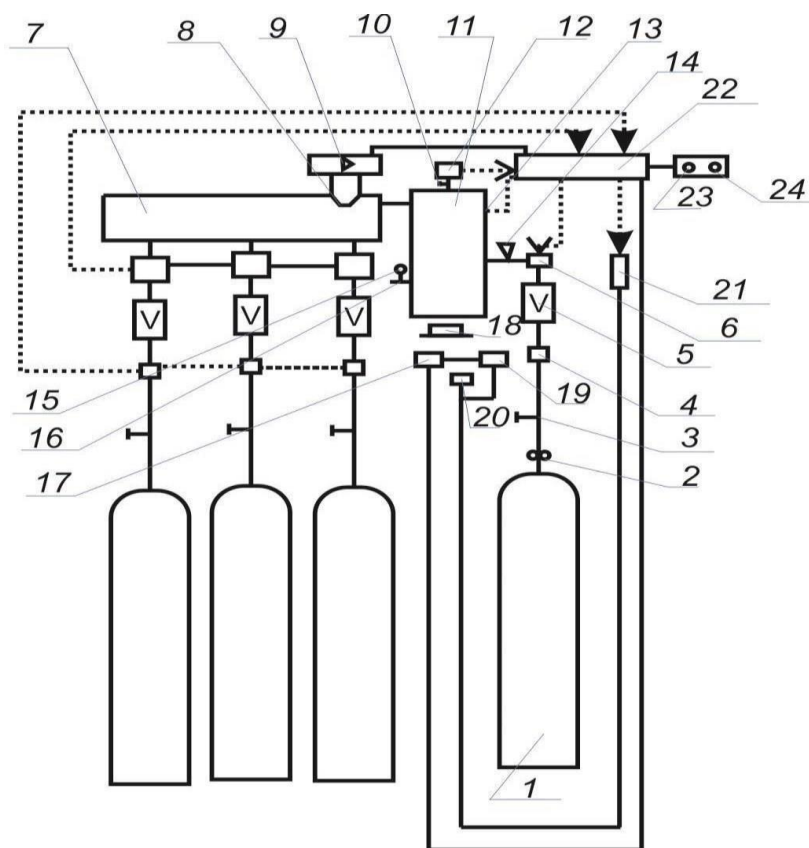
1.2.2 Обладнання для детонаційного напилювання

Продуктивність роботи детонаційних установок залежить від кількості пострілів у секунду, яка, в свою чергу, залежить від швидкості роботи механізмів, що подають гази і порошок в ствол установки. Детонаційні установки працюють в автоматичному режимі. У промисловості застосовують кілька конструкцій детонаційних установок, що мають деякі конструкційні відмінності, але однакову принципову схему, яку подано на рисунку 1.19.

Як видно з принципової схеми детонаційної установки, вона має блок керування 12, до якого надходить інформація про тиск газів 15, охолоджувальної води 9, температуру змішувача газів 4 та де формуються сигнали керування на клапани подачі газів 17, пристрій підпалювання газової суміші 10 та пристрій керування переміщенням деталі, на яку напилюють покриття 14.

Основними вузлами детонаційної установки є ствол, блок подачі газів, блок подачі напилюваного матеріалу, а також електронна система керування та

маніпулятор.



1 – балони; 2 – вентиль; 3 – манометр; 4 – камера змішування; 5 – термопара;
6 – підсилювач сигналу; 7 – злив води; 8 – ствол; 9 – блок вимірювання
температури води; 10 – пристрій підпалювання газової суміші; 11 – дозатор; 12
– блок керування; 13 – пульт; 14 – пристрій керування маніпулятором; 15 –
стабілізатор тиску; 16 – ротаметри;
17 – клапани; 18 – вентилі; 19 – манометри; 20 – напускний клапан;
21 – деталь; 22, 23, 24 – двигуни маніпулятора;

Рисунок 1.19 – Принципова схема детонаційної установки

Ствол. Геометричні розміри ствола суттєво впливають на якість покриттів і продуктивність. Так, збільшення діаметру ствола від 12 до 22 мм удвічі підвищує швидкість руху частинок порошку. Зі збільшенням довжини ствола підвищується температура порошку та швидкість біля виходу зі ствола.

Розрахункові та практичні дані дають оптимальні розміри стволів. Діаметр – від 16 до 50 мм: для оксидних та металевих систем – 16–20 мм, для тугоплавких сполук – 20–28 мм. Стволи діаметром більше 50 мм не

застосовують, оскільки збільшується рівень шуму та підвищується небезпека експлуатації через велику кількість газів в стволі. Оптимальна довжина ствола знаходиться в інтервалі 1–2,5 м, що дозволяє отримати високу якість покриттів та підвищену продуктивність.

Крім указаних геометричних параметрів, ствол має відповідати таким умовам:

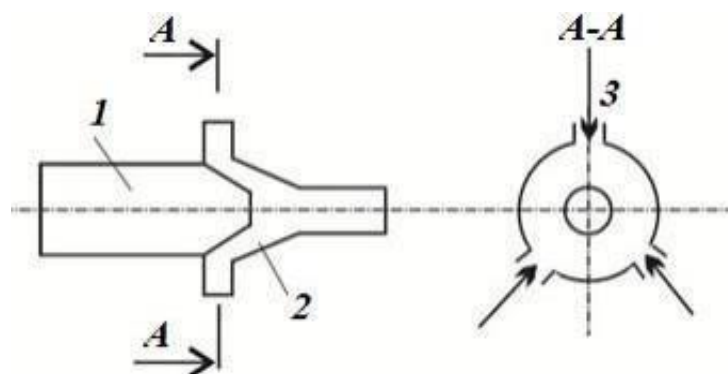
1. Товщина стінок не має перевищувати 3 мм, щоб не ускладнювати тепловідведення.

2. Ствол виготовляють із нержавіючою сталі, яка не має взаємодіяти з продуктами детонації.

3. Поверхня ствола від місця введення порошку до виходу зі ствола має бути гладенькою, не мати виступів тощо, щоб не змінювати траєкторію руху порошку.

У більшості промислових установок використовують циліндричні стволи. Недоліком циліндричних стволів є те, що дуже важко рівномірно розподілити порошок у газовій суміші й отримати плоский фронт детонаційної хвилі. Тому на тепер є багато пропозицій щодо конструкції стволів.

Схему ствола, який складається з двох частин: вибухової камери 1 та інжекційного пристрою для подачі матеріалу, показано на рисунку 1.20.



1 – вибухова камера; 2 – інжектор; 3 – подача порошку

Рисунок 1.20 – Схема ствола з перемінним поперечним перерізом

Під час проходження детонаційної хвилі через інжекційний пристрій у камері подачі порошку знижується тиск, що призводить до затягування повітря

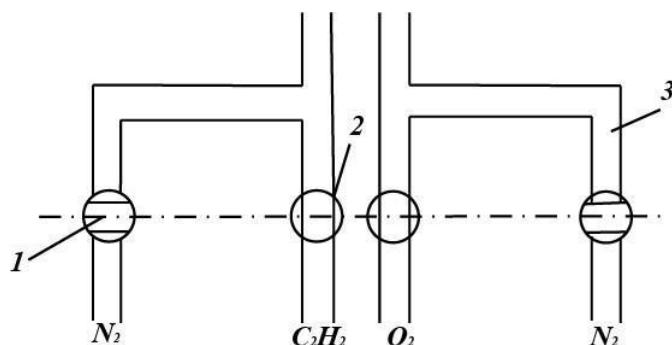
з порошком в ствол. Конфігурація камери транспортування порошку виконана так, щоб фронт детонаційної хвилі вирівнювався і ставав плоским, що збільшує якість покриттів. Такі стволи ще широкого не використовують, оскільки вони конструкційно складні.

Блок подачі газів. Основне завдання – точно дозувати і змішувати горючий газ з окиснювачем і безперебійно подавати його в ствол із заданою швидкістю. Крім цього, блок має не допускати детонаційній хвилі поширюватись у магістралі газопроводів.

Основним вузлом блока подачі є клапанні системи. За видом клапанних систем блоки подачі газів можна розподілити на 3 групи.

Перша група – механічні. Клапани виготовлені з металу, пересуваються в трубках, що мають отвори, з'єднані з газопроводом і стволом установки (рис. 1.21). Приводом цих клапанів є розподільний вал. Співвідношення газів регулюється зміною щілин клапанів, жорстким зв'язаних між собою.

Основний недолік цих блоків – наявність пар тертя, що під час роботи спрацьовуються та потребують періодичного ремонту. Крім того, такі системи мають низьку швидкість роботи. Тому в промислових установках їх використовують нечасто.



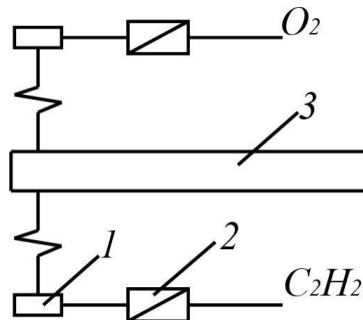
1 – клапан; 2 – сідло клапана; 3 – газопровід

Рисунок 1.21 – Схема механічних клапанів

Друга група більш досконаліша, оскільки має менше пар тертя. Ці блоки подачі мають магнітні клапанні системи. Кількість газів, що подають у ствол, залежить від часу, на який клапан відкривається, а час регулюють команди,

які подаються на електромагніт. Переваги блоків подачі газів з електромагнітними клапанними системами: надійність у роботі, довговічність і швидкодія, тому їх широко застосовують в сучасних детонаційних установках.

Третя група блоків подачі газів має безклапанну систему, що дозволяє вводити газову суміш прямою током в ствол установки (рис. 1.22).

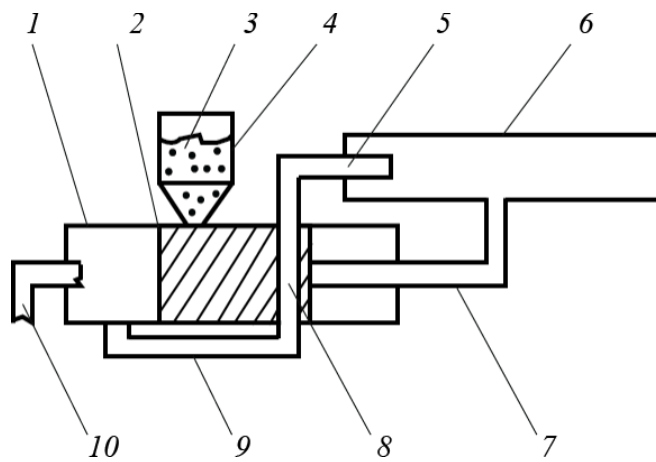


1 – односторонній вентиль; 2 – полум'ягасник; 3 – ствол

Рисунок 1.22 – Схема безклапанної подачі газів в ствол установки

Односторонній вентиль може пропускати газ лише з одного боку (з боку газопроводу). Працюють такі вентиля таким чином: коли тиск в газопроводі вищий, ніж в стволі, вентиль відкривається, і газ надходить у ствол. Під час детонації тиск у стволі і в трубопроводах до вентиля більший, ніж в трубопроводах, які підводять газ до вентиля, тому вентиль закривається. По закінченню процесу детонації у стволі тиск знижується, і вентиль відкривається, подаючи газову суміш в ствол. Полум'ягасник захищає вентиль від значного нагрівання. Натепер конструктивна розробка таких систем ще не досконала, але ці системи досить перспективні, і в майбутньому знайдуть широке використання.

Блок подачі напилюваного порошку. Блок має пристрій для дозування порошку і його подачі в ствол. Переважно використовують два типи пристроїв з вимушеною та інжекційною подачею. Схема дозатора з вимушеною подачею порошку зображена на рисунку 1.23.

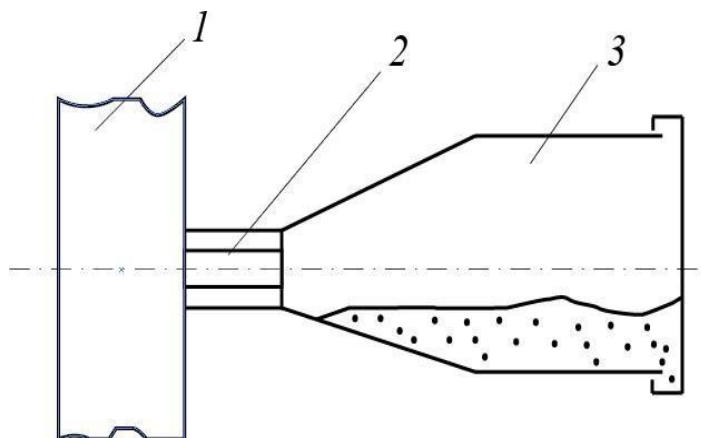


1 – корпус; 2 – поршень; 3 – порошок; 4 – бункер; 5, 7, 9, 10 – трубопроводи; 6 – ствол; 8 – дозувальний отвір

Рисунок 1.23 – Схема дозатора з вимушеною подачею порошку

Принцип роботи цього дозатора такий: у початковому стані дозатора поршень 2 знаходиться ліворуч, а його отвір 8 розміщений під бункером 4 і заповнюється порошком. Через трубку 10 подається транспортуючий газ, що переміщує поршень праворуч, поки отвір поршня з порошком не співпадатиме з трубкою 9. Далі транспортувальний газ виштовхує порошок через трубку 5 у ствол. Під час вибуху в стволі частина газів поступає через трубку 7, тисне на поршень і переводить його в початковий стан. Недоліком такого дозатора є швидке спрацювання поршня, особливо при дозуванні абразивних матеріалів, але точність дозування досить висока.

Дозатор інжекційного типу представлений на рисунку 1.24



1 – ствол; 2 – регульований отвір; 3 – камера з порошком

Рисунок 1.24 – Схема дозатора інжекційного типу

Принцип роботи дозатора такий. Після вибуху газової суміші за фронтом детонаційної хвилі є область низького тиску. Коли область проходить повз регульований отвір, порошок всмоктується в ствол, оскільки тиск у камері з порошком вищий. Кількість порошку, що подається в ствол, залежить від діаметру регульованого отвору. Єдиним недоліком такого дозатора – не висока точність дозування для порошоків, що мають розмір більше 100 мкм.

Установки для детонаційного напилення, які застосовують у промисловості, мають одну принципову схему і відрізняються конструктивними елементами та функціональними блоками, використовуваними газами та продуктивністю напилення. Їхні характеристики наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Устаткування для детонаційно-газового нанесення покриттів

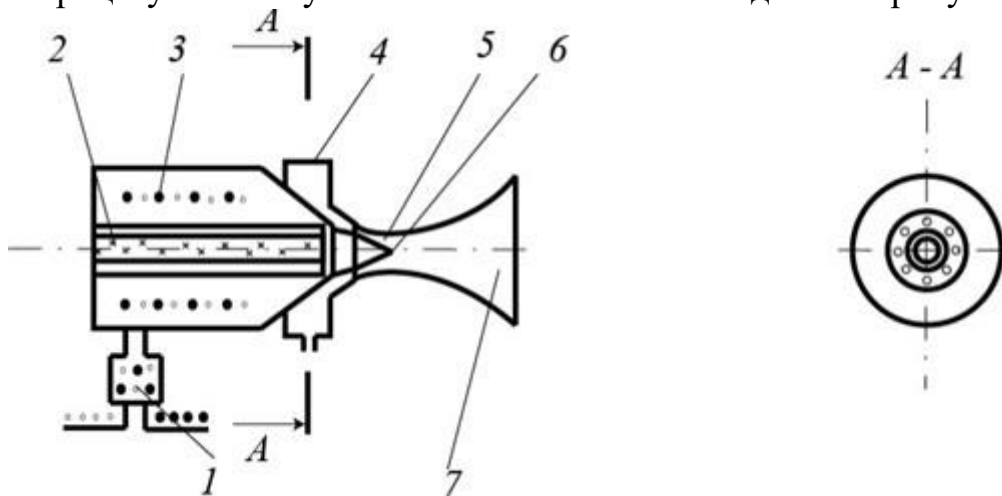
Назва	Тип	Продуктивність, кг/год	Гази		Споживана потужність, Вт
			Вид	Втрати, м ³ / год	
Установка для детонаційного нанесення покриттів	УДН-2М	2–8	Кисень Ацетилен Повітря	2,0 1,4 3,0	300
Детонаційно-газова установка	«Дніпро»		Кисень Ацетилен або пропан-бутан	1,8–5,4 1,8–5,4 1, 2–3, 6	250
Автоматич-ний детонаційний комплекс	АДК	1–9	Кисень Ацетилен Азот	1,5 1,5 4,0	300
Детонаційно-газова установка	ДН5М	0,5–6	Кисень Ацетилен Азот	0,5– 4, 0 0,5–3,0 0,12–0,72	300
Газодетонаційна установка		3–5	Кисень Ацетилен Азот	3,5 3,0 3, 5	600
”Зевс” (дослідно-промисловий зразок)		0,72 – по Al ₂ O ₃	Кисень Ацетилен Пропан-бутан Азот	5,0 2,0 1,0 0,1 1,0 0,1	500
Детонаційна установка	АУДН-2М	2, 5... 4,0	Кисень Ацетилен Азот	1,0–2,5 1,0–2,5 2,5–3.5	100

1.2.3 Газоповітряні способи напилювання

Цей спосіб нанесення покриттів використовує як джерело тепла для нагрівання матеріалів полум'я суміші горючих газів з киснем або повітрям. Для розпилення матеріалів і транспортування його на поверхню напилення застосовують стиснене повітря.

Як горючі гази використовують ацетилен, пропан, бутан тощо. Найвищу температуру газового полум'я дає ацетилен-киснева суміш (3373–3473 К).

Схема процесу газополуменевого напилювання подано на рисунку 1.25.



1 – камера змішування; 2 – сопло подачі матеріалів; 3 – сопло подачі горючої суміші; 4 – сопло подачі стисненого повітря; 5 – газовий потік; 6 – повітряний обтискний потік; 7 – краплинногазовий потік

Рисунок 1.25 – Схема газоповітряного нанесення покриттів

Горючий газ з киснем змішуються в змішувачі 1 і подаються в газополуменеве сопло 3, яке має на виході 8 отворів по своєму периметру. Суміш на виході з отворів запалюється. Напилюваний матеріал подається в полум'я через сопло 2. Порошок транспортується частіше киснем. Повітряне сопло 4 утворює потік 6, який стискує полум'я, захоплює нагріті частинки порошку і транспортує їх на поверхню напилення.

Повітряний потік подовжує тепловий потік 5, витягуючи його вздовж осі розпилювача, що збільшує час взаємодії розпилювального матеріалу з високотемпературною частиною газового потоку. Крім того, обтискний потік

повітря зменшує турбулізацію потоку за рахунок ізоляції краплинногазового потоку від нерухомого повітря.

Газополуменеві потоки за багатьма параметрами подібні до плазмових. Переваги газоповітряного напилення такі:

1. Низька собівартість покриттів, так як експлуатаційні витрати досить низькі (відсутні потужні джерела плавлення та складне обладнання високої вартості).

2. Покриття можна наносити в різних умовах, так як установки газоповітряного напилення досить мобільні.

До недоліків газополуменевого напилення відносять такі:

1. Температура напилюваних матеріалів, не перевищує 2000 °С.

2. Відносна мала продуктивність до 10 кг/год і підвищена пористість покриттів, що потребує додаткової операції – оплавлення.

1.2.4 Обладнання для газоповітряного напилювання покриттів

Установки газоповітряного напилення містять такі основні елементи:

1. Розпилювальна головка для розпилення порошку або дроту.

2. Пристрій для подачі матеріалів для напилення.

3. Система подачі газів.

4. Мастиловологовіддільник.

5. Прилади для контролю параметрів напилення.

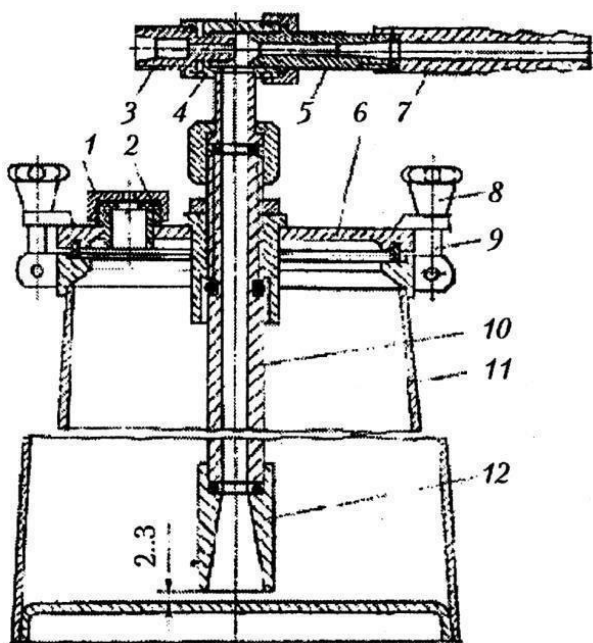
Установка газоповітряна для порошкового напилення УГПЛ призначена для ручного напилення покриттів з порошків цинку, термопластичних пластмас та інших матеріалів з температурою плавлення до 800 °С. Комплект установки складають: газовий металізатор для напилення, дозатор порошку, стояк, шланги, редуктори для подачі кисню й горючого газу.

Конструктивно газові металізатори для напилення порошку відрізняються один від одного, але вони мають одну принципову схему: порошок подається в центральну частину полум'я киснем, який догорає в

полум'ї не знижуючи його температуру. Повітря має стискувати полум'я з порошком і транспортувати його на поверхню напилення.

Дозатор порошку установки УГПЛ, схему якого ілюструє рисунок 1.26, дозволяє створювати оптимальні умови для напилювання покриттів з різних за властивостями (розмірами, формою) порошоків.

Дозатор складається з бачка 11, який герметично закривається кришкою 6 з допомогою гвинтів 9 і маховика 8. На кришці всередині бачка вкручена трубка 10 з забірником 12 так, що між торцем забірника і дном бачка проміжок становить 2–3 мм. На трубці 10 встановлено трійник 4 з інжектором 3, камерою змішування 5 і насадкою 7. Через горловину кришки 1, яка заглушується під час роботи заглушкою 2, засипають порошок матеріал. Стиснене повітря, проходячи в інжектор дозатора порошку, створює в трубці 10 і бачку 11 розрідження.



- 1 – горловина; 2 – заглушка; 3 – інжектор; 4 – трійник;
5 – камера змішування; 6 – кришка; 7 – насадка; 8 – маховик; 9 – гвинт;
10 – трубка; 11 – бачок; 12 – забірник

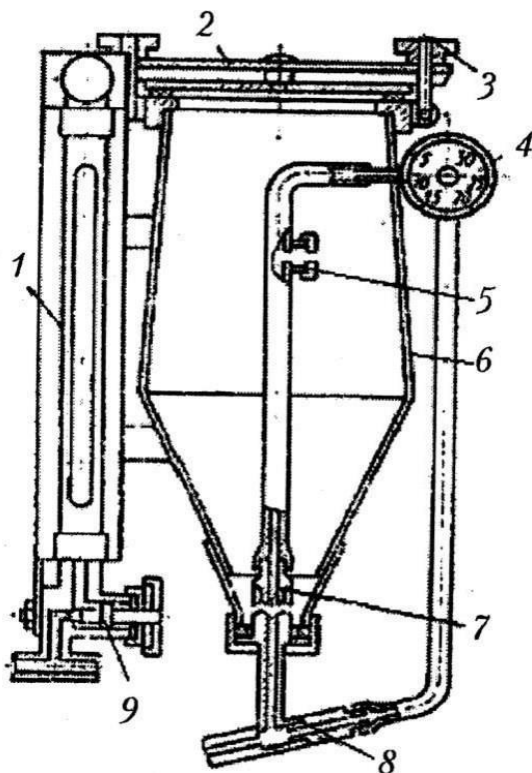
Рисунок 1.26 – Дозатор порошку установки УГПЛ

Порошок всмоктується в забірник 12 з бачка і через камеру змішування 5 і насадку 7 транспортується по гнучкій трубці в газовий металізатор. Кількість

порошку, який подається в металізатор, залежить від кількості повітря, що подається в інжектор.

Установка газополуменева для наплення порошків УПН-8 призначена для наплення порошкових матеріалів з температурою плавлення до 2273 К, таких як оксиди алюмінію, ніхром, карбідні композиції та самофлюсівні сплави. Передбачена можливість подальшого оплавлення нанесених покриттів.

Підвищення температури горючої суміші досягається за рахунок того, що газом, який транспортує порошок, є кисень, який догорає в полум'ї, а не охолоджує його, як це відбувається за умови використанні повітря для транспортування. Крім того в установці УПН-8 використовується дозатор, схема якого представлена на рисунку 1.27.



1 – ротаметр; 2 – кришка; 3 – маховик; 4, 9 – вентилі; 5 – регулююча шайба;
6 – бункер; 7, 8 – інжекторні пристрої

Рисунок 1.27 – Дозатор установки УПН-8

Дозатор представляє собою бункер 6 з кришкою 2 для засипання порошку напильованого матеріалу. Кількість порошку, який подається до металізатора

визначається витратами кисню, який проходить через регулювальний вентиль 4 та інжектора 8. Витрати кисню регулюються вентилем.

Характеристики найпоширеніших установок для газополуменевого напилювання матеріалів приведені в таблиці 1.4.

Для газополуменевого напилювання матеріалів в вигляді дроту використовують газові металізатори МПІ-4 та МПІ-5. Металізатор МПІ-4 призначений для газополуменевого нанесення покриттів з дротяних матеріалів (цинк, алюміній, сталь, бронза тощо).

Металізатор працює на суміші ацетилен-кисень і пропан-бутан-кисень. Приводом металізатора є повітряна турбіна з індукційним регулятором швидкості обертання.

Металізатор МПІ-5 має більш надійнішу конструкцію вузла подачі дроту.

Таблиця 1.4 – Устаткування для газополуменевого напилювання покриттів

Тип установки	Продуктивність, кг/год (самофлюсівні сплави)	Робочі гази	Розмір частинок порошку, мкм	Кількість потрібних газів, м ³ /год	
				Ацетилен	Кисень
УПН-8-68	8,5	Кисень Ацетилен	30–150	0,2	0,25
Л5405	8,0	Кисень Ацетилен Пропан- бутан	До 125	0,23	0,41
УГПТ	12,2	Кисень Ацетилен	30–160	0,11	0,24
УПТР-1	9,6	Кисень Ацетилен	30–160	0,09	0,17

Швидкість подачі дроту залежить від швидкості обертання ротора електродвигуна, яку регулює тиристорний пристрій.

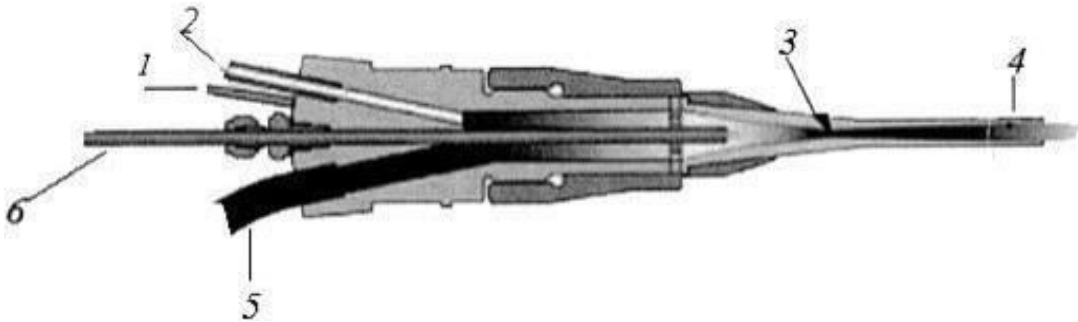
1.2.5 Газодинамічне напилювання

При газодинамічному способі нанесення покриттів тверді частинки порошків рухаються з високою швидкістю і за рахунок перетворення кінетичної

енергії в теплову на поверхні виробу міцно на ній закріплюються.

Широкого застосування набули дві схеми газодинамічного напилення: холодне газодинамічне напилення високого тиску (рис. 1.28) та холодне газодинамічне напилювання низького тиску (рис. 1.29).

У розпилювачах холодного газодинамічного напилювання високого тиску (рис. 1.28) подача газу в камеру і його нагрівання збільшують швидкість газового потоку в звуженому соплі 3 до надзвукової.



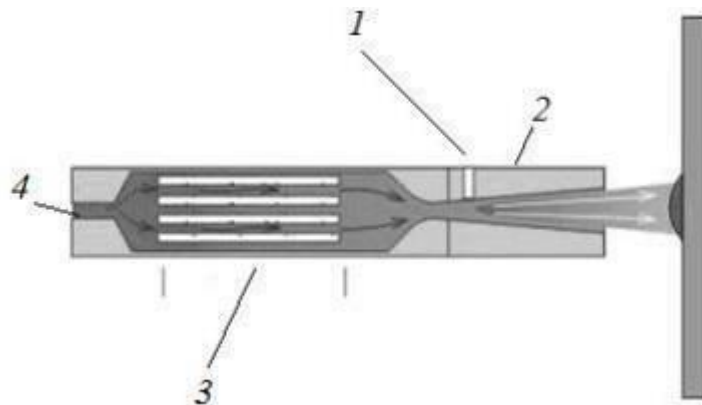
1 – датчик температури; 2 – датчик тиску; 3 – звужене сопло; 4 – зона надзвукової швидкості; 5 – подача газу; 6 – подача газо-порошкової суміші

Рисунок 1.28 – Схема конструкції для холодного газодинамічного напилення високого тиску

Напилюваний матеріал подається транспортуючим газом по трубопроводу б в камеру згорання в зону звуженого сопла, де набуває високої швидкості і спрямовується до напилюваної поверхні. Як робочий газ використовують азот або гелій під тиском вище 1,5 МПа і затратах 2 м³/хв та електропідігрівач газу потужністю більше 18 кВт.

В розпилювачах холодного газодинамічного напилювання низького тиску (рис. 1.29) стиснений газ подається через трубопровід 4 в камеру нагрівання 3, нагрівається до температури 400–600 °С і рухається до надзвукового сопла. Порошок для напилювання подають у надзвуковий потік повітря за критичним перерізом сопла 2, в ту його частину, де тиск у потоці трохи нижчий за атмосферний і де потік набуває високої швидкості в напрямку поверхні напилення. Як робочий газ використовують повітря під тиском 0,5–

1,0 МПа і за витрат 0,5 м³/хв та електропідігрівач повітря потужністю 3–5 кВт.



1 – подача порошку; 2 – зона надзвукової швидкості; 3 – камера нагрівання;
4 – подача стисненого повітря

Рисунок 1.29 – Схема конструкції для холодного газодинамічного напилювання низького тиску

Швидкість частинок для розглянутих розпилювачів становить 500–1000 м/с.

Контрольні питання до розділу 1:

1. Класифікація газотермічних способів напилювання.
2. Суть електродугової металізації.
3. Загальна характеристика плазмового напилювання.
4. Характеристика анодного і катодного вузлів плазмотрона.
5. Способи стабілізації дуги в плазмотронах.
6. Конструкція анодного вузла плазмотрона.
7. Вузол подачі плазмотвірного газу в плазмотрон.
8. Конструкції плазмотронів.
9. Схеми збудження дуги в плазмотронах.
10. Вольт-амперні характеристики дуги і джерел струму.
11. Загальна характеристика детонаційного напилювання.
12. Основні вузли установки детонаційного напилювання.
13. Блок подачі напилюваного матеріалу детонаційних установок.

14. Обладнання для детонаційного напилювання.
15. Загальна характеристика газоповітряних способів напилювання.
16. Будова і принцип роботи установки УГПЛ.
17. Будова і принцип роботи установки УПН-8.

Розділ 2. ВАКУУМНО-КОНДЕНСАЦІЙНЕ НАПИЛЮВАННЯ

2.1 Термічне напилювання

Суть цього способу полягає в тому, що напилюваний матеріал нагрівається до плавлення за допомогою різних джерел енергії (електричний струм, електронний промінь, тощо). Атоми в розплаві отримують енергію і випаровуються в навколишнє середовище, досягають поверхні напилювання й утворюють покриття.

Потужність джерела струму має забезпечити плавлення матеріалів з перегріванням для отримання високої інтенсивності випаровування атомів.

У термічному напиленні широко застосовують електронний промінь, який дозволяє підвищувати енергію парового потоку і нагрівати матеріали, що не дисоціюють у процесі плавлення. Джерелом електронів є електронна гармата. Переважно використовують дві схеми:

1. Незалежні вакуумні системи гармати і робочої камери.
2. Сумісні вакуумні системи гармати і робочої камери.

Принцип роботи електронної гармати такий: до катода і аноду електронної гармати прикладається напруга (5-60 кВ). Підігрітий катод імітує електрони, які прискорюються і переміщуються до анода. Електромагнітна система спрямовує електрони і фокусує потік в заданому напрямку на поверхню розпилюваного матеріалу. Електрони проходять електричне поле з різницею потенціалів U_0 і отримують енергію

$$E = 1/2m_0 \cdot v_0^2 = e \cdot U_0$$

де m_0 , v^2 , e – маса, швидкість та заряд електрона відповідно;

U_0 – різниця потенціалів.

Найвища ефективність нагрівання електронним променем досягається у разі максимального фокусування променя на поверхні. Тому сучасні установки мають спеціальні пристрої, які слідкують за тим, щоб дзеркало розплаву було

в фокусі електронного променя і він сканував поверхню.

Конструкційно простіші установки термічного напилення, у яких використовують резистивне нагрівання. Термічне напилення реалізується у вакуумних установках, що мають випарники, а також пристрої для закріплення та переміщення деталей. Найпоширеніші дротяні, стрічкові, тигельні тощо.

До матеріалів випарників висувають такі вимоги:

1. Низький парціальний тиск пари матеріалу випарника.
2. Добре змочування матеріалу випарника напилюваним матеріалом при відсутності взаємодії за температури випаровування.

Ці вимоги обумовлені тим, що матеріали з низьким парціальним тиском парів не будуть випаровуватися разом з напилюваним матеріалом, а добре змочування випарника напилюваним матеріалом підвищує швидкість передачі тепла напилюваному матеріалу від стінок випарника.

Перевагою термічного способу напилення є порівняно просте обладнання, а недоліками – мала швидкість утворення покриття і низька міцність зчеплення покриття з основою, що пов'язано з низькою енергією атомів, що випаровуються. Крім того, прямим термічним випаровуванням не можна напилювати матеріали з температурою плавлення більшою за 1500 °С, тому що при таких температурах напилення матеріали активно взаємодіють з матеріалом випарників.

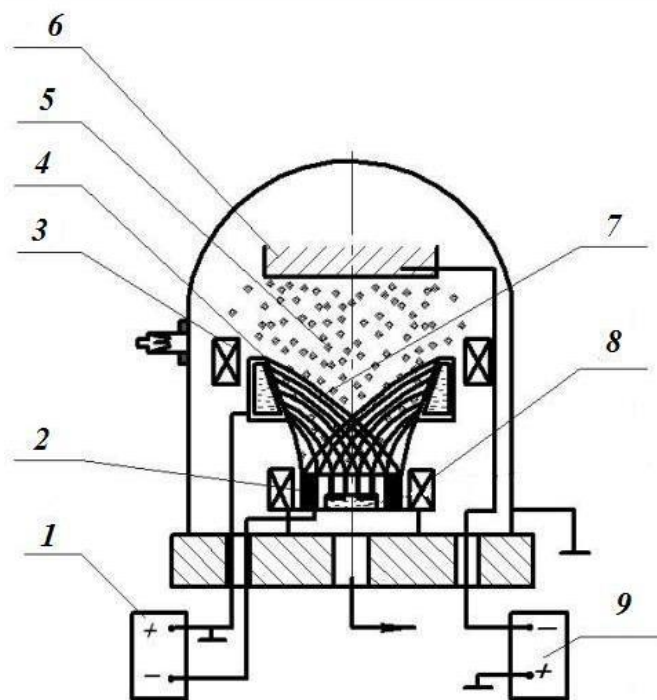
Термічне випаровування застосовують для напилення покриттів, до яких немає вимог щодо міцності зчеплення покриття з основою (мікроелектроніка, де напилюють різні за складом плівки металів, декоративні покриття на різні вироби з пластмаси, деревини тощо).

2.2 Вибухове напилювання

Цей спосіб реалізується локальною дією енергетичного імпульсу на поверхні матеріалу, де на мікроділянках створюються умови (при концентрації енергії 10^7 - 10^9 Вт/см²) для високошвидкісного випаровування твердих матеріалів (без їх плавлення). Продукти розпилення складаються із парової фази,

у якій можуть бути частинки конденсованої фази. Розпилені частинки мають розмірів від атома до мікрона, і розлітаються з швидкістю до 10 м/с. Краплинна фаза знижує якість покриття, тому її треба відділяти від парового потоку.

Вибухове розпилення можна реалізувати, використавши різні імпульсні джерела теплоти, які переміщуються поверхнею розпилення. До таких джерел належать електричні розряди, електронний та лазерний промені тощо. Найчастіше застосовують електричну дугу. Схему установки нанесення покриттів вибуховим розпиленням за допомогою електричної дуги ілюструє рисунок 2.1.



- 1 – низьковольтне потужне джерело ($U_{x,x} = 60 - 80 \text{ В}$, I до 500 А); 2 – катод – розпилюваний матеріал; 3 – магніт-прискорювач; 4 – водоохолоджуваний анод;
 5 – потік частинок; 6 – поверхня напилення; 7 – дуговий розряд;
 8 – електромагніт; 9 – високовольтне джерело струму

Рисунок 2.1 – Схема установки для нанесення покриттів вибуховим розпиленням матеріалів електричною дугою

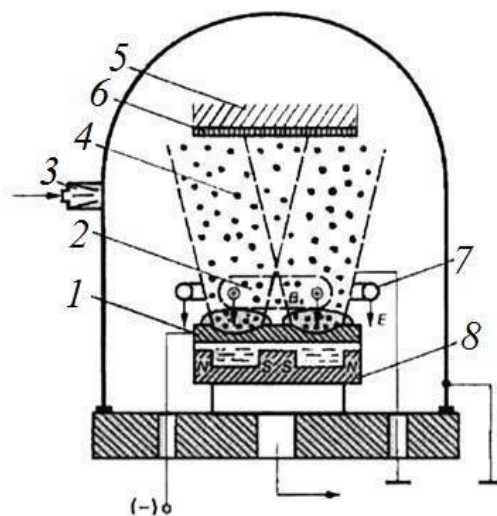
Порядок роботи цієї установки такий: у камері напилення зменшують тиск до $10-10^{-1}$ Па. Між катодом 2 і анодом 4 збуджують дуговий розряд від джерела енергії 1. Для фіксації дуги на поверхні розпилюваного матеріалу – катоду

використовують електромагніт 8. Під дією магніту дуга хаотично переміщується по розпилюваному матеріалу й утворює на поверхні катодні плями, густина струму в яких досягає 10^7 - 10^9 Вт/см². У цьому випадку дуга виконує роль імпульсного джерела теплоти.

Найбільша стабільність процесу розпилення спостерігається за умови інтенсивного охолодження катода водою. Пара розпиленого матеріалу проходить через дуговий розряд, іонізується (ступінь іонізації досягає 20–90 %), утворює потік іонів 5, що спрямовується до поверхні напилення.

Для активації парового потоку в напрямку поверхні напилення використовують електромагніт 3 та подачу від'ємного високовольтного потенціалу на поверхню напилення.

Для збільшення швидкості розпилення застосовують два джерела енергії: електричне і магнітне – це магнетронні установки розпилення. Схему такої установки зображена на рисунку 2.2.



- 1 – катод – розпилюваний матеріал; 2 – зона дрейфу електронів;
 3 – натікач; 4 – потік напилюваних частинок; 5 – поверхня напилення;
 6 – покриття; 7 – анод; 8 – магніт

Рисунок 2.2 – Схема установки магнетронного розпилювання

Під розпилюваним матеріалом 1 розміщений магніт 8, силові лінії якого замикаються між полюсами. У разі подачі напруги (800–1000 В) між катодом і

анодом утворюється нелінійне неоднорідне електричне поле і збуджується жевріючий розряд.

Силві лінії електричного поля перпендикулярні поверхні катода і магнітних силових ліній. Електрони, що вилітають з катода, утворюють області дрейфу 2. Електрони знаходяться ніби в пастці, рухаються, стикаючись з атомами робочого газу, й іонізують їх доти, доки вони не отримають високу енергію і не попадуть на катод. Такий рух електронів супроводжується зростанням концентрації позитивних іонів біля поверхні розпилюваного металу, в результаті чого збільшується швидкість розпилення. У таких системах ступінь іонізації досягає 100 %, що дозволяє отримати високу густину парового потоку. Чим більша густина парового потоку, тим менше домішок залишкових газів до нього потраплять і тим якіснішим буде покриття.

За відносно низької густини парового потоку і збільшенням хімічної активності молекул залишкових газів унаслідок іонізації потрібно зменшувати кількість залишкових газів у камері напилення, щоб вони не потрапляли в покриття. Для зменшення кількості залишкових газів перед початком напилення в камерах створюють більш низький тиск, ніж робочий, і прогрівають стінки камери для активної евакуації газів.

Рівномірне за товщиною покриття можна отримати, правильно вибравши розміри розпилюваного матеріалу, визначивши відстані від катода до напилюваної поверхні та переміщенням деталі відносно джерела розпилення.

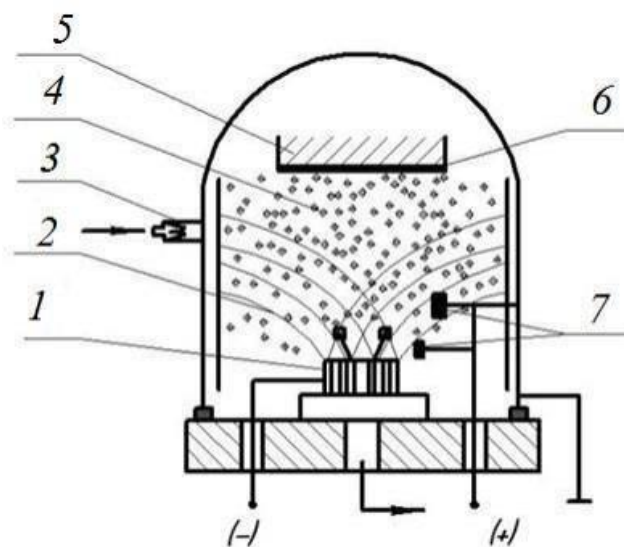
Переваги магнетронного напилення – велика швидкість розпилення, висока якість покриття та міцність зчеплення покриття з основою. До недоліків слід віднести складність обладнання.

2.3 Іонне напилення

Суть цього методу напилювання полягає в тому, що розпилюваний матеріал бомбардує потік позитивно заряджених іонів. Для утворення потоку заряджених іонів найчастіше використовують жевріючий розряд при тиску

приблизно $1 \cdot 10^{-1}$ Па. Напилюваний матеріал має від'ємний потенціал і слугує катодом. Для отримання позитивних іонів застосовують інертні гази, частіше аргон. Механізми розпилення такі: вибивання частинок матеріалу відбувається в результаті прямої передачі імпульсу позитивно зарядженого іона поверхні. У зоні удару виділяється енергія, яка створює умови для розпилення. Найпоширеніші дві схеми іонного напилення – діодна та тріодна. Діодну схему ілюструє рисунок 2.3.

Розпилюваний матеріал у вигляді пластини кріпиться на водоохолоджуваній електрод – катод *1*, який знаходиться під від'ємним потенціалом. Анод *7* розміщений на невеликій відстані від катода і має додатковий електрод. У камері знижують тиск до 10^{-4} – 10^{-3} Па, потім за допомогою натікача *3* до камери напускають аргон до тиску $1 \cdot 10^{-1}$ Па і вмикають джерело струму. Між стінками камери, анодом та катодом *1* утворюється жевріючий розряд *2*, у якому гази аргону іонізуються і бомбардують поверхню катода, вибиваючи з його поверхні частинки, які утворюють потік напилюваних частинок *4*. Потік частинок потрапляє на поверхню *5* і утворює покриття *6*.

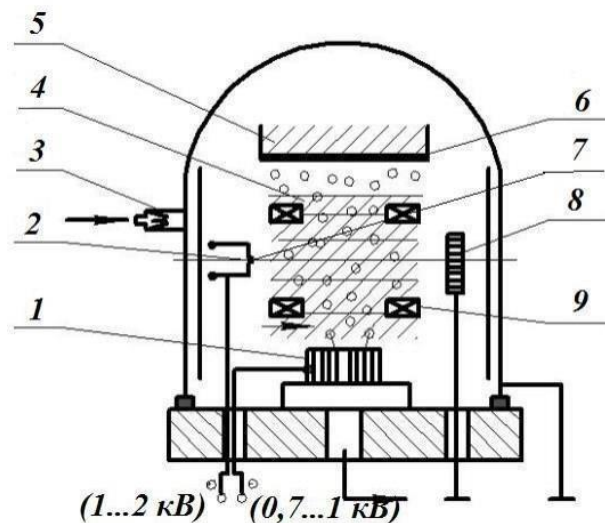


- 1 – катод – розпилюваний матеріал; 2 – жевріючий розряд; 3 – натікач газу; 4 – потік напилюваних частинок; 5 – поверхня напилювання; 6 – покриття;
7 – анод

Рисунок 2.3 – Діодна схема іонного напилювання

Недоліком такої схеми є труднощі в підтриманні горіння тліючого розряду, утворенні вторинних високоенергетичних електронів, які бомбардують поверхню напилювання і підігрівають її, та мала швидкість розпилення.

Тріодна схема іонного напилювання, яка не має названих недоліків, подано на рисунку 2.4. Відмінність тріодної схеми від діодної полягає в тому, що вона має гарячий катод 7, який є допоміжним джерелом електронів, що робить жевріючий розряд стабільнішим.



1 – катод; 2 – жевріючий розряд; 3 – натікач газу; 4 – потік напилюваних частинок; 5 – поверхня напилення; 6 – покриття; 7 – гарячий катод; 8 – анод;
9 – магнітна котушка

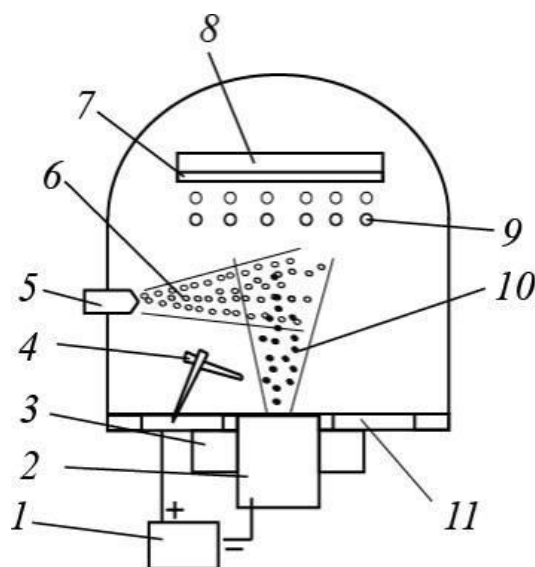
Рисунок 2.4 – Тріодна схема іонного напилювання

Магнітна котушка 9 надає електронам складну траєкторію руху, що підвищує ефективність іонізації газу. Під дією магніту електрони рухаються по спіралі. Це підвищує ефективну довжину шляху електронів, що збільшує ступінь іонізації робочого газу.

Допоміжний катод 7, анод 8 та магнітні котушки 9 складають генератор плазми. Така схема дає можливість напилювати при нижчому тиску $1 \cdot 10^{-1}$ Па, створити умови стабільного горіння жевріючого розряду, зменшити напругу катод – анод і збільшити швидкість розпилення.

2.4 Реакційне напилення

Деякі сполуки не можна напилити на деталі прямим випаровуванням чи іонним розпилюванням через частковий або повний розпад. Це сполуки, які мають в своєму складі елементи, парціальний тиск парів яких дуже відрізняється (наприклад, нітриди, карбіди тощо). Тому в вигляді покриття їх отримують за допомогою реакції між атомами парового потоку металів і атомами спеціально введених в камеру хімічно активних газів. Схема реакційного напилювання приведена на рисунку 2.5.



- 1 – джерело живлення; 2 – катод–розпилюваний матеріал; 3 – магніт; 4 – підпалювач; 5 – натікач газу; 6 – потік атомів азоту; 7 – покриття; 8 – напилювана поверхня; 9 – потік сполуки MeN; 10 – потік атомів металу; 11 – анод

Рисунок 2.5 – Схема реакційного напилювання

У процесі реакційного напилення використовують різні джерела тепла для випаровування металів, але найефективнішим є дуговий розряд. У цьому випадку метал розпилюється дугою, яка горить між катодом – розпилюваним матеріалом 2 та анодом 11. Магніт 3 фокусує дугу лише на катоді, щоб вона розпилювала тільки катод. Перед напусканням реакційного газу на поверхню напилення 8 подається від’ємний потенціал (до 1,5 кВ), атоми металу, що випаровуються, 10 і залишкові гази іонізуються в дузі, бомбардують напилювану

поверхню, очищуючи її і підігрівуючи. Разом з напуском реакційного газу знижують від'ємний потенціал на поверхні напилювання (до 300 В). Реакційні газу переважно двохатомні. Тому спочатку під дією електричної дуги вони дисоціюють на атоми, а потім іонізуються б. На поверхні в процесі деіонізації утворюються атоми металу, які взаємодіють між собою, утворюючи відповідну сполуку 9.

Однією з умов утворення якісних покриттів є потреба підтримувати в камері таке співвідношення атомів металу і газу, яке відповідає їх співвідношенню в сполуці, з якої отримують покриття. Для практичного вирішення цього питання використовують швидкість конденсації атомів (ат. см²·с⁻¹); обчислюють кількість атомів, які конденсуються на поверхні

$$N_k = N_A \cdot \rho \cdot v_k / m,$$

де N_A – стала Авогадро; ρ – густина металу;

v_k – швидкість конденсації;

m – молекулярна маса металу.

Кількість молекул N_r , які потрапляють на напилювану поверхню, (мол.·см⁻²·с⁻¹),

$$N_r = 2,63 \cdot 10^{20} (M_r \cdot T)^{-1,2} \cdot P_r,$$

де M_r – молекулярна маса газу;

T – температура газу, °С;

P_r – парціальний тиск газу, Па.

Отже регулюючи теплову енергію на поверхні розпилуваного металу і тиск реакційного газу в камері, регулюють склад сполуки в покритті. В установках реакційного напилення теплову енергію підтримують постійною, а регулюють тискз допомогою реакційного газу.

2.4 Обладнання для вакуумно-конденсаційного напилювання

У промисловості використовують багато установок для напилення, різних за конструкцією, з різними джерелами теплової енергії, з різними видами

розпилення. Ураховуючи те, що розпилювальний пристрій є одним з головних частин установок, найдоцільніше класифікувати установки за типом розпилення:

- термічного розпилення;
- вибухового розпилення;
- іонного розпилення;
- змішане термічне.

Установки термічного розпилення. Застосовують декілька способів нагрівання напилюваних матеріалів: резистивний, електронно-променевий, індукційний та дуговий.

1. *Установка ВУП-4* – передбачає резистивне нагрівання матеріалів; призначена для напилення металів, графіту в різних наукових дослідженнях. Має оптичний пристрій для вимірювання товщини покриття, термопару для вимірювання температури, пристрій для переміщення деталі, а також систему іонного бомбардування поверхні. Промислового застосування не має.

2. *Установка УВН-2М* – призначена для напилювання плівок з різних матеріалів з температурою плавлення до 1500 °С. Конструкційно являє собою ковпак діаметром 500 мм, під яким знаходиться плита, на яку кладуть напилювані деталі. Випаровувач розміщено у верхній частині ковпака. Ковпак піднімається і опускається вертикально за допомогою спеціального пристрою. Установку застосовується у промисловості для напилювання плівок під час виготовлення мікросхем, носіїв інформації тощо.

3. *Установка УЗ-137* – призначена для напилювання захисних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів. Вона складається з трьох камер: робочої, допоміжної і камери електронних гармат, яких в установці 6 штук. Випарник п'ятитигельний: два тиглі циліндричної форми для металів і сплавів, три тиглі прямокутної форми для випаровування сполук. Розпилення виконується електронним променем. Застосовуються шість плоскопроменевих гармат потужністю 100 кВт кожна. Конструктивні особливості системи дозволяють отримувати шість незалежних електронних променів регульованої

потужності, а також формувати оптимальну конфігурацію зон нагрівання з різною траєкторією променя на поверхні матеріалів, які випаровуються, та нагрівати напилювану поверхню із застосуванням системи, яка сканує електронний промінь за програмою, що допомагає рівномірно розподіляти температуру на поверхні. Температура контролюється безконтактними методами з використанням фотоелектричних яскравісних датчиків.

По ходу випаровування зливків, вони механічно подаються в зону розплаву, для чого використовують телевізійну систему стеження за рівнем дзеркала розплаву. Така система дозволяє отримувати композиційні жаростійкі покриття з рівномірним або градієнтним введенням зміцнювальних фаз, теплозахисні багат шарові покриття тощо.

4. Установа УЗ-175 досконаліша, ніж УЗ-137. Деталі попередньо нагріваються у допоміжних камерах, розміщених по обидва боки робочої камери. Крім того, установка УЗ-175 комплектується автоматичною системою контролю та керування технологічним процесом з застосуванням комп'ютера.

5. Установка УТН-1 – призначена для напилення великогабаритних деталей, тіл обертання діаметром 2,5 м і довжиною до 3 м. Складається з двох камер, має три випаровувачі. Модернізацією цієї установки є установка УТН-2, де передбачено незалежне переміщення випаровувача вздовж горизонтальної осі установки. Обидві установки мають пристрій іонної очистки поверхні тліючим розрядом.

Установки вибухового напилювання. Це установки типу «Булат». Вони мають різні модифікації, але принципова схема однакова. Вони мають вакуумну камеру, де знаходиться катод (один або три), пристрій для установлення деталей та їх обертання. Для вибухового розпилення застосовують електричну дугу. Дуга запалюється між водоохолоджуваними катодом і анодом. Для збудження дуги використовують допоміжний електрод, або генератор високочастотних імпульсів. Для прискорення іонів установки мають високовольтне (1,5 кВ) джерело струму, електромагніти для стабілізації катодної плями та фокусування і прискорення потоку напилюваних частинок.

Установки мають пристрої для натікання газу і блоки керування натіканням газу. Основне призначення установок – напилювання зносостійких покриттів на різний інструмент.

Установки іонного напилювання. УВН-Р працюють за тріодною схемою.

Гарячий катод розміщено в ніші корпусу. До деталі прикладається напруга 0 – 2 кВ.

Установки змішаного напилювання. УВН-75Р-2 – установка ковпакового типу, призначена для напилювання плівок методом вибухового розпилення і термічного випаровування з допомогою електронного променя. Має восьмипозиційну карусель, яка забезпечує транспортування напилюваних деталей із бункера. Для підігрівання деталей установка має нагрівник.

Ширші можливості для напилювання має установка УВН-75П-1. Вона відрізняється від УВН-75Р-2 тим, що іонне розпилення виконується за постійного і змінного струму (до 3 кВ, частотою 1,76 МГц). Це дозволяє напилювати матеріали, які не мають металевої електропровідності та діелектрики.

В додатку Г приведені установки вакуумно-конденсаційного напилювання.

Контрольні питання до розділу 2:

1. Термічне напилювання.
2. Вибухове напилювання.
3. Характеристика магнетронного напилювання
4. Діодна схема іонного напилювання.
5. Тріодна схема іонного напилювання.
6. Реакційне напилювання.
7. Обладнання для вакуумно-конденсаційного напилювання.

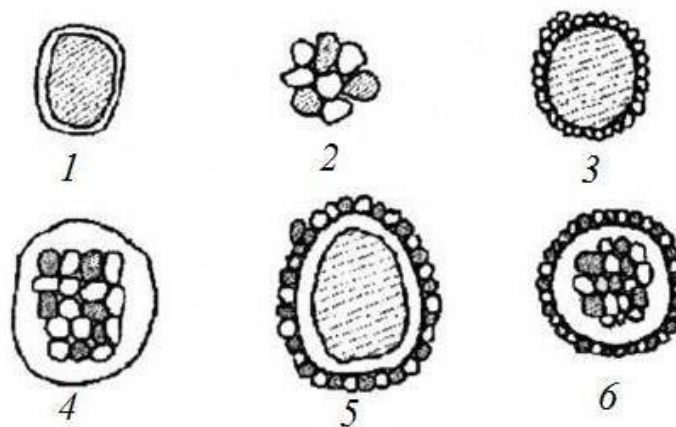
Розділ 3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ НАПИЛЮВАННЯ

3.1 Загальна характеристика матеріалів

Матеріали, що використовуються для напилення, можна розділити на 3 групи:

1. Порошки.
2. Дріт, порошковий дріт.
3. Стрижні, вилівки, пластини.

За газотермічного напилення широко застосовуються порошки металів, сплавів, композиційних матеріалів, оксидів та їх механічні суміші. Найбільш поширені композиційні матеріали, які дозволяють отримувати покриття з широким спектром властивостей. За структурою композиційні матеріали можуть бути конгломеровані, плаковані та змішані (рис.3.1).



1 – плаковані; 2 – конгломеровані спіканням; 3 – конгломеровані за допомогою зв'язуючи речовин; 4, 5, 6 – комбіновані

Рисунок 3.1 – Структура композиційних порошків

Конгломеровані, у свою чергу поділяють на гетеродисперсні – частинки суттєво відрізняються одна від одної за розмірами, і більша може бути ядром, на поверхні якого знаходяться частинки інших компонентів (рис. 3.1, в) та гомодисперсні – формуються із різних компонентів приблизно однакового розміру (рис. 3.1, б).

На рисунку 3.1 подано схеми двокомпонентних композиційних порошків.

У практиці напилення використовують також три- і чотирикомпонентні порошки. За поведінкою під час напилення композиційні порошки поділяють на термореагуючі і термонеітральні. У термореагуючих у процесі напилювання відбувається реакція утворення інтерметаліду з виділенням тепла, в термонеітральних інтерметалід утворюється під час виготовлення порошків.

Застосовуючи композиційні порошки, отримують переваги:

1. У разі напилення термореагуючих порошків завдяки теплу екзотермічної реакції частинки в потоці не охолоджуються і на поверхню попадають в розігрітому стані, що дозволяє підвищити міцність зчеплення покриття з основою.

2. Рівномірне розподілення компонентів в об'ємі покриття.

3. Захист матеріалу ядра частинок від взаємодії з газовим середовищем напилення.

4. Формувати покриття з матеріалів, які самостійно не утворюють покриття (наприклад графіт).

У зв'язку з особливостями газотермічного напилення (потреба транспортування порошків до джерела нагрівання і розпилення, короткий термін перебування порошків в зоні нагрівання, можливість взаємодії з газовим середовищем) до порошків, використовуваних для напилення, висувають такі вимоги:

1. Форма і розмір частинок мають забезпечити стабільну подачу порошку в газовий потік і нагрів частинок до температур, за яких формуються покриття із заданими експлуатаційними властивостями. Тому щоб отримати рівномірну подачу порошку, треба використовувати частинки з формою близькою до сферичної форми та розміром від 40 до 200 мкм.

2. Стосовно теплофізичних властивостей вимоги висувають до густини, теплоємності, теплопровідності, теплоти плавлення, а також геометричної форми частинок. Теплофізичні властивості матеріалу характеризують його тугоплавкість в умовах високотемпературного газового потоку. Параметр трудності плавлення виражає відношення кількості теплоти, потрібної для

розплавлення одиниці об'єму частинки до часу її перебування в зоні нагрівання. Чим нижче значення D , тим ефективніше нагріваються матеріали.

Крім параметра трудності плавлення, на формування покриття суттєво впливає така властивість матеріалу, як коефіцієнт акумуляції тепла b :

$$b = \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda},$$

де c , ρ , λ – теплоємність, щільність і теплопровідність матеріалу відповідно.

За високих значень b матеріали, які попадають на поверхню мають високу температуру і підвищену активність, що дозволяє отримати якісні покриття. За малих значеннях b для якісного формування покриття потрібне додаткове нагрівання частинок або значне перегрівання.

За характером поведінки матеріалів в високотемпературному потоці їх можна розділити на три групи:

1. Компоненти майже не взаємодіють, але плавляться в процесі напилювання.
2. Компоненти майже не взаємодіють, і один або декілька компонентів можуть бути не розплавленими (нікель-графіт, мідь-карбід кремнію).
3. Компоненти взаємодіють між собою, утворюючи інтерметаліди, або іншісполуки, властивості яких змінюються.

Для утворення якісного покриття і збільшення міцності зчеплення покриття з основою потрібно, щоб переважна більшість частинок була в розплавленому стані. Створити умови для переведення частинок у розплавлений стан можна, застосовуючи перегрівання частинок, збільшуючи середню густину частинок, знижуючи температуру плавлення утворенням евтектики або введенням легкоплавкого компонента, застосовуючи порошки з екзотермічним ефектом.

На перехід частинок порошку в розплавлений стан суттєво впливає розмір частинок. Чим дрібніші частинки тим швидше вони плавляться, але застосування дрібних частинок спричиняє труднощі з їх транспортування до розпилювачів. Тому існує декілька методик оцінки мінімального і максимального розміру

частинок порошку, які будуть розплавлені під час напилення.

Мінімально допустимий розмір частинок визначається переважно текучістю порошоків та умовами нанесення покриттів. Крім того, слід враховувати взаємодію газопорошкового струменя з виробом, на який напилюють покриття. Річу тим, що дрібні частинки можуть захоплюватись потоком газу, який обтікає виріб або відбивається від нього, і не потрапляти на виріб. Оцінюють їх мінімально допустимий розмір по формулі:

$$d_{\min} = 3 \sqrt{2\mu \cdot l \cdot \gamma^{-1} \cdot v^{-1} \cdot St_{\text{кр}}},$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості плазми;

l – довжина траєкторії частинки; γ – щільність частинки;

v – швидкість частинки;

$St_{\text{кр}}$ – критичне число Стокса, безрозмірна величина, яка визначає співвідношення між кінетичною енергією завислих частинок і енергією їх взаємодії з газом.

Згідно з цим рівнянням мінімальний розмір частинок може змінюватись у межах 1–5 мкм.

Для процесів газотермічного напилювання важливою характеристикою порошоків є також **максимально допустимий розмір** їх частинок d_{\max} . Збільшення діаметра частинок порошоків призводить до збільшення часу переведення їх у розплавлений стан при перебуванні та нагріванні в газополуменовому або плазовому струмені. А це буде знижувати вірогідність утворення покриттів з високою щільністю та заданими властивостями. Максимально допустимий діаметр частинок порошоків, наприклад для випадку плазового напилювання розраховують за формулою:

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4a\tau_{\text{н}}}{0,3}},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;

$\tau_{\text{н}}$ – час перебування частинки в зоні нагріву, с.

Середній розмір частинок порошку і ширина діапазону використовуваної фракції – найважливіші характеристики для газотермічного напилення. Їх вибирають відповідно до способу газотермічного напилення, складу напилюваного матеріалу та умов напилення. Існує європейський стандарт DIN 32529, у якому наведено рекомендації з використання у технології газотермічного напилення порошоків металів, сплавів, оксидів, карбідів та інших матеріалів.

В Україні типи порошоків для газотермічного напилення, їх класифікація за параметрами для різних видів покриттів і наплавки регламентуються міждержавним стандартом ГОСТ 28377–89 “Порошки для газотермического напыления и наплавки”. Порошки класифікуються за способом отримання, розміром частинок та хімічним складом.

3.2 Способи виготовлення порошоків для газотермічного напилювання

Для газотермічного напилювання можна використовувати порошки, які серійно виготовляються для виробництва деталей способами порошкової металургії. Але вони мають відповідати вимогам за формою і гранулометричним складом. Тому існує цілий ряд технологічних способів отримання порошоків для газотермічного напилення із заданим комплексом властивостей.

Розпилення. Можна отримувати порошки практично всіх металів і сплавів. Найширше застосовують диспергування струменя розплавленого металу або сплаву. Диспергування можна виконувати струменем повітря або води, а також механічними засобами. Розпилені матеріали сушать і просівають для виділення потрібної фракції.

Отримання плакованих порошоків. Плаковані порошки широко застосовують у газотермічному напиленні оскільки вони дозволяють утворювати композиції:

1. З матеріалів, які не можна напилювати у вигляді механічних сумішей,

тому що вони сегрегують під час транспортування.

2. З матеріалів, які не дають високої міцності зчеплення з поверхнею і між собою.

3. З матеріалів, які активно взаємодіють з газовим середовищем, змінюючи свій хімічний склад.

4. З матеріалів, які під час напилення вступають у реакцію з виділенням тепла (терморреагуючі порошки).

Плакування порошків для газотермічного напилювання може бути виконано такими способами:

1. Поновленням з розчинів солей воднем (автоклавної способ); використовують для нанесення нікелю та інших металів і сплавів.

2. З газової фази термічним розкладанням карбонілів метало-органічних сполук (висадження нікелю із тетракарбонілу на алюміній, карбід вольфраму тощо).

3. З твердої фази дифузійним насиченням.

4. Випаровуванням у вакуумі за термічного або електронно-променевого нагрівання.

Для плакування порошків для газотермічного напилювання широко застосовують нікель. В автоклави завантажують порошок для напилення і розчин аміносольфату нікелю. Суміш перемішують, нагрівають до 200 °С і пропускають водень під тиском 2–3 МПа. Активні атоми нікелю, що утворюються в результаті поновлення аміносольфату нікелю, висаджуються на поверхні порошку, утворюючи плаковані покриття.

Конгломерування дрібних порошків. Порошки розміром менше 10 мкм конгломерують для отримання порошків для газотермічного напилення. Конгломеровані частинки можна утворювати такими методами:

1. Спікання механічних сумішей, їх дроблення і розсівання за фракціями.

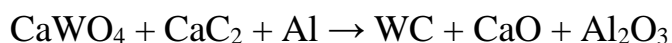
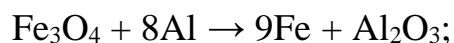
2. Змішування порошків з органічними зв'язуючими, потім – грануляція і сушіння. Як зв'язуючі використовують фенольні лаки тощо.

3. Сушіння розпиленням суспензії, яка складається з дрібних порошоків і розчину органічних або неорганічних речовин. Суспензію розпилюють гарячим газом, у потоці якого краплі суспензії твердіють, утворюючи гранули, потім розсівають по фракціям. Застосування органічних речовин, як зв'язуючих, має один недолік – при напиленні вони вигорають і можуть утворювати нагар на розпилювачах і напилювальній поверхні. Тому перевагу віддають неорганічним речовинам. Наприклад, конгломеруючи дрібні порошки молібдену, як зв'язуючий, використовують молібдат амонію (розчин оксиду молібдену в нашатирному спирті). Після розпилення гарячим повітрям при температурі 230 °С гранули нагрівають в середовищі водню до температури 1000 °С. За цієї температури молібдат амонію поновлюється до молібдену, який надає гранулам міцність і при напиленні не утворюються побічні продукти.

4. Спільна деформація (прокатка, екструзія) механічних сумішей і їх подрібненням. Цей спосіб використовують для конгломерації пластичних металів, наприклад, суміші Ni–Al.

Крім указаних способів отримання порошоків для газотермічного напилювання, використовують і інші технології. Наприклад, фірма “Кеннеметал” розробила процес виробництва карбіду вольфраму великозернистого, ця технологія відома як процес Менструума. Перевагою цього способу є те, що як вихідні матеріалів використовують збагачені концентрати вольфрамових руд (шееліту, фебериту, вольфраміту).

В основі процесу – такі реакції:



Цей процес відбувається в печах, футерованих графітом. Спочатку завантажують у піч суміш оксиду заліза і алюмінію, нагрівають до температури 800 °С. Потім в якійсь точці підпалюють (електрична дуга, пороховий запал тощо). Починається перша реакція з виділенням тепла і утворенням розплаву заліза. Після чого в піч вводять компоненти другої реакції. Подача ведеться з

визначеною швидкістю, оскільки за малої швидкості подачі буде перегрівання шихти, а за великої – реакції уповільнюються і можуть узагалі зупинитися.

За розробленою технологією шихту другої реакції упаковується в мішки з алюмінієвої фольги і вводяться у піч в її верхній частині. Коли мішки попадають у піч, вони нагріваються газами, потім шлаком. Після потрапляння мішків в розплавлену масу шихта реагує з вуглецем з утворенням великих кристалів карбиду вольфраму. У печі формується розплавлена маса, яка розділяється на шлак, якій піднімається на поверхню розплаву і складається з алюмінатів кальцію. А на дні розплаву знаходяться крупнозернистий (~200 мкм) карбід вольфраму.

Після охолодження кристалічна маса відділяється від шлаку і має близько 65% карбиду вольфраму. Після промивання водою і лугом отримують чистий карбід вольфраму. Після дроблення розсівають за фракціями.

Дріт застосовують для напилювання електродуговим, плазмовим та газополуменеви́м напилюванням. Використовують дріт діаметром 1–3 мм. Для забезпечення безперебійної подачі та розпилення дроту, а також якості покриття дріт має бути без перегинів, задирок, вм'ятин та інших дефектів, мати гладеньку й знежирену поверхню. Для напилювання використовують дріт, який випускає промисловість: цинковий дріт марки Ц1, алюмінієвий дріт марок АД-1, АМЦ, молібденовий дріт марки М4, сталі. Крім того, для напилювання використовують гнучкі порошкові дроти, які виготовляють з суміші порошків мундштучним пресуванням з одночасним покриттям поверхні поліамідом.

Більш детально технології виготовлення матеріалів для напилювання приведені в [4].

Контрольні запитання до розділу 3:

1. Загальна характеристика матеріалів для напилювання.
2. Переваги композиційних порошків.
3. Вимоги до порошків для напилювання.
4. Способи виготовлення порошків для напилювання.

Розділ 4. ТЕХНОЛОГІЯ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ

4.1 Основні параметри напилення

Процеси напилювання (газотермічний і вакуумно-конденсаційний) мають багато параметрів, від яких залежить продуктивність роботи установок та якість покриттів. Усі параметри, що впливають на процес напилення, можна розділити за такими групами:

1. Конструктивні параметри визначаються конструктивними елементами розпилювачів, камери напилювання. Так, для газотермічного напилювання найбільш важливим конструктивним елементом є геометрія сопла розпилювачів, а для вакуумно-конденсаційного напилення – це розміри і форма камери напилення, геометрія та розміщення електродів (катода і анода).

2. Параметри, що характеризують режим роботи розпилювача – це електричні параметри: потужність дуги, електронного променя, жевріючого розряду та вид і витрати горючих і розпилювальних газів.

3. Параметри, пов'язані з характеристиками розпилюваного матеріалу (гранулометричний склад порошків, розмір дроту, розмір і форма катодів), фізико-хімічні властивості розпилюваних матеріалів, (температура плавлення, теплоємність, щільність та інше).

4. Параметри потоку напилювання. Потоки напилення за вакуумно-конденсаційного напилювання однофазні – складаються тільки з частинок матеріалу, що напиляють, за газотермічного – двофазні, що складаються із частинок напилюваного матеріалу та газу в якому вони рухаються. В двофазних потоках необхідно також враховувати параметри газового потоку: ентальпію, температуру та швидкість.

Як видно з наведених параметрів, їх можна розподілити на два види: параметри, що дозволяють оперативно керувати технологічним процесом – це параметри, які характеризують роботу розпилювачів, і параметри, які характеризують умови напилення. Схематично основні оперативні параметри і параметри, що закладені в конструкцію установки і дозволяють оперативно

впливати на процес напилювання, наведені на рисунку 4.1.

До них відносяться:

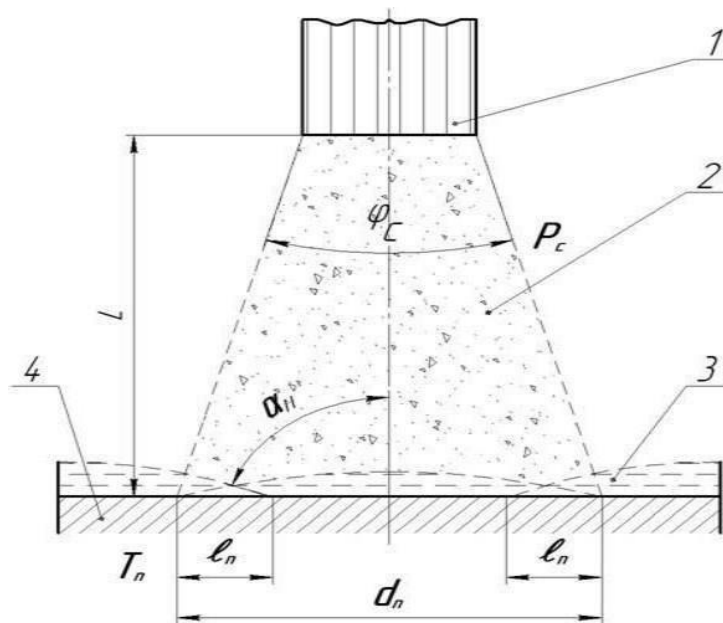
L – дистанція напилення; γ – конус розпилення;

P_c – тиск середовища розпилення;

α – кут зустрічі потоку з поверхнею напилювання;

T_n – температура поверхні напилення.

Розглянемо вплив параметрів на різні способи нанесення покриттів.



1 – джерело розпилюваних частинок; 2 – потік напилюваних частинок;

3 – покриття; 4 – поверхня напилення

Рисунок 4.1 – Схема напилювання

Плазмове напилювання. Конструктивні параметри – діаметр сопла, довжина каналу сопла, довжина дуги, характер та місце введення напилюваного матеріалу в плазмотрон.

Діаметр сопла впливає на швидкість плазмового струменя, на швидкість і температуру напилюваних частинок. Залежність характеристик плазмового потоку від діаметру сопла на рисунку 4.2.

У плазмотронах, використовуваних для напилення, оптимальний діаметр сопла 3–6 мм. Довжина соплового каналу l_c впливає на довжину дуги і, як наслідок, на температуру частинок. Збільшуючи довжину сопла, можна

розтягнути дугу. В плазмотронах для збільшення довжини дуги застосовують також міжелектродні вставки.

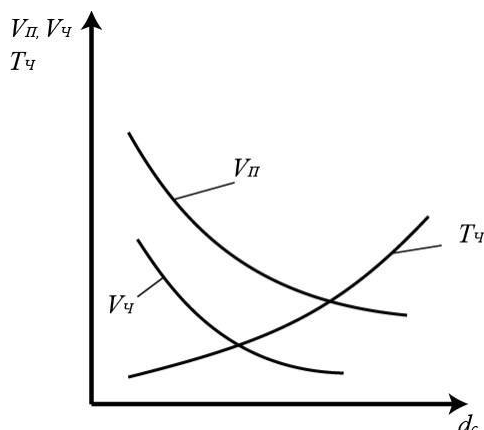
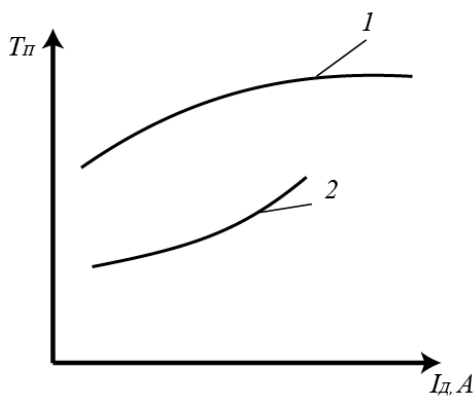


Рисунок 4.2 – Залежність швидкості плазми V_p , температури T_{ch} і швидкості V_{ch} частинок від діаметра сопла

Для плазмотронів із самофіксованою дугою $l_c = 2-3d_c$, а для плазмотронів з міжелектродними вставками $l_c = 5-10d_c$. Залежність середньомасової температури від струму для сопел із самофіксованою дугою і з міжелектродною вставкою показано на рисунку 4.3. Як видно з графіка, збільшення довжини дуги суттєво підвищує середньомасову температуру плазми.



1 – сопло з міжелектродною вставкою; 2 – сопло з самофіксованою дугою

Рисунок 4.3 – Залежність середньомасової температури плазми від струму дуги

Параметри розпилюваного матеріалу. Для плазмового напилювання застосовують порошки із середнім розміром частинок 10–200 мкм. Швидкість подачі 0,25–2,5 г/с. Збільшення швидкості подачі призводить до «захоłodження» плазмового потоку. У разі використання дроту його діаметр

становить 0,8–2,5 мм за швидкості подачі 10–70 мм/с.

Електродугова металізація. Конструктивні параметри – форма і розмір сопла. У більшості випадків застосовують циліндричні сопла діаметром 3–6 мм. Для створення ефективного розпилювального потоку такі сопла потребують великих витрат газу – 50-60 м³/год. Другим недоліком циліндричних сопел є вплив дроту на характер формування потоку й особливо його турбулізацію. Крім того, циліндричні сопла працюють в режимі «недорозширення» – статичний тиск газу на зрізі сопла вище за атмосферний. Тому струмінь дорозширюється на виході з сопла, що призводить до різкої зміни тиску, зменшення енергії потоку, зниження розпилювальної властивості потоку.

Наведені недоліки значною мірою зменшуються внаслідок застосування сопел з розширюваною конусною частиною на виході газового потоку і мінімальною довжиною циліндричної частини. Діаметр конусної частини (при діаметрі сопла 3–6 мм) складає 6,5–8,5 мм при загальній довжині 3–15 мм.

Кут зустрічі електродів ω впливає на формування потоку напилюваних частинок. За умови малих кутів часто утворюються два потоки – по одному з кожного дроту. Великі кути ускладнюють конструкцію розпилювача і збільшують завихрення газового потоку. Тому оптимальний кут зустрічі електродів – 30°.

Конструкція контактних вузлів. Зі збільшенням довжини контакту струмопідвода з дротом збільшується спад напруги. Допускається спад напруги 0,8–1,0 В на 1000 А, тому довжина контактних пластин не перевищує 15–20 мм.

Параметри режиму роботи. Найвигідніше розпилювати за мінімальних значень питомої енергії, що витрачається на плавлення та перегрівання розпилюваного матеріалу. Ентальпія частинок легко регулюється зміною питомої потужності дуги N_d . Потужність дуги визначає продуктивність процесу напилення і ентальпію потоку частинок. Оскільки напруга є нерегульованим параметром, значення потужності дуги регулюють зміною струму дуги. На практиці використовують потужність 5–60 кВт і силу струму 80–600 А при напрузі 18–35 В. Вплив питомої потужності дуги на коефіцієнт використання

матеріалу (КВМ) й адгезійну міцність зчеплення покриття з основою показано на рисунку 4.4.

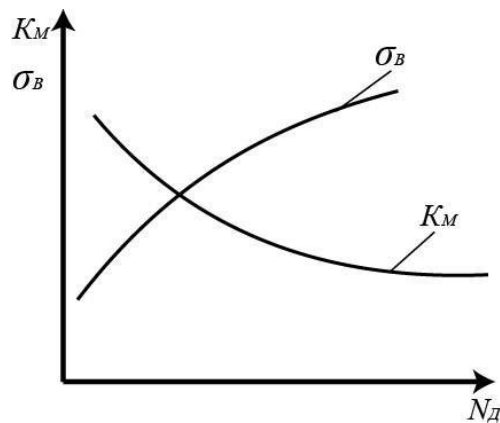


Рисунок.4.4 – Залежність коефіцієнта використання напиленого матеріалу K_M та міцності з'єднання покриття з основою σ_B від питомої потужності дуги N_d

Тиск і витрати розпилювального газу. Збільшення тиску та витрат газу збільшує швидкість потоку і підвищує його розпилювальну властивість. Потрібно створювати умови, щоб швидкість витікаючого потоку була більша за швидкість звуку з мінімальним перепадом тиску на зрізі сопла, що полегшує евакуацію розплавленого металу з поверхні дроту, його диспергування та збільшує швидкість частинок. Застосовують тиск 0,35–0,55 МПа, при витратах 60–150 м³/год.

Параметри розпилюваного матеріалу. До таких параметрів відносять діаметр дроту та швидкість його подачі. Застосовують дріт діаметром 1,0–3,5 мм за швидкості подачі 50–350 мм/с.

Газополуменеве напилювання. Конструктивні параметри – діаметр газового сопла, діаметр отворів по периферії сопла для суміші горючих газів з киснем, кут нахилу осі отворів до осі розпилювача.

Характер витікання струменю в значній мірі залежить від розмірів і профілю обтискного сопла. Конструктивні параметри газополуменевого розпилювача розраховують або вибирають експериментально.

Параметри режиму роботи: вид горючого газу, його тиск, співвідношення «горючий газ – кисень» Оптимальний тиск горючого газу більше $(30-35) \cdot 10^3$ Па при витраті 0,5–2,5 м³/год., співвідношення «горючий газ –

кисень» 1,1–4,0 де нижнє значення для ацетилену, верхнє для пропан-бутанової суміші. Для стискування газового полум'я тиск газу (повітря) має бути більше $(300-400) \cdot 10^3$ Па.

Параметри розпилюваного матеріалу: дисперсність розпилюваного порошку 10–100 мкм, витрати порошку 0,5–10,0 кг/год. Тиск транспортного газу (кисень) $100-200 \cdot 10^3$ Па при витратах 0,3–0,6 м³/год. Діаметр дроту 1,0–3,0 мм, швидкість подачі 50–150 мм/с.

Детонаційне напилювання. Конструктивні параметри – це діаметр і довжина ствола, які впливають на ефективність напилення найбільшою мірою. Оптимальними розмірами є діаметр ствола 840 мм, довжина 1200–2000 мм.

Параметри режиму роботи. Найбільш значущим є вид і витрати детонувальних газів, відношення між горючим газом і киснем. Оптимальним під час напилювання є витрати ацетилену і кисню 0,2–6,0 м³/год при тиску 0,05–0,15 МПа. Суттєво впливає на ефективність процесу співвідношення «кисень - горючий газ». Для суміші «кисень-ацетилен» оптимальне відношення 1,21–1,25.

Параметри розпилювального матеріалу і місце його введення в ствол. Найбільший вплив на ефективність процесу дає гранулометричний склад порошку. Оптимальним розміром частинок 10–50 мкм. Частинки більших розмірів не встигають нагрітися і розігнатися до потрібних швидкостей. Кількість матеріалу, що подається, знаходиться в широких межах в залежності від потужності установок і становить від 0,5 до 8 кг/год. Глибина завантаження порошку в ствол установки впливає на швидкість порошку. Найвища швидкість досягається, якщо порошок подавати на відстані 200–400 мм від зрізу детонаційного ствола.

Вакуумно-конденсаційне напилювання. Характерною особливістю вакуумно-конденсаційного напилювання є велика кількість параметрів, що впливають на якість покриття та швидкість напилювання.

Конструктивні параметри. Розмір і конструкція робочої камери визначають коливання остаточного тиску в процесі напилення. Зі збільшенням об'єму камери зменшується коливання тиску, але збільшується газовиділення

зі стінок камери.

Конструкція випарників. Використання випарників без водяного охолодження забезпечує мінімальні витрати енергії, яка підводиться до матеріалу, але не дозволяє сконцентрувати на напилюваній поверхні значні потужності. Тому в більшості випадків, особливо за вибухового розпилення, використовують водоохолодження випарників.

Режим роботи випарників. Для підвищення якості покриття і швидкості напилення потрібно створювати густі парові потоки і підвищувати енергетичний рівень напилюваних частинок парового потоку. Ці характеристики потоку визначаються питомою потужністю, підведеною до розпилюваного матеріалу. Із підвищенням кількості енергії, що підводиться до матеріалу, зростає парціальний тиск парів і густина потоку напилюваних частинок. Зі збільшення густини парового потоку збільшується швидкість утворення зародків кристалів на напилюваній поверхні. У результаті цього отримують покриття з дрібнозернистою стовпчастою структурою. Отже, регулюючи потужність, підведену до розпилюваного матеріалу, можна регулювати структуру і властивості покриттів. Для підвищення ефективності напилювання потрібний високий ступінь іонізації потоку напилюваних частинок. Із цією метою парова фаза іонізується додатковою енергією за рахунок жевріючого розряду, магнітного поля, дугового розряду тощо.

Параметри випаровуваного матеріалу. Майже у всіх методах напилення використовують компактні матеріали різних форм і розмірів, що визначаються умовами оптимального використання матеріалу (оптимальна площа випаровування, рівномірність подачі в зону напилення). Температура плавлення суттєво впливає на процес розпилення у разі використання термічного випаровування. За вибухового розпилювання температурний фактор впливає менше.

Параметри умов напилювання. Дистанція напилення особливо впливає на рівномірність покриття. Для визначення оптимальної відстані за вакуумно-конденсаційного напилення слід використовувати закони Ламберга-Кнудсена:

1. Інтенсивність пару в напрямі поверхні напилення пропорційна косинусу кута розходження потоку з джерела у вигляді крапки.

2. Кількість матеріалу в покритті обернено пропорційно квадрату відстані між випаровуваним металом і поверхнею напилення. За вакуумно-конденсаційного напилювання дистанція напилення становить 20–500 мм.

Тиск в камері напилення визначає передусім довжину вільного пробігу електрона. З одного боку, низький тиск полегшує перенесення частинок, з другого, – збільшення тиску дозволяє підвищити рівномірність товщини покриття, стабільність горіння дугового або тліючого розряду. Тому в кожному конкретному випадку визначають оптимальний тиск в вакуумній камері.

Температура напилених виробів суттєво впливає на структуру і властивості покриття (міцність зчеплення, напруга тощо). Із підвищенням температури поверхні вище 400 °С властивості покриттів підвищуються, особливо міцність зчеплення покриття з основою. Але не всі матеріали можна нагрівати до високих температур. Наприклад, загартовані сталі, сплави, у яких є фазові та структурні зміни. У такому разі температуру поверхні визначають у кожному конкретному випадку. Дослідження доводять, що мінімальна температура поверхні для отримання високої міцності – 400°С.

4.2 Технологічна схема напилювання

Технологічну схему напилювання зображено на рисунку 4.5.

Як видно з наведеної схеми, кількість операцій під час напилювання може бути різною. Так, за вакуумно-конденсаційного напилення відбуваються дві операції: підготовка поверхні та напилення, після якого немає ніякої обробки. За газотермічного напилювання після операції напилення може бути додаткова обробка покриття, механічна або хіміко-термічна (вибір залежить від виду покриття та його призначення). Розглянемо більш детально кожен етап напилювання.

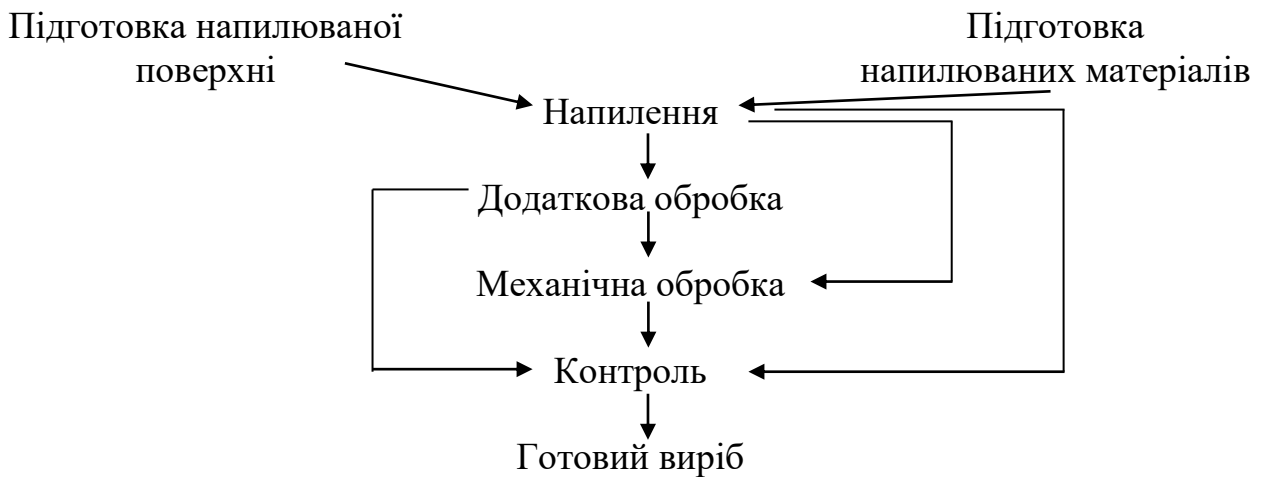


Рисунок 4.5 – Загальна схема напилування

Підготовка напилуваних матеріалів. Це найпростіша операція в технології напилення. Порошки для напилення повинні мати якомога меншу дисперсію розмірів і бути сухими. Тому підготовка порошоків складається з сушіння при температурі 250–300 °С і просіювання через сито з відповідним розміром вічок. Дріт за потреби знежирюють. Так само підготовлюють зливки, пластини та інші матеріали за вакуумно-конденсаційного напилування.

Підготовка поверхні напилення. За вакуумно-конденсаційного способу поверхню має бути з мінімальною висотою мікронерівностей, заокругленими гострими кутами і з високим ступенем обезжирювання поверхні. За газотермічного напилування поверхня повинна мати активно розвинену поверхню, бо чим більша поверхня контакту деталі та покриття, тим вища міцність зчеплення покриття з основою. Крім цього, поверхня повинна має бути знежирена й очищена від різних забруднень.

Схему підготовки поверхні за вакуумно-конденсаційного напилування подано на рисунку 4.6.

Операції шліфування та віброабразивної обробки зменшують висоту мікронерівностей, заокруглюють гострі кути. Іноді після шліфування застосовують навіть полірування. Слід зауважити, що вакуумно-конденсаційне напилення не змінює шорсткості поверхні. Після механічної обробки деталі

миють в ультразвукових ваннах. Під дією ультразвуку на поверхні деталі утворюються повітряні кульки, в яких знаходиться повітря під тиском. Кульки повітря, розриваючись на поверхні деталі, утворюють ефект кавітації, що дозволяє видалити з поверхні забруднені плівки, навіть якщо вони мають молекулярний зв'язок з поверхнею.

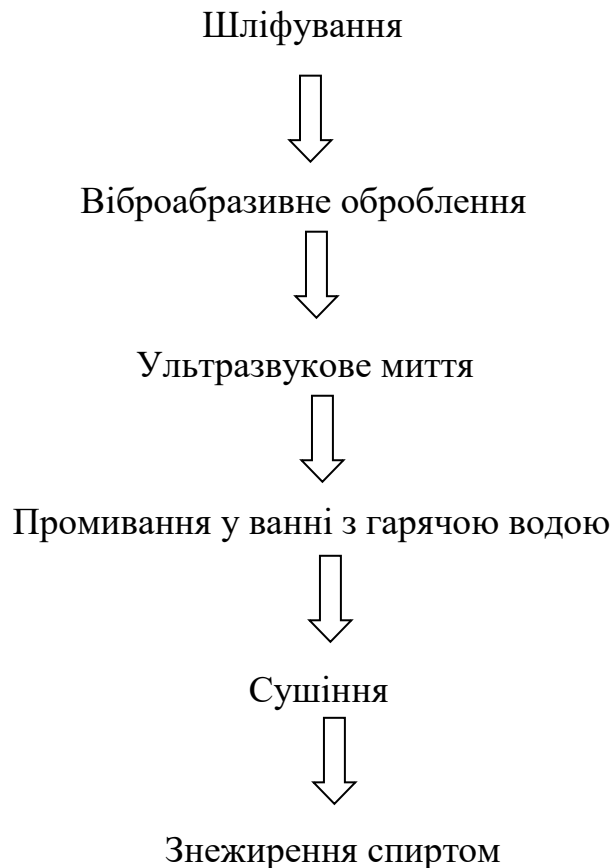


Рисунок 4.6 – Схема підготовки поверхні за вакуумно-конденсаційного напилювання

Після ультразвукового миття деталі миють в гарячій воді з поверхнево активними речовинами або пральним порошком, потім сушать і перед завантаженням в камеру напилювання протирають спиртом.

Завантажені в камеру деталі перед напиленням очищають електричними газовими розрядами. Залежно від конструкції установки для напилення ці розряди можуть бути різними.

1. Жевріючий високовольтний розряд ($I_p = 30-60$ мА, $U_p = 1,5-3,0$ кВ, $\tau = 5-25$ с). Потік іонів не тільки очищує поверхню, а й активує її, оскільки на

поверхні з'являються дислокації та вакансії.

2. Дуговий розряд, краще імпульсний ($I_p = 10\text{--}30$ А, $U_p = 15\text{--}20$ В, $\tau = 10\text{--}15$ с). На поверхні відбуваються ерозійні процеси, структура являє собою нерівномірно розміщені лунки, і в деяких місцях утворюються підплавлені мікроточки. Ефективність дугового розряду в 4 рази більша за ефективність жевріючого. Очищення поверхні напилюваними частинками. Напилювані частинки у вигляді іонів з потенціалом 1–3 кВ, бомбардують поверхню створюючи на ній дефекти, чим активують її.

Під час очищення поверхні вказаними способами відбувається також нагрівання поверхні перед напиленням. За потреби, наприклад, напилення загартованих інструментальних матеріалів температуру контролюють так, щоб вона не перевищувала 400 °С. Нагрівання поверхні напилення є обов'язковою умовою для міцного зчеплення покриття з поверхнею.

Більшу кількість операцій має підготовка поверхні за газотермічного напилення. Взаємозв'язок операцій підготовки поверхні ілюструє рисунок 4.7.

На напилювання можуть надходити деталі двох типів:

1. Нові, поверхню яких треба напилити, щоб надати їй нових властивостей.

2. Спрацьовані, розміри яких слід поновити.

Залежно від того, які деталі надходять на напилення, у яких умовах працює покриття, вибирають один з шести варіантів операцій, поданих на рисунку 4.7.

Очистка і миття. Ці операції застосовується для всіх деталей. Якщо деталі мають лише жирові забруднення (олива, охолоджувальна рідина тощо), то їх миють з допомогою спеціальних хімічних речовин (розчин каустичної соди, водні лужні розчини з поверхнево активними компонентами, гарячою водою тощо).

Якщо поверхня має більш стійке забруднення, використовують розчинники: спирти та хлоровані вуглеводні. Якщо треба очистити поверхню від оксидів, застосовують розчини лугів та кислот. Звичайні вуглецеві сталі травлять соляною кислотою; корозієстійкі – сумішшю різних кислот HCl–

$H_2SO_4-HNO_3$ або HNO_3-HF .



Рисунок 4.7 – Взаємозв’язок операцій підготовки поверхні за газотермічного напилювання

Очищуючи та миючи деталі, потрібно звертати увагу і на поверхні, що прилягають до напилюваної. Їх також слід очищати від бруду, щоб під час напилення, коли поверхня нагрівається, його не було перенесено в покриття.

Деталі з пористих матеріалів, а також деталі, що мають внутрішні канали для подачі мастила (наприклад, колінчасті вали), треба після миття нагрівати до температури 260–540 °С для вигорання мастила, щоб під час напилення воно не випаровувалось, не осідало на напилювану поверхню та не потрапляло в покриття.

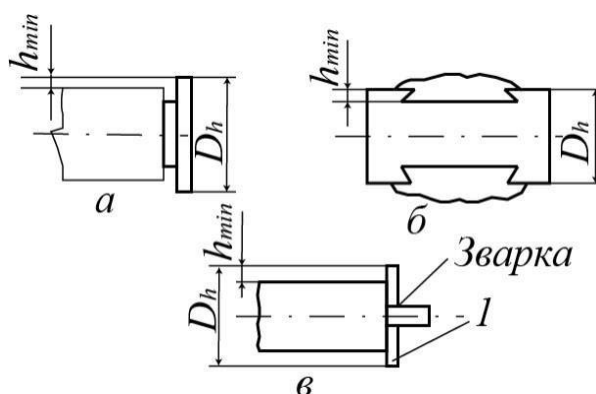
Якщо потрібно зняти з поверхні товстий шар окалини або конгломерату

окалини і застарілого мастила, використовують киснево-ацетиленове або киснево-пропанове полум'я. Швидко проводять місцеве нагрівання деталі, й окалина відшаровується від поверхні за рахунок різних коефіцієнтів термічного розширення окалини і матеріалу деталі.

Попередня механічна обробка. Її переважно застосовують на поверхнях обертання. Призначення цієї операції:

- видалення шару металу, роз'їденого корозією;
- виправлення овальності, конусності, отриманих в результаті спрацювання;
- виточування замикальних буртів на краях напилюваної деталі;
- зменшення діаметра для забезпечення можливості нанесення покриття з мінімально допустимою товщиною шару 0,3–1,2 мм.

Токарна обробка (рис. 4.8). Її виконують для утворення замикальних виступів або канавок, глибина яких має дорівнювати товщині самого покриття або бути трохи більшою за неї. У випадку напилювання валів великих розмірів (наприклад, валів поліграфічних машин) замикальні бурти виготовляють із зносостійких матеріалів у вигляді дисків і приварюють до торцевого боку валу. Диск має діаметр дещо більший, ніж номінальний розмір вала з покриттям (рис. 4.8, в).



а – утворення замикального бурту; б – проточування канавки типу «ластівчин хвіст»; в – утворення бурту зварюванням

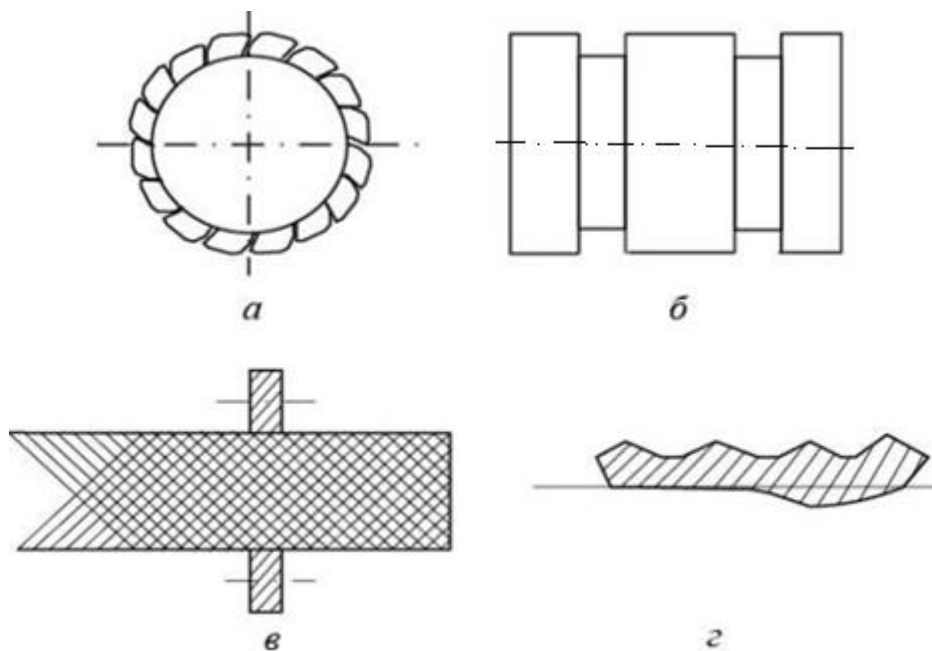
Рисунок 4.8 – Токарна обробка поверхні

Готуючи до напилення місця під підшипники, слід простежити, щоб довжина проточки перевищувала ширину підшипника і заглиблення було типу «ластівчин хвіст» для запобігання відшарування по краях покриття.

Нарізання рваної різьби. Рвану різьбу нарізають в напрямку обертання деталі при малих обертах (30–40 об/хв) без охолоджувальної рідини. Для нарізанні різьби створюють умови, щоб стрічка різьби була рваною (рис. 4.9, а). Для цього збільшують консольність різця, виставляють його нижче горизонтальної осі деталі на 1–2 мм. Різьбу ріжуть за один прохід глибиною 0,5–0,8 мм, з кроком 0,5–1,5 мм.

Нарізання кільцевих канавок (рис. 4.9, б) виконують відрізним різцем, (ширина канавок 1,2–1,4 мм, крок 1,6–2 мм, глибина 0,7–0,8 мм). Для збільшення шорсткості застосовують форсовані режими різання і охолоджувальну рідину.

Косу сітчасту накатку застосовують на циліндричних поверхнях, які мають твердість до 35HRC. Накатку виконують двома роликми (рис. 4.9, в). Кожен ролик має насічку зі своїм кутом нахилу, тому на поверхні деталі утворюються ромбічні відбитки, що мають у розрізі вигляд, представлений на рисунку 4.9, г.



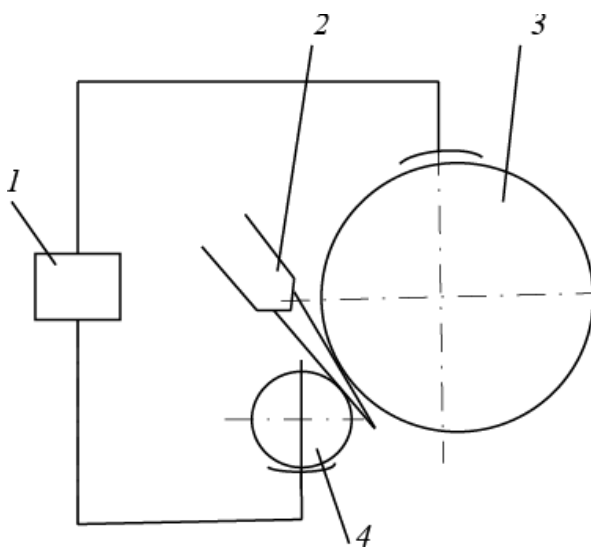
a – рвана різьба; *б* – кільцева канавка; *в* – коса сітчаста накатка; *г* – форма поверхні за сітчастої накатки

Рисунок – 4.9 Види підготовки деталей до напилення

Знежирення виконують лише після сітчастої накатки і нарізання кільцевих канавок, бо в цих операціях використовують охолоджувальні рідини, що мають жирову складову. Якщо цього не робити, то жирові забруднення знизять ефективність струминно-абразивної обробки, що негативно позначиться на якості покриттів, особливо на міцності зчеплення покриття з основою. Знежирюють зазвичай у розчині каустичної соди.

Електроіскрову обробку застосовують на деталях із високою твердістю, де механічна обробка неможлива. Для електроіскрової обробки використовують електрод у вигляді пучка нікелевого або алюмінієвого дроту 0,1–2 мм. Ці електроди розплавляють за допомогою електричної дуги і приварюють до поверхні, утворюючи виступи висотою 0,1–0,75 мм. Джерелом струму є зварювальні апарати.

Схему другого способу електроіскрової обробки подано на рисунку 4.10.



1 – джерело струму; 2 – сопло для подачі рідини; 3 – оброблювана деталь;
4 – електрод-інструмент

Рисунок 4.10 – Схема електроіскрової обробки поверхні за допомогою електрода-ролика

Як електрод тут використовують ролик з нікелю або його сплаву. Коли ролик котиться по поверхні деталі, у зоні контакту він оплавляється, і частинки його приварюються до поверхні. Для охолодження поверхні й активації перенесення частинок на поверхню використовують рідину – водні

розчини бури або каоліну. В залежності від режиму, висота мікронерівностей на поверхні складає 50–120 мкм.

Ізоляція поверхні, яка не напилюється. Напилювану поверхню ізолюють для того, щоб напилюваний матеріал не потрапив на ненапилювані поверхні, оскільки це може змінити геометрію деталі, порушити її балансування закрити потрібні отвори на деталі тощо. Поверхні, які не підлягають напиленню, закривають металевими, картонними, азбестовими екранами. Шпонкові канавки й отвори забивають дерев'яними пробками. Пробки повинні виступати над поверхнею на 0,5–1 мм. Для ізоляції поверхні, яку необхідно захистити від напилення, використовують також різні розчини (водні розчини мила, рідкого скла), які наносять на ненапилювану поверхню пензлем. Потім висушують і передають на наступну операцію. Якщо покриття попадає на таку поверхню, то після напилення воно легко знімається з поверхні металевою щіткою.

Струминно-абразивна обробка – обов'язкова операція підготовки поверхні незалежно від вибраної послідовності операцій. Під час такої обробки поверхня очищується від забруднення, активується за рахунок збільшення площі поверхні нагартування. Струминно-абразивну обробку поверхні виконують повітряним струменем, змішаним з абразивом – колотим чавунним дробом з гострими краями, сталевим дробом або корундом.

Застосовуються три типи струминно-абразивних установок, які розрізняють за способом подачі абразивного матеріалу:

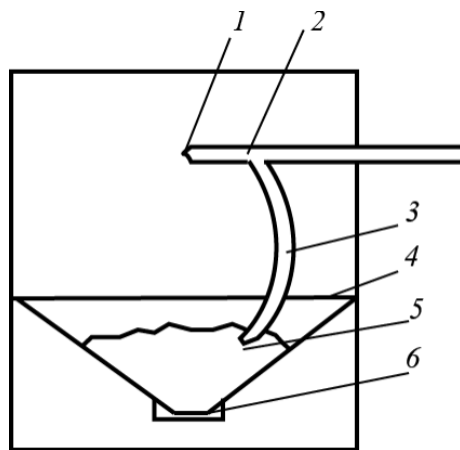
1. Установки всмоктувального типу, що працюють за принципом замкнутого обігу абразиву, що засмоктується з нижньої частини бункера завдяки розрідженню, яке утворюється в інжекторі розпилювача.

2. Установки нагнітального типу, що працюють за принципом подачі абразиву під тиском стисненого повітря без замкнутого обігу абразиву.

3. Установки нагнітального типу із замкненим кругообігом абразиву.

Для газотермічного напилення найпоширеніші установки всмоктувального та нагнітального типів як екологічно безпечні. Установку всмоктувального типу, подано на рисунку 4.11. Вона працює менш ефективно,

ніж установка нагнітального типу, але простота конструкції й експлуатації забезпечує широке застосування цих установок за газотермічного напилення. Працюють такі установки таким чином. Стиснене повітря подається до сопла інжектора 2, де утворюється розрідження, і порошок по гнучкому шлангу 3 подається до сопла 1, утворюючи повітряно-абразивний потік, що спрямовується на оброблювану поверхню. Абразив після зустрічі з поверхнею через сітку 4 попадає до бункера, потім знову через шланг 3 подається до сопла. У такий спосіб утворюється замкнений кругообіг абразиву.



1 – сопло; 2 – інжектор; 3 – гнучкий шланг;

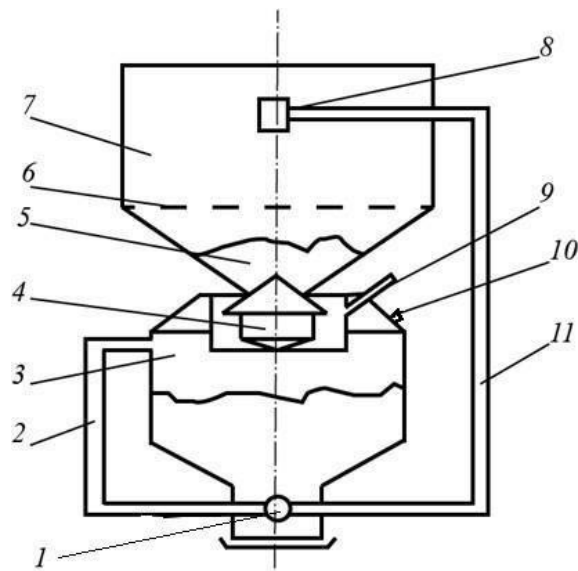
4 – сітка; 5 – абразивний порошок; 6 – розвантажувальний люк

Рисунок 4.11 – Схема струминно-абразивної установки всмоктувального типу

У міру зниження абразивних властивостей абразиву і його забруднення періодично в бункері замінюють абразив через розвантажувальний люк 6.

Схема установки нагнітального типу зображено на рисунку 4.12.

Ця установка працює таким чином. Стиснене повітря подається в вентиль 10, створюючи в бункері 3 тиск, що діє на порошок, притискуючи його до нагнітального клапана 1. Повітря по трубопроводу 2 подається також до нагнітального клапана, де змішується з абразивом і потрапляє по трубопроводу 11 на розпилювальне сопло 8. Переміщенням сопла 8 потік абразиву спрямовується на оброблювану поверхню.



1 – нагнітальний клапан; 2,11 – трубопроводи;

3 – бункер; 4 – перепускний клапан; 5 – порошок; 6 – сітка;

7 – камера; 8 –розпилювальне сопло; 9,10 – вентилі

Рисунок 4.12 – Схема струминноабразивної установки нагнітального типу

Коли в камері накопичується велика кількість абразиву на перепускний клапан через вентиль 9 подається стиснене повітря, клапан відкривається і порошок пересипається у бункер 3.

Напилювання проміжного шару – ефективний спосіб досягнення високої міцності зчеплення покриття з основою, зниження напруги на межі розділу покриття-основа. Для напилення проміжного шару використовують такі матеріали як молібден, терморегуючі порошки, нікель, ніхром. Товщина проміжного шару дорівнює 0,05–0,15 мм.

Описані операції можна застосовувати під час підготовки деталей у різних варіантах. Тому, вибираючи доцільний варіанту, слід урахувувати, що підготовка поверхні має відповідати наступним умовам:

1. Задовольняти вимоги по міцності зчеплення покриття з основою.
2. Зберігати розраховану міцність деталі, урахувуючи зменшення міцності відутомленості за знакозмінних навантажень.
3. За наявності декількох можливих варіантів підготовки поверхні вибирають той, який економічно вигідніший.

У практиці газотермічного напилення найпоширеніший варіант – струминно- абразивна обробка – напилювання проміжного шару. Це пов'язано з тим, що механічна і електроіскрова підготовки поверхні різко знижують міцність від утомленості матеріалу за знакозмінних навантажень.

Напилення покриттів. Напилення значною мірою впливає на фізико-хімічні процеси та властивості покриттів. Способи нанесення покриттів значно відрізняються один від одного, наприклад, газотермічні та вакуумно-конденсаційні. Технологію напилення взагалі треба розглядати за групами матеріалів для напилення, оскільки властивості покриттів залежать від матеріалів найбільшою мірою. Матеріали для напилення було розбито на п'ять груп: метали, сплави, інтерметаліди, металоїдні сполуки, оксиди.

Напилювання чистих металів. Покриття з чистих металів широко використовують у техніці. Найбільше їх застосування, як захисні покриття, корозієстійкі, жароміцні. Напилюючи чисті метали, слід урахувати можливість їх активного окислення та насичення газоподібними елементами – азотом і киснем, особливо за газотермічного напилення у відкритій атмосфері. Повітря, що потрапляє в газовий потік, підвищує в ньому кількість азоту та кисню, що взаємодіють з напилюваним металом. Крім азоту та кисню, у газовій суміші може бути водень, особливо за газополуменевого напилення, і волога. За плазмового способу нанесення покриттів водень утворюється із вологи, яка є в плазмотвірних газах. Насичення металів воднем призводить до зменшення міцності покриттів. Практика електродугової металізації свідчить, що під час напилення маловуглецевої сталі в покритті знаходиться 2,5–5,7 % (мас.) кисню, тоді як у цій сталі до напилення вміст кисню не перевищує 1 % (мас.). Частина кисню знаходиться в твердому розчині в залізі, друга частина утворює оксид, що в цілому знижує якість покриттів.

Напилюючи чисті метали, також треба враховувати їх можливість випаровуватися, що збільшує витрати матеріалів і кількість аерозолей в робочій зоні.

Отже для напилення чистих металів потрібно вибирати гази, які

утворюють нейтральну атмосферу, щоб знизити насичення металів активними газами. Щоб зменшити кількість випаровуваного металу слід вибирати оптимальну теплову потужність джерела тепла.

Напилювання металів вакуумно-конденсаційними способами не має недоліки, які є за газотермічного напилення, через низький тиск, за якого концентрація газів незначна і вони не потрапляють в покриття. Тому металеві покриття, одержані вакуумно-конденсаційними способами, мають вищі показники якості.

Напилювання металевих сплавів. Для напилення використовують металеві сплави, які містять декілька металів у різних співвідношеннях, що мають різні характеристики (температура плавлення, парціальний тиск парів і активність до кисню).

За газотермічного напилювання сплавів треба особливу увагу звернути на властивості тих матеріалів, яких менше в сплаві, щоб під час напилення не було втрат легуючих елементів. У процесі напилення в першу чергу випаровуються елементи з високим парціальним тиском пари: цинк, магній, марган тощо. Тому за газотермічного напилення потрібно підбирати режими напилення і середовище нагрівання матеріалів. Крім того, за газотермічного напилення, щоб уникнути небажаного випаровування та взаємодії напилюваних сплавів у вигляді порошку, слід використовувати плаковані порошки.

За вакуумно-конденсаційного напилення прямим випаровуванням не можна отримати покриття металевими сплавами з різних елементів, властивості яких суттєво відрізняються. Тому для того, щоб вирівняти енергію атомів різних елементів, кожний елемент випаровують окремо.

Напилення сполук металідного типу. Сполуки цього типу утворюються внаслідок хімічної реакції між двома металами. Більшість таких металідів мають високу твердість, міцність, температуру плавлення. Тому їх широко застосовують для отримання зносо- та корозієстійких покриттів.

Ці матеріали можуть бути двох видів, що залежить від способу їх отримання. Якщо суміш металів плавиться, а потім розпилюється, то процес

утворення металідів відбувається під час плавлення. Особливістю напилення таких матеріалів є те, що в таких металевих сплавах немає взаємодії між елементами під час напилення й існує ризик випаровування компонентів, що мають високий парціальний тиск парів.

Другий вид – це матеріали, у яких реакція утворення металідів відбувається під час напилення з виділенням тепла. Виділення тепла дозволяє напилюваним частинкам потрапляти на поверхню, маючи високу температуру, й активніше взаємодіяти з поверхнею. Такий вид матеріалів отримують грануляцією, плакуванням, конгломеруванням. Напилюючи такі матеріали, слід урахувати температуру початку активної реакції і тривалість її перебігу. Для матеріалів, які застосовують у газотермічному напилюванні, температура початку активної реакції становить більше 700 °С. Тривалість перебігу реакції залежить від природи матеріалів і розміру напилюваних частинок і становить декілька мілісекунд, тому залежно від швидкості перебігу реакції вибирають відповідну дистанцію напилення, щоб реакція утворення металіду закінчувалась до зустрічі частинок з поверхнею напилення.

Напилення металоїдних сполук. Треба враховувати можливість окиснення і випаровування елементів, які містить сполука, а також дисоціацію і сублімацію сполуки.

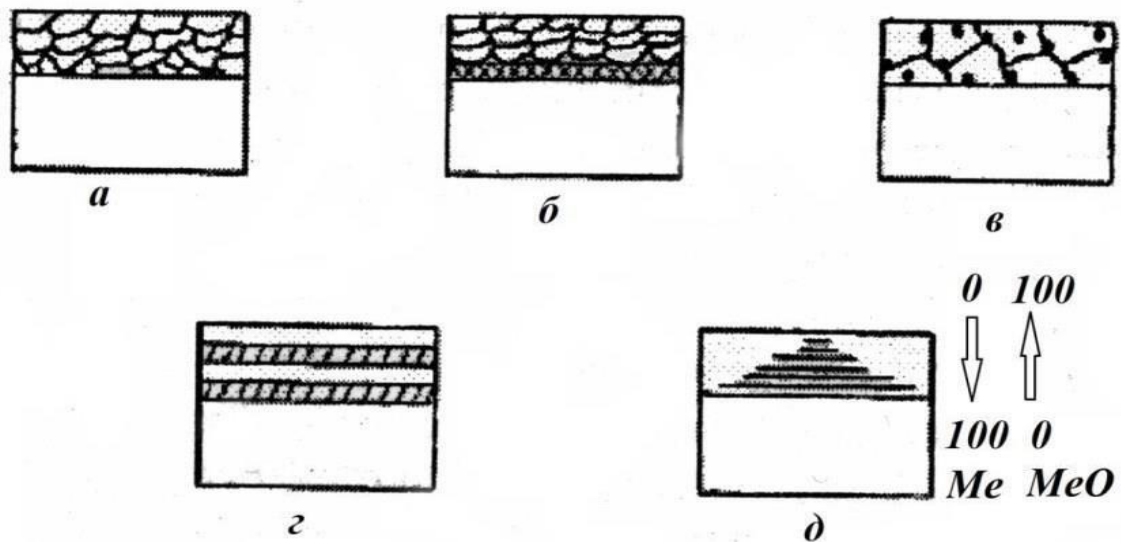
Під час напилення карбідів відбувається знеуглецювання поверхні частинок, що позитивно впливає на міцність зчеплення покриття з основою. Іноді для підвищення міцності зчеплення використовують суміш дрібних і великих порошків. Дрібні порошки карбіду знеуглецьовуються майже до чистого металу, який у покритті виконує роль зв'язки, збільшуючи міцність покриття.

Напилювання оксидів. Напилюючи оксиди, треба враховувати можливість їх взаємодії з газами-відновниками (водень, оксид, вуглець), які можуть утворюватись в газовому потоці внаслідок розкладання парів води або неповного згорання горючих газів (метан, пропан, ацетилен тощо). Тому необхідно регулювати співвідношення компонентів горючої суміші так, щоб газовий потік

був нейтральний до оксидів.

Обробка покриттів після напилювання. Така обробка підвищує міцність зчеплення покриття з основою й експлуатаційні властивості матеріалу покриття. Для обробки покриттів після напилення застосовують термічну і хіміко-термічну обробку й обробку тиском, за яких потрібно враховувати структуру покриття. Структуру покриттів подано на рисунку 4.13.

Одношарові (рис. 4.13, *а*) використовуються тоді, коли взаємодія основи і напилюваного матеріалу забезпечує належну міцність зчеплення, наприклад, у разі використання однотипних матеріалів із близькими коефіцієнтами термічного розширення.



а – одношарові; *б* – покриття з проміжним шаром; *в* – багатокомпонентні;
г – багатошарові; *д* – градієнтні

Рисунок 4.13 – Структура газотермічних покриттів

Покриття з проміжним шаром (рис. 4.13, *б*), товщиною 0,1–0,15 мм, використовують, коли властивості покриття й основи суттєво відрізняються. Завдання проміжного шару – зменшити напругу на межі «покриття – основа» та збільшити міцність зчеплення покриття з основою.

Багатокомпонентні покриття (рис. 4.13, *в*) широко застосовують для отримання покриття з широким спектром властивостей.

Багатошарові покриття (рис. 4.13, *г*) застосовують для отримання

покриття з підвищеною міцністю на згин, для чого напиляють шари пластичного і твердого матеріалів.

Градiєнтні покриття (рис. 4.13, д) застосовують, коли основа і матеріал покриття несумісні, наприклад, сталь і оксид металу. Для отримання такого покриття напилення починають чистим металом, потім поступово вводять в напилюваний потік оксид, зменшуючи кількість металу. При закінченні напилення в потоці має бути лише оксид.

Вибираючи спосіб обробки напилюваного покриття, слід враховувати структурні зміни, наприклад, розчинення проміжного шару, змішування шарів у покриттях з проміжним шаром та інше.

Найпоширенішою операцією обробки покриттів після напилення є оплавлення для інтенсифікації процесів дифузії, отримання безпористого шару, збільшення міцності зчеплення покриття з основою. Під час оплавлення поверхні не має бути стікання розплавленого матеріалу з поверхні та порушення рівномірності товщини покриття.

Як приклад можна навести самофлюсівні сплави нікелю, які широко застосовують для напилення. Вони мають знижену температуру плавлення (980 – 1050 °C), що обумовлено утворенням нікель бор-кремнієвих евтектик. Крім того, під час напилення відбувається процес самофлюсування: бор і кремній відновлюють оксиди нікелю, хрому та заліза, й утворені оксиди бору і кремнію піднімаються на поверхню, утворюючи боросилікатну плівку. Частина бору утворює з хромом і нікелем боріди, які підвищують зносостійкість покриттів. Оплавлення таких покриттів збільшує міцність зчеплення покриття з основою майже вдвічі, щільність досягає 100 %, збільшуються також зносостійкість і корозієстійкість.

Оплавляють здебільшого газовими пальниками, у печах, за допомогою струмів високої частоти (СВЧ), в соляних ваннах, променем лазера тощо. Вибір способу оплавлення залежить від розмірів деталі з покриттям, характеристики матеріалу основи та потужності джерела нагрівання. Широко застосовують газополуменеве оплавлення газовим пальником.

Незважаючи на спосіб оплавлення, важливо не допускати перегрівання покриття, щоб уникнути стікання матеріалу покриття з поверхні, утворення усадкових раковин, відшарування покриття від основи. Для уникнення утворення тріщин в покритті треба зменшувати швидкість охолодження, розміщуючи деталі в піску або азбестовому кришеві.

Оплавлення не можна застосовувати в таких випадках:

1. Коли структура покриття змінюється, погіршуючи властивості покриття. Якщо температура плавлення матеріалу основи нижче потрібної температури оплавлення.

2. Якщо основа не змочується матеріалом покриття.

3. У разі виникнення значних внутрішніх напружень на межі розподілу «покриття – основа» внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення (к. т.р.), поліморфних перетворень зі зміною об'єму.

4. Під час використання легованих сталей з малою критичною швидкістю охолодження, тому що перетворення «аустеніт – мартенсит» перебігає із збільшенням об'єму, що може зруйнувати покриття. У такому випадку треба виконати ізотермічний відпал для перетворення аустеніту в ферит за діаграмою перетворення конкретної сталі.

5. За умови вмісту в основі таких елементів, як сірка, свинець, що, розчиняючись в покритті, роблять його крихким.

Термічна обробка (відпал) виконують для зменшення пористості, утворення дифузійного прошарку і підвищення міцності зчеплення покриття з основою. Наприклад, відпал жароміцних сплавів з плазмовим покриттям із нікельхромалюмініїтрієвих сплавів при 1040–1300 °С протягом 2–4 годин в середовищі аргону або вакуумі призводить до утворення дифузійної зони шириною 10–15 мкм, що збільшує в 1,5–3 рази міцність зчеплення покриття з основою.

Для підвищення корозієстійкості листової маловуглецевої сталі з покриттям із феритних (Fe–Cr) або аустенітних (Ni–Cr) матеріалів, які наносять плазмовим напиленням, застосовують дифузійний відпал при температурі 1000–

1200 °C протягом 1–2 годин, потім виконують холодну прокатку з 60 % -м обтискуванням і рекристалізаційний відпал при 780 °C протягом 10–30 хвилин в осушеному водні. Щільність покриття досягає 100%, а корозієстійкість відповідає стійкості литих аустенітних і феритних сталей.

Дифузійний відпал призначено для покриттів, одержаних плазмовим напиленням порошків карбїду вольфраму, титану, боридів титану, плакованих нікелем або міддю. У результаті підвищується зносостійкість покриттів унаслідок підвищення зв'язку між твердими частинками та напилюваною поверхнею.

Окисний відпал застосовують для самоущільнення покриттів. Самоущільнення відбувається під час відпалу в окисному середовищі покриттів із керметів ($\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$, Ni-ZrO_2), що збільшують свій об'єм, заповнюючи пори, збільшуючи щільність покриттів за рахунок окиснення металів і, як наслідок, підвищують його жаростійкість.

Хіміко-термічна обробка дозволяє суттєво змінити властивості покриттів. Так цементація плазмового покриття із феробору на чавун у твердому карбюризаторі при температурі 900–1100 °C підвищує щільність покриття від 90 до 98%, міцність зчеплення покриття з основою у 1,5–2 рази, зносостійкість у 2–4 рази. Фосфатування покриттів із вуглецевої сталі підвищує зносостійкість. Алітування плазмових покриттів на основі заліза з вкрапленнями карбїду титану або бориду цирконію, напилених на сплави титану, підвищує термо- та корозієстійкість покриттів.

Просочення застосовується тоді, коли неможливо виконати оплавлення. Завдання цієї операції – знизити пористість та газопроникність покриттів, що підвищує корозійні властивості та жаростійкість.

Покриття, які працюють при кімнатних температурах, просочують кремнійорганічними рідинами, епоксидними та фенольними смолами, силіконовими або бакелітовими лаками.

При робочих температурах вище 200°C застосовують просочення різними припоями Ag-Cu , Cu-Zn , Ni-Mn . Частину припою можна вводити під час

напилення в матеріал покриття. Активації процесу просочення покриття можна досягти в середовищі водню або вакууму. Крім того, зменшується час просочення до 10 хв. Просочення покриття із карбіду вольфраму міддю збільшує щільність і підвищує в 2,5–3 рази міцність зчеплення покриття з основою.

Знаходить застосування і хімічне просочення переважно для плазмових покриттів із оксиду алюмінію. Їх просочують розчином $Al_2(NO_3)_3$, потім відпалюють при температурі 825 °С, у процесі чого азотнокислий алюміній перетворюється в Al_2O_3 . Багаторазове просочування та відпал дає зниження пористості до 1 %. Жаростійкі покриття із тугоплавких оксидів (алюмінію, хрому, кальцію, заліза, цирконію тощо), які утворюють евтектики з температурою 800–1000 °С, просочують розчинами хромистої або фосфорної кислоти, які при нагріванні перетворюються в оксиди. Просочування і нагрівання виконують декілька разів для досягнення високої щільності і твердості покриття.

Обробка покриттів тиском знижує пористість і збільшує міцність зчеплення покриття з основою. Для цього застосовують гарячу ізостатичну обробку при тиску 1,0–1,2 ГПа і температурі 1100 °С протягом 7 хвилин, що дозволяє отримати безпористу структуру покриття з високою міцністю зчеплення з основою. Обкатку роликми використовують для електрохімічних покриттів (цинкових, алюмінієвих та їх сплавів). Обробку роликми виконують при температурі 200–300 °С, що збільшує щільності покриттів, як наслідок корозієстійкість у 2–3 рази.

4.3 Контроль якості напилюваних покриттів

Способи контролю напилюваних покриттів поділяються на дві групи: неруйнівні та руйнівні. До неруйнівних відносять: контроль зовнішнього вигляду, вимірювання товщини покриттів, визначення дефективності покриттів ультразвуковими, магнітними методами.

До руйнівних належать визначення міцності (на згин, відрив, зріз),

пористості, зносостійкості, корозієстійкості, термостійкості тощо.

Контроль якості вакуумно-конденсаційних покриттів зумовлює деякі труднощі через малу товщину покриття. Для визначення товщини покриття застосовують металографічні та фізичні способи.

За металографічних способів визначення товщини покриття треба розрізати деталь і зробити шліф.

За фізичних способів визначення товщини покриття використовують рентгенівські промені, бетапромені, магнітні та індукційні поля, що дозволяє визначити товщину покриття без руйнування деталі.

Визначення товщини покриття з допомогою рентгенівського випромінювання базується на послабленні інтенсивності рентгенівського випромінювання, відбитого від двох ділянок поверхні – з покриттям і без нього від лінії (110) α -Fe основи. Інтенсивність обчислюють за формулою:

$$I = I_0 \cdot e^{-M_0 x}$$

де I , I_0 – інтенсивність випромінювання відбитого від ділянок відповідно з покриттям і без нього, імп./с;

M_0 – лінійний коефіцієнт ослаблення променів у матеріалі покриття;

x – товщина покриття, мкм.

Тоді товщина покриття

$$x = \frac{1}{M_0} \cdot \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

де σ – кут ковзання.

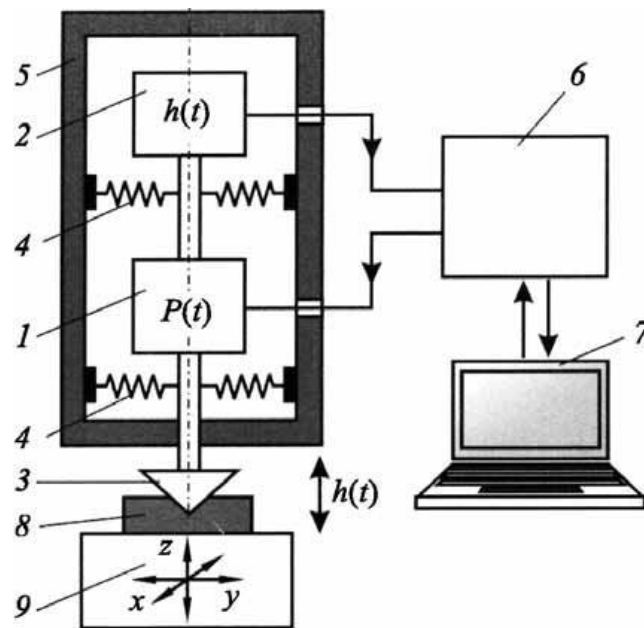
Значення коефіцієнта M_0 визначають експериментально. Похибка визначення товщини покриття $\pm 0,2$ мкм.

В бета-променевих товщиномірах БТП-3, БТП-4 вимірюють за допомогою лічильника Гейгера кількість бета-променів, розсіяних покриттям. Залежність швидкості зворотного бета-розсіювання від товщини покриття визначається математичною функцією. Тому на ЕОМ можна обчислити товщину покриття.

Використовують для контролю товщини також магнітні товщиноміри УТП-1, УТП-5, індукційні ТПО, ТПО-1, вихрові УДП-3 для немагнітних і слабомагнітних матеріалів на немагнітній основі.

Мікротвердість покриттів. Навантаження вибирають виходячи з глибини відбитка: мінімальна товщина шару покриття повинна перевищувати глибину відбитку в 10 разів. Тому для визначення твердості тонких покриттів, а також і нанопокриттів використовують наноіндентування.

На рисунку 4.14 приведена блок-схема наноіндентометра. Наноіндеметри в основному оснащуються алмазним індентором Берковича, заточеним в формі тригранної піраміди.



1 – силовий вузол; 2 – датчик реєстрації переміщення рухомого штока з індентором (3); 4 – пружини підвіски штока; 5 – корпус вимірювальної головки; 6 – блок контролера; 7 – комп'ютер; 8 – зразок; 9 – предметний столик

Рисунок 4.14 – Блок-схема наноіндентометра

Прилад має вузол навантаження 1 і прецизійний датчик 2 для реєстрації переміщення індентора 3 на м'яких пружинах 4, конструктивно об'єднаних в одну вимірювальну головку 5, контролерний блок 6 і комп'ютер 7 з пакетом програм для керування всіма робочими циклами приладу, збору, обробки і зберігання даних. Для вибору місця уколу служить оптичний мікроскоп, а для позиціонування і переміщення зразка 8 - дво- або трьохкоординатний столик 9. У деяких приладах столик моторизований і також керується комп'ютером.

Типова експериментальна крива безперервного індентування, залежність навантаження від глибини втиснення приведена на рисунку 4.15.

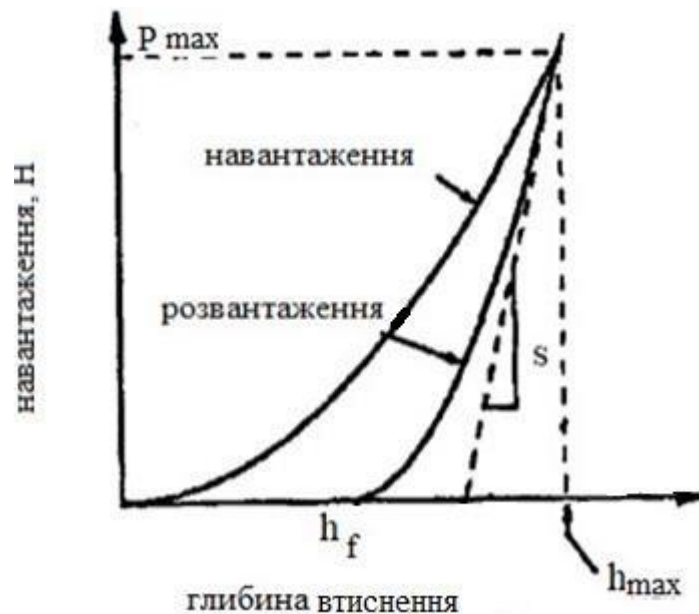


Рисунок 4.15 – Залежність глибини втиснення індентора від навантаження

Верхня крива відповідає навантаженню і відображає опір матеріалу проникненню індентора, а нижня описує повернення деформації після зняття зовнішнього навантаження і характеризує пружні властивості матеріалу.

Так як при звичайному методі вимірювання твердості матеріалу складність пов'язана, в основному, з вимірюванням розміру відбитка, отриманого при малому навантаженні, то при вимірюванні твердості в методі наноіндентування по глибині відбитка основною проблемою є обробка отриманої діаграми проникнення наноіндентора. Складність полягає в тому, що прилад не вимірює глибину відбитка, а переміщення індентора h_{max} , яке є сумою декількох складових – глибини контакту h_c , пружного прогину поверхні зразка на краю контакту h_s (рис.4.16).

Щоб знайти нанотвердість і модуль пружності зразка за результатами діаграми навантаження індентора, необхідно знати глибину контакту h_c , при максимальному навантаженні P . Основна складність пов'язана з визначенням пружного прогину поверхні на краю контакту h_s (рис. 4.16).

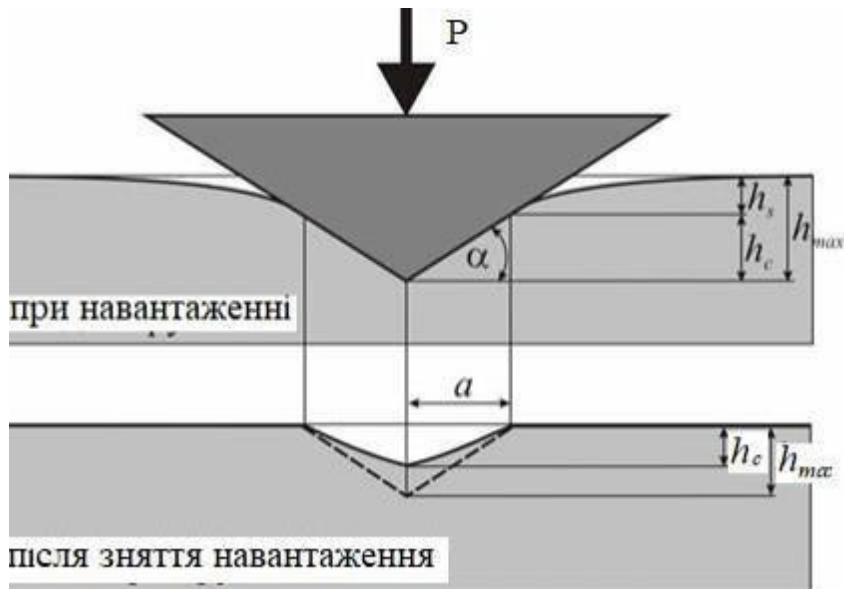


Рисунок 4.16 - Схема перерізу відбитка

Пружний прогин не можна заміряти, його можна визначити за методикою Олівера і Фарра з виразу:

$$h_s = \frac{\varepsilon \cdot P_{max}}{S},$$

де коефіцієнт $\varepsilon = 1$ для випадку плоского штампа; $\varepsilon = 0,75$ для параболоїда обертання і сфери; $\varepsilon = 0,72$ для гострого конуса.

Жорсткість контакту $S = dP / dh$ знаходять по кривій навантаження індентора (рис. 4.15). У методиці Олівера і Фарра для індентора Берковича при знаходженні h_s величина $\varepsilon = 0,75$. Знаючи глибину контакту, можна знайти площу проекції відбитка A . Для ідеально гострого індентора Берковича:

$$A = 24,56 h_s^2.$$

Потім визначається твердість по глибині відбитка при максимальному навантаженні з виразу:

$$H = \frac{P_{max}}{A}.$$

Міцність зчеплення покриття з основою. Деякі способи її визначення передбачають відділення покриття від основи (клейовий та механічний способи), що не можна застосовувати для тонких покриттів (~5 мкм). Тому в таких покриттях міцність зчеплення визначають за характером руйнування покриття навкруги лунки вдавлювання алмазного конуса. Для визначення більш

широкого спектру механічних властивостей використовують наноінтендування [6], яке проводиться на приладах – наноіндентометрах. Прилад складається з силового блоку навантажування та блоку вимірювання переміщень індентора, які з'єднані з комп'ютером, що дозволяє керувати всіма робочими циклами приладу.

Інформацію про властивості покриття (твердість, пружньо-пластичні характеристики) отримують при обробці діаграми навантаження – глибина індентування.

Пористість покриттів визначають потенціостатичним способом, за яким знаходять площу наскрізних пор і дефектів за значенням анодного струму відповідно на безпористій і пористій поверхні.

Механічні характеристики покриття на міцність його зчеплення з основою визначаються на спеціальних зразках. Найбільш поширені два способи: штифтовий та клейовий.

Схему штифтового способу визначення міцності з'єднання покриття з основою зображено на рисунку 4.17.

Оскільки геометричний фактор впливає на значення міцності, то державні стандарти рекомендують застосовувати штифти діаметром 1.5–2 мм, щоб виконувались умови:

$$\frac{\tau_{\text{від}}}{\tau_{\text{зр}}} < \frac{4h}{d_{\text{шт}}},$$

де $\tau_{\text{від}}$ – міцність відриву покриття від основи;

$\tau_{\text{зр}}$ – міцність на зріз по межі покриття основа;

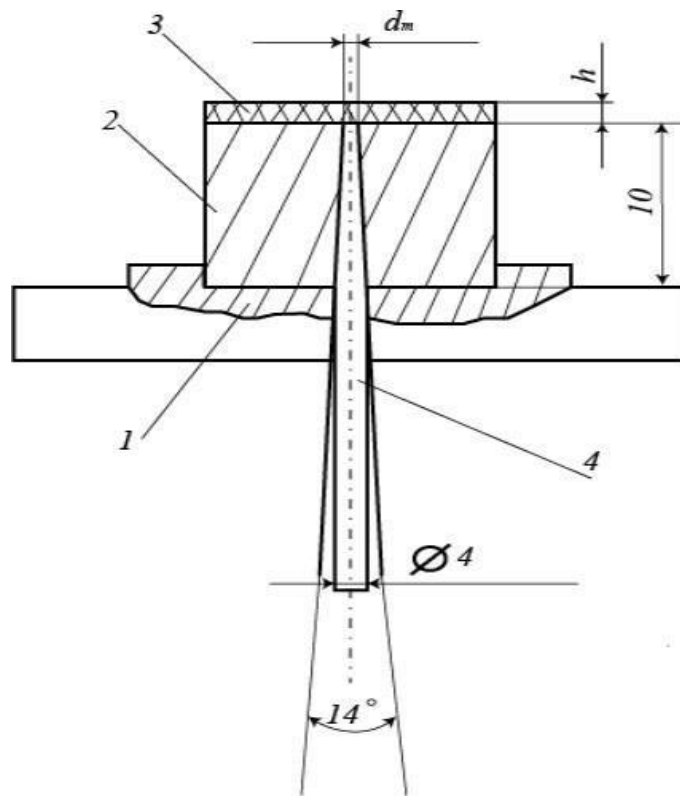
h – товщина покриття;

$d_{\text{шт}}$ – діаметр штифта.

За газотермічного напилювання $\frac{\tau_{\text{від}}}{\tau_{\text{зр}}}$ дорівнює 0,364 – 0,385, тоді

$$\frac{4h}{d_{\text{шт}}} > 0,364 - 0,385.$$

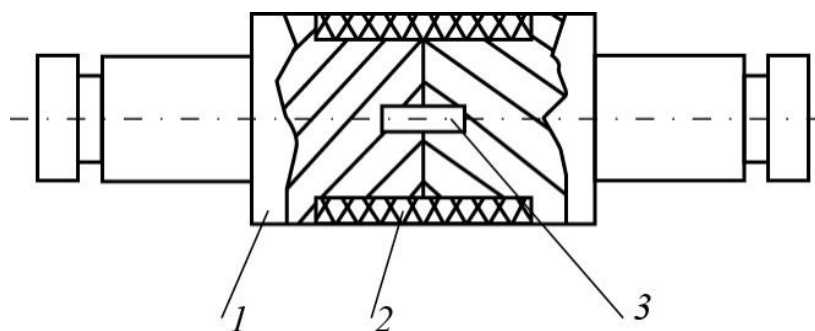
Отже, маючи штифт діаметром 1,5 мм, можна випробовувати на відрив покриття товщиною 0,15 мм і більше.



1 – центрувальний пристрій; 2 – шайба; 3 – покриття; 4 – штифт

Рисунок 4.17 – Схема пристрою для визначення міцності зчеплення покриття з основою

Міцність покриття на розрив визначається за допомогою пристрою схемуюкого зображено рисунку 4.18.



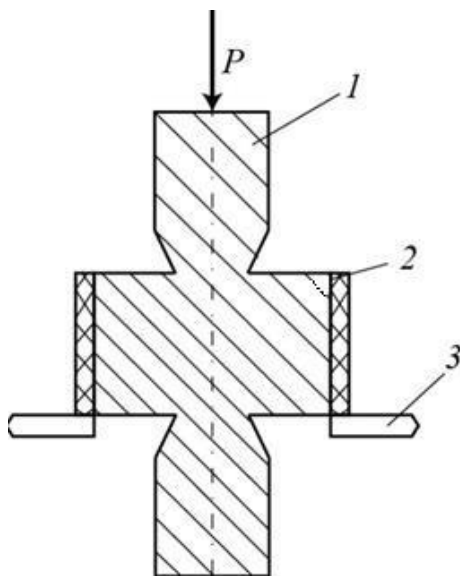
1 – оправка; 2 – покриття; 3 – штифт

Рисунок 4.18 – Схема пристрою для визначення міцності покриття на розрив

Після наплення покриття і надання йому обробкою розміру, відповідного розміру оправки, пристрій установлюють в розривну машину, де визначають

зусилля розриву покриття і міцність на розрив.

Міцність зчеплення покриття з основою на зріз визначають пристроєм, схему якого подано на рисунку 4.19. Розраховують як відношення величин навантаження, за якого зрізається покриття, до площі циліндричної поверхні контакту.



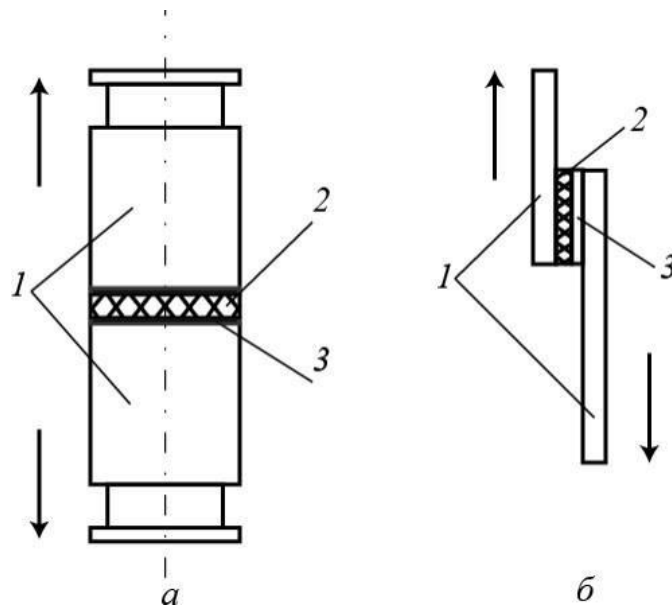
1 – оправка; 2 – покриття; 3 – опорна плита преса

Рисунок 4.19 – Схема пристрою для визначення міцності покриття на зріз

Крім наведених способів визначення характеристик покриттів, існує також клейовий спосіб. Для виконання цього способу потрібні клеї, що дають змогу отримати зусилля склеювання більше, ніж міцність зчеплення покриття з основою. Використовуючи клейовий спосіб, слід дотримуватись двох вимоги:

1. Клей не має просочувати покриття до межі розподілу покриття-основа.
2. Міцність склеювання має бути більшою, ніж міцність зчеплення покриття з основою.

Схеми визначення міцності зчеплення покриття з основою та міцності на зріз клейовим способом показано на рисунку 4.20.



a – міцності зчеплення покриття з основою; *б* – міцності на зріз;

1 – оправка; *2* – покриття; *3* – шар клею

Рисунок 4.20 – Схеми визначення механічних характеристик покриттів
клеєвим способом

Пористість покриття визначають гідростатичним зважуванням, для чого потрібно відділити покриття від основи, або прямим зважуванням спеціального зразка (рис. 4.21).

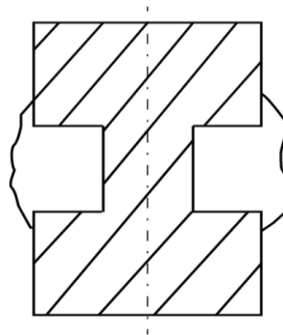


Рисунок 4.21 – Оправка для визначення пористості покриття прямим
зважуванням

Оправку виготовляють з відомим об'ємом канавки, зважують перед напиленням, напилюють покриття, шліфують його до розміру оправки і зважують.

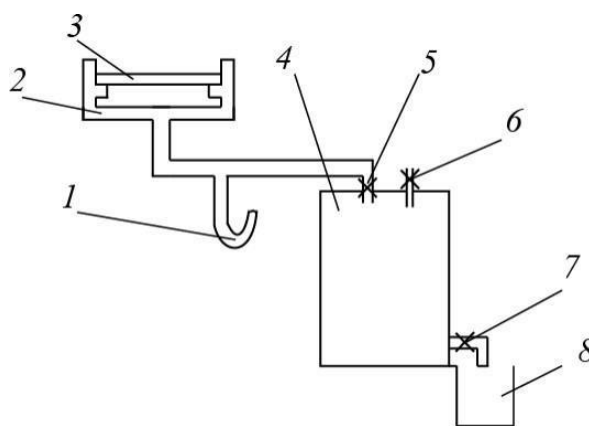
Знаходять вагу покриття і за відомою формулою обчислюють пористість

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho}{\alpha_k V}\right) \cdot 100,$$

де P і V – вага і об'єм покриття відповідно;

α_k – питома вага напилюваного матеріалу в компактному вигляді.

Газопроникність покриттів q л/хв · см², визначають на спеціальних пристроях за кількістю газу, що протікає через покриття (рис. 4.22).



1 – манометр; 2 – держак; 3 – покриття; 4 – бак;

5-7 – вентиля; 8 – мірна склянка

Рисунок 4.22 – Схема пристрою для визначення газопроникності покриттів

Працює цей пристрій так. Покриття, відділене від основи, закріплюють в держак 2, бак наповнюється водою через вентиль 6. Потім відкривають вентиля 5 і 7. Вода, витікаючи з баку, зтягує повітря через покриття. Коли тиск в манометрі стане постійним, починають збирати воду в склянку 8 і вести відлік часу. Газопроникність визначають за формулою:

$$q = \frac{V}{S\tau},$$

де V – об'єм води (повітря) за час τ ;

S – ефективна площа покриття, см².

Крім зазначених способів визначення властивостей покриттів існують і інші, наприклад, японські стандарти передбачають визначення міцності зчеплення покриттів з основою подряпинами. Два спеціальних різці,

розташованих перпендикулярно до основи, наносять дві паралельні подряпини так, щоб прорізати покриття. Міцність характеризується відстанню між цими канавками, за якої покриття відділятиметься від основи.

Якісно оцінити міцності зчеплення можна за допомогою преса Гагаріна.

Механічна обробка газотермічних покриттів виконують для надання виробам потрібних розмірів і чистоти поверхні. Основними видами обробки напилених покриттів є різання, шліфування та полірування. Обробку проводять з мінімальним зняттям шару покриття за один прохід.

Швидкість різання обирають експериментально для кожного виду покриття, і вона становить 15–100 м/хв при подачі 0,05–0,15 мм/об. Під час шліфування покриття слід охолоджувати, якщо це погіршить властивості покриття через проникнення в пори охолоджувальної рідини.

Щоб запобігти утворенню тріщин і викиду частинок покриття, треба правильно обирати круги та режим шліфування. Так, круги мають бути з грубою структурою і слабкою зв'язкою абразиву (це так звані м'які абразивні круги). Із підвищенням міцності та твердості покриттів використовують більш тверді абразивні круги, і навіть алмазні. Швидкість шліфувальних кругів обирають в інтервалі 15–40 м/с при глибині 0,15–0,03 мм.

4.4 Властивості покриттів

На властивості покриттів впливають багато факторів, які можна розділити на дві групи: термічні і фізико-хімічні. Класифікацію цих способів подано на рисунку 4.23. Вона умовна, оскільки всі процеси, які відбуваються під час напилення, досить тісно пов'язані.

Підвищення ентальпії частинок збільшує контактну температуру і тривалість кристалізації частинок, що підвищує міцність покриття завдяки збільшенню тривалості хімічної взаємодії частинки і основи. Підвищити ентальпію можна підвищенням температури поверхні та перегріванням частинок вище $T_{пл}$. Крім того, можна використовувати термореагуючі порошки,

у яких реакція утворення інтерметалідів перебігає з виділенням тепла.

Температури поверхні напилення підвищують різними способами. Можна використовувати додаткові джерела енергії або теплові джерела установок напилення (газове полум'я або плазмовий потік). Для нагрівання застосовують теплове джерело без подачі розпилювальних матеріалів і лише після досягнення на поверхні потрібної температури починають вводити напилювані матеріали в теплове джерело.

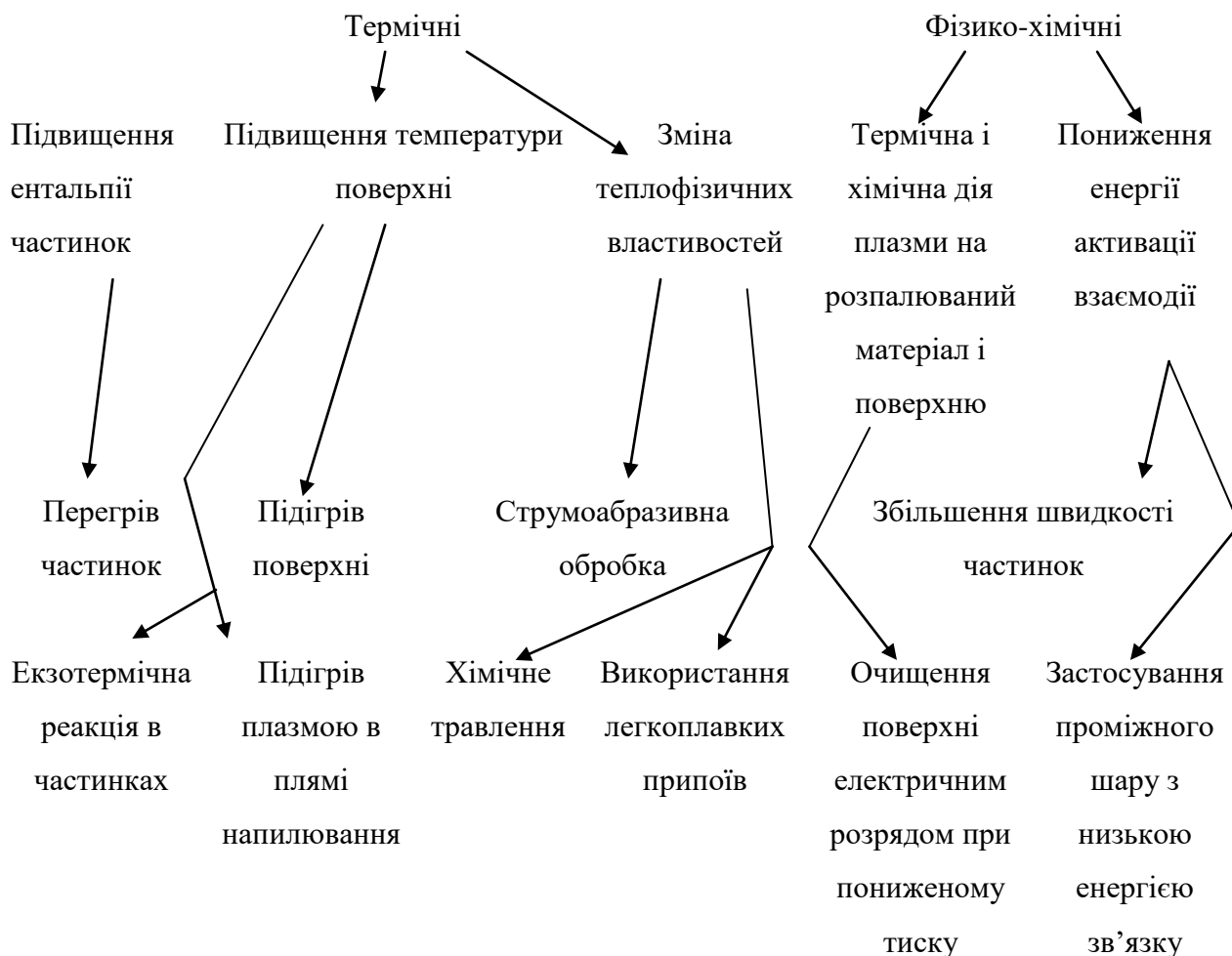


Рисунок 4.23 – Класифікація факторів, що впливають на властивості покриттів

Зміна теплофізичних властивостей поверхні зумовлює її активацію та очищення від домішок, що підвищує міцність зчеплення покриття з основою.

Струминно-абразивна обробка очищує поверхню і виводить її зі стану термодинамічної рівноваги, звільняє міжатомні зв'язки поверхневих атомів.

Хімічне травлення потребує застосування та розроблення спеціальних

протравлювачів, які не пасивують поверхню, а навпаки, активують її в наслідок утворення дислокаційних дефектів направленим травленням.

Термічна і хімічна дія плазми на розпилюваний матеріал і поверхню активує поверхню напилення за рахунок утворення дефектів (дислокації, вакансії, підплавлених мікроточок) й очищує поверхню від різного виду бруду, адсорбованих молекул газу тощо.

Для підвищення хімічної активності основи із оксидів їх легують оксидами з низькою енергією зв'язку, такими як ВаО, СаО. Ці оксиди імпантують у поверхню іонним легуванням. Оксиди з низькою енергією зв'язку знижують енергією активації процесу взаємодії напилюваних частинок з поверхнею основи.

Із наведених прикладів видно, як термічні та фізико-хімічні фактори напилення впливають на властивості покриттів.

Розглянемо властивості покриттів і їх залежність від різних факторів.

Напруга в покриттях суттєво впливає на всі механічні властивості. У разі напилення покриттів на основу малої товщини залишкова напруга може призвести до її деформації, а якщо основа жорстка, у покритті можуть виникнути тріщини або відділення покриття від основи. Залежність напруги в покриттях від товщини і способів напилення показана на рисунку 4.24.

Із цих залежностей випливає, що чим більша теплова потужність джерела напилення, тим більша напруга виникає в покритті. А в молібденових покриттях за малих товщин виникає напруга розтягування, яка зменшується із збільшенням товщини, досягає нуля і потім переходить в напругу стиснення. Для зменшення напруги в покриттях потрібно виконувати такі правила:

1. Вибирати матеріал покриття й основи з близькими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення.
2. Регулювати термічний вплив напилюваного потоку на основу, аби вона не перегрівалася (змінною теплової потужності потоку, дистанції напилення, швидкості переміщення розпилювача).
3. Знижувати модуль пружності покриття, наприклад, введенням до його

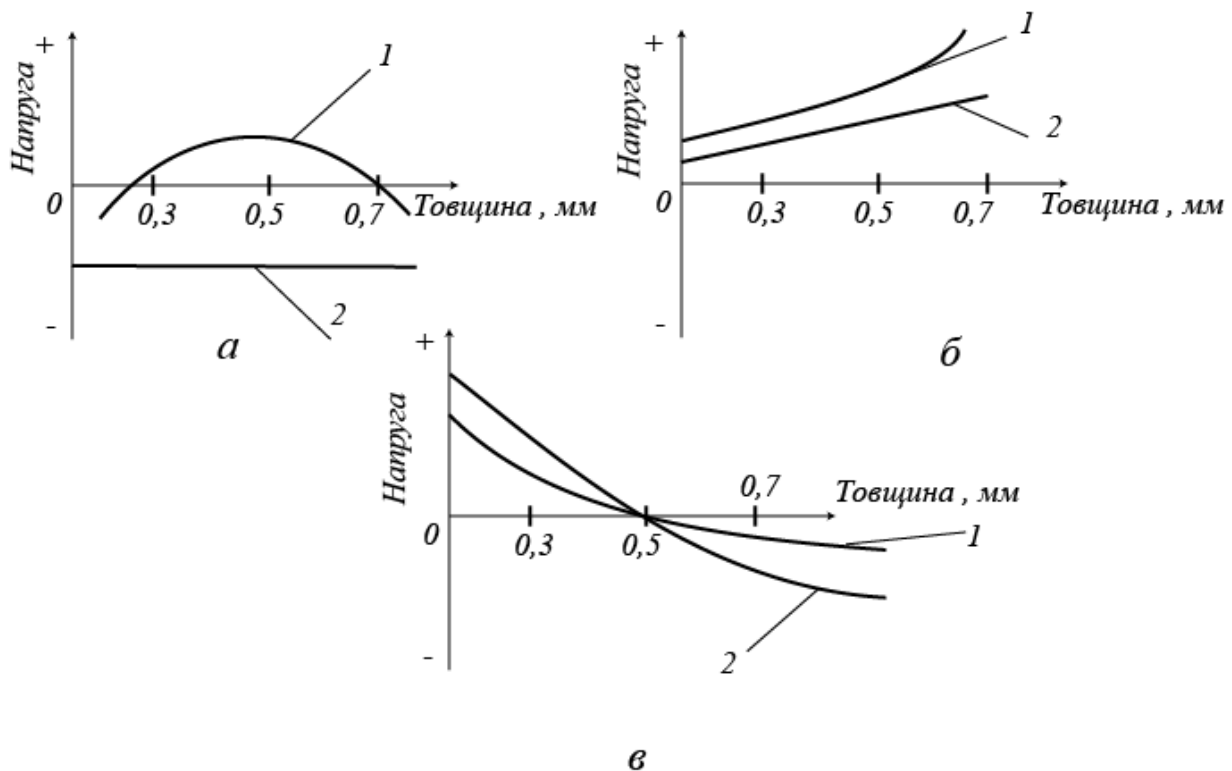
складу пластичних матеріалів.

4. Використовувати перехідні шари між покриттям і основою для компенсації різниці в к. т. р. покриття й основи.

5. Вибирати оптимальну товщину покриття, а також застосовувати багат шарові і градієнтні покриття.

6. Застосовувати покриття, армовані неперервними та дискретними волокнами і дротами.

7. Надавати поверхні форм, що знижують напругу, наприклад, заокруглювати гострі кути.



а – оксид молібдену; б – нікелевий сплав; в – молібден; 1 – плазмове напилювання; 2 – газополуменеве ($C_2H_2+O_2$)

Рисунок 4.24 – Залежність напруги в покриттях від матеріалів напилення, товщини і способу напилювання

Пористість покриттів залежить від теплової потужності джерела розпилення та дистанції напилення. За малої дистанції напилення може статися

перегрівання і деформація поверхні. Крім того, можуть виникнути труднощі з отриманням рівної поверхні напилення. Найменша пористість досягається детонаційним напиленням (0,5 % при напиленні WC-Co) і електродуговою металізацією; плазмове напилення дозволяє отримати покриття з малою пористістю (1–2 % для матеріалів з температурою плавлення до 2000 °C і 5–10% для більш тугоплавких). Газополуменеві способи напилення дозволяють отримувати пористість у покриттях 5–10 % в залежно від температури плавлення напилюваних матеріалів. Крім того, пористість покриттів, нанесених з матеріалу у вигляді дроту, завжди менша, ніж у покриттів, нанесених з матеріалів у вигляді порошків.

Твердість покриттів залежить від напилюваних матеріалів, способу і режиму напилення. Твердість частинок, що утворюють покриття, завжди вища за твердість вихідних матеріалів. Це пов'язано з деформацією частинок, а також з утворенням оксидів, нітридів та інших сполук залежно від середовища напилення. У разі напилення вакуумно-конденсаційних покриттів їх твердість, а також механічні властивості залежать від температури основи. Якщо температура поверхні менше $0,3T_{пл}$ напилюваного матеріалу, то покриття має високу твердість і низьку міцність, якщо більше $0,5T_{пл}$ – усі властивості покриття відповідають властивостям напилюваних матеріалів у литому стані після рекристалізації.

4.5 Вибір типу покриття, його складу, товщини і способу напилення

Усі покриття можна розділити за такими групами: захисні, конструкційні, технологічні та декоративні.

Найбільш поширеними є захисні покриття: зносостійкі, корозієстійкі, жаростійкі, теплозахисні, електроізоляційні та ін. Конструкційні покриття виконують роль конструктивного елемента у виробках (тонкоплівкові шари у мікроелектроніці і радіоелектроніці). Виготовляючи газотурбінних двигуни, на статор компресора і корпус турбіни напилюють конструкційні елементи у

вигляді шарів, які самі притираються до потрібних розмірів з мінімальними проміжками між корпусом і статором турбіни. За допомогою конструкційних покриттів можна отримувати конструкційні елементи прес-форми (пуансони, обойми та ін.), а також втулки, гвинтові гайки тощо.

Технологічні напилювані покриття використовують для спрощення різних технологічних процесів, наприклад, зварювання або паяння матеріалів, які погано зварюються або паяються між собою. У таких випадках на деталі наносять покриття з матеріалів, які добре зчеплюються з деталями і можуть зварюватися або паятися.

Декоративні покриття застосовують для надання деталям з різних матеріалів (метал, дерево, пластмаси, кераміка) товарного вигляду. Декоративне покриття може мати різний колір – білий, золотистий, чорний тощо.

Застосовують також і спеціальні покриття для захисту від сонячних променів, інфрачервоного випромінювання, як фільтри частот, поглиначі радіохвиль, а також як накопичувачі даних на плівках, дисках та головках запису.

Вибір типу покриття визначається умовами його експлуатації. Так вибираючи зносостійкі покриття треба враховувати характер пар тертя. В усіх випадках слід вибирати матеріали з мінімальним коефіцієнтом тертя. Високу стійкість до спрацювання мають покриття, до складу яких входять тверді частинки і пластична зв'язка. Покриття повинні мати високу адгезійну та когезійну міцність.

Вимоги до пористості не однозначні. Так, якщо покриття працює на стирання в умовах змащення, то допускається пористість до 15 %. У разі спрацювання вириванням потрібна велика міцність покриття, тому пористість має бути мінімальною.

Корозієстійкі та жаростійкі покриття обирають з урахуванням мінімальної взаємодії з агресивним середовищем. Покриття повинні мати мінімальну пористість, особливо відкрити. Для жаростійких покриттів додаткова вимога – висока теплостійкість (мають витримувати багаторазове нагрівання й

охолодження).

Теплозахистні покриття напилують з матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності та високою теплостійкістю. Пористість таких покриттів підвищує їх ефективність.

Вибір складу покриття та його товщини. Вибираючи склад покриття, треба поряд з експлуатаційними вимогами враховувати сумісність матеріалів напилення і матеріалу деталі. Сумісність матеріалів має забезпечити можливість адгезійної взаємодії матеріалів покриття з основою і неможливість перебігу фізико-хімічних процесів, які б призводили до порушення стабільності складу матеріалів, утворення фаз з низькою міцністю, гальванічних пар, нових фаз зі зміною об'єму тощо.

Для напилення використовують різні матеріали з п'яти груп: метали, металеві сплави, металіди, композиційні матеріали, оксиди. У разі переходу від металів до композиційних матеріалів підвищуються зносостійкість, корозієстійкість, жаростійкість та інші властивості. Для теплозахистних покриттів використовують оксиди або композиційні матеріали до складу яких входять оксиди. Отже, склад покриття визначається потрібним терміном експлуатації деталі з покриттям у заданих умовах.

Товщину покриття визначають виходячи з умов експлуатації напилюваних деталей, перед усім спрацьовування. При цьому слід враховувати, що збільшення товщини покриття призводить до збільшення дефектів у покритті, напруги, що зменшує адгезійну міцність покриття. Тому у всіх випадках, вибираючи товщину покриття, варто обирати мінімально можливе її значення. Також потрібно враховувати допуск на механічну обробку, якщо таку передбачено.

Для підвищення міцності зчеплення покриття з основою використовують проміжні шари. Вимоги, що висуваються до проміжних шарів, наведено у розділі 2. Найпоширеніші матеріали для напилення проміжних шарів – термореагуючі порошки Al-Ni, порошки Mo, Ni. Товщина шарів сягає 0,1 – 0,2 мм.

Проміжні шари застосовують і за вакуумно-конденсаційного напилення. Наприклад, наносячи нітрид титану на інструментальні сталі, перший шар

напилюють титаном (товщина 0,1–0,2 мкм), а потім наносять нітрид титану до 16 мкм.

Вибір способу напилення покриття визначається якістю покриття та його товщиною. Високу якість покриття можна отримати вакуумно-конденсаційним напиленням. Особливо за тих способів, за яких паровий потік має високу густину. Серед газотермічних способів напилення високу якість покриття забезпечують детонаційно-газове та плазмове напилення в середовищі з контрольованою атмосферою.

За газотермічних способів напилення виникають труднощі в напиленні термічно не стабільних сполук. Вони дисоціюють або сублимують. Крім того, за газотермічного напилення може відбуватись вибірне випаровування деяких елементів, особливо з високою пружністю пари, окиснення активних елементів киснем за умови напилення у відкритій атмосфері.

Товщина покриття також впливає на вибір способу напилення. Тонкі покриття (0,5–15 мкм) можна напилити лише вакуумно-конденсаційними способами напилення. За газотермічного напилення мінімальна товщина покриття близька до розмірів напилюваних частинок (10–200 мкм).

Слід урахувати продуктивність способів напилення. Газотермічні способи напилення мають високу продуктивність (до 20 кг/год) порівняно з вакуумно-конденсаційними (швидкість збільшення товщини покриття 0,1–0,3 мкм/хв).

І останнє, на що треба зважати, вибираючи спосіб напилення, – економічні показники: енергоємність, коефіцієнт використання матеріалу тощо.

Контрольні питання до розділу 4:

1. Основні параметри напилення.
2. Параметри плазмового напилення.
3. Параметри вакуумно-конденсаційного напилення.
4. Узагальнена схема напилення.
5. Підготовка поверхні за газотермічного напилення.

6. Підготовка поверхні за вакуумно-конденсаційного напилення.
7. Особливості напилювання різних матеріалів.
8. Додаткова обробка покриттів.
9. Контроль якості покриттів.
10. Фактори що впливають на властивості покриттів.
11. Вибір типу покриття, його складу, товщини і способу напилення.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.М. Дубовий, А.М. Степанчук Технологія напилювання покриттів: Підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.
2. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Ющенко. – Київ : Арістей, 2005. – 204 с.
3. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Ардатовская. – Київ : Наук. думка, 1987. – 544 с.
4. Дубовий О.М. Математична модель плазмового струменя та її практичне застосування для визначення режимів плазмової обробки металів / О.М. Дубовий, Т.А. Янковець // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2004. – № 6 (399). – С. 43–50.
5. Азаренко Н.А., Береснев В.А., Погребняк А.Д. Структура и свойства защитных покрытий и модифицированных слоев материалов. – Харьков : ХНУ им. Каразина, 2007. – 576 с.
6. Дуб С.Н., Новиков Н.В., Испытания твердых тел на нанотвердость // Сверхтвердые материалы, 2004. – №6. – с. 6-31.
7. ГОСТ 9.909-86. ЕСЗКС. Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях // Межгосударственные стандарты: указатель. – Львов : Леонорм, 2003. – 268 с.
8. ДСТУ 2491-94. Покриття металеві та неметалеві. Терміни та визначення // Стандарти України: покажчик. – Київ : Держстандарт України, 2003. – 178 с.
9. ГОСТ 9.008-82. ЕСЗКС. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения // Межгосударственные стандарты: указатель. – Львов : Леонорм, 2003. – 268 с.
10. ГОСТ 9.305-84. ЕСЗКС. Покрытия металлические и неметаллические

неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий // Межгосударственные стандарты: указатель. – Львов : Леонорм, 2003. – 268 с.

11. ГОСТ 27953-88. Покрытия детонационные. Общие требования // Межгосударственные стандарты: указатель. – Львов : Леонорм, 2003. – 268 с.

12. ГОСТ 28076-89. Газотермическое напыление. Термины и определения // Межгосударственные стандарты: указатель. – Львов : Леонорм, 2003. – 268 с.

13. ГОСТ 30431-96. Покрытия газотермические износостойкие. Триботехнические методы испытаний // Межгосударственные стандарты: указатель. – Львов : Леонорм, 2003. – 268 с.

ДОДАТКИ

Додаток А – Установки електродугової металізації

Назва установки	Характеристика
Установка 300-А ANTICOR (Виробник – Німеччина)	Призначена для електродугового напилювання металу (цинк, алюміній та ін.) на металеву поверхню для захисту від корозії
Апаратура надзвукової електродугової металізації ПЛАЗЕР – СМ1 (Виробник – Україна)	Напруга мережі 3х380 В Робоча напруга 35-45 В Робочий струм 150-400 А Витрати газу 30-40 м ³ /год Продуктивність напилювання: сталевим дротом 8-20 кг/год Діаметр дроту 1,2-2,2 мм
Комплект електродугової металізації ТСЗП-LD/U2 300	Напруга мережі 3х380 В Робоча напруга 18-42 В Робочий струм: 300 А (max) Витрати повітря при тиску 4 Бар: 110 м ³ /год Вага комплекту: 224 кг Вага металізатора: 2,6 кг Продуктивність при напилення цинку: 30 кг/год Діаметр дроту 1,6/ 2,0/2,5 мм
Комплект обладнання електродугової металізації ТСЗП SPARK 400	Напруга мережі 3х380 Робоча напруга 18-42 В Робочий струм: 400 А (max) Продуктивність при напилюванні: цинку – 32 кг/год алюмінію – 9 кг/год сталі – 16 кг/год міді – 11 кг/год Діаметр дроту 1,6/2,2 мм

Додаток Б – Установки плазмового напилювання

Назва установки	Характеристика
ПЛАЗЕР40 (виробник – Україна)	<p>Потужність 40 кВт</p> <p>Плазма твірний газ: повітря + метан</p> <p>Напруга мережі (х.х.) 3х380 В (180 В)</p> <p>Робоча напруга 140-180 В</p> <p>Робочий струм 100-250 А</p> <p>Витрати газу 3-10 м³/год</p> <p>К.к.д. плазмотрона 90 %</p> <p>Продуктивність напилювання: метал 10 кг/год</p>
ПЛАЗЕР80 (виробник – Україна)	<p>Потужність 80 кВт</p> <p>Плазма плазмотвірний газ: повітря + метан (пропан-бутан)</p> <p>Напруга мережі (х.х.) 3х380 В (300 В)</p> <p>Робоча напруга 200-270 В</p> <p>Робочий струм 100-300 А</p> <p>К.к.д. плазмотрона 70 %</p> <p>Продуктивність напилювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> – метали 25 кг/год – кераміка (Al₂O₃) 10 кг/год
ПЛАЗЕР-180 (виробник – Україна)	<p>Потужність 180 кВт</p> <p>Плазма плазмотвірний газ: повітря: + метан</p> <p>Напруга мережі (х.х.) 3х380 (500) В</p> <p>Робоча напруга 250-450 В</p> <p>Робочий струм 200-400 А</p> <p>Витрати газу 10-30 м³/год</p> <p>К.к.д. плазмотрона 70 %</p> <p>Продуктивність напилювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> – метали 50 кг/год – кераміка (Al₂O₃) 15 кг/год

Продовження Додатку Б

Комплекс для нанесення плазмового покриття ТСЗП - MF – P-1000.	Витрати плазмотвірних газів,	
	л/хв: аргон	до 100
	азот	до 100
	водень	до 50
	гелій	до 20
	Витрати транспортуючого газу (аргон, азот), л/хв	до 30
	Продуктивність, кг/год:	
	при напиленні оксидів і карбідів	3...10
	при напиленні металів і сплавів	2...5
	Пористість покриттів, %	12
	Адгезія, МПа	більше 50
	Товщина напиленого шару, мм:	
	– при напилюванні металів і сплавів	0,05...20
– при напилюванні кераміки	0,05...5	

Додаток В – Установки газополуменевого напилювання

Назва установки	Характеристика	
Установка газополуменевого напилювання ТСЗП- MDP-115 Розпилювач і система керування	Продуктивність при напиленні, кг/год:	
	кольорових сплавів	5...15
	молібдена	3...4
	сталі і сплавів	3...9
	Адгезія покриття, МПа	15...50
	Пористість покриття, %	7...20
	Товщина покриття, мм	0,5...15
	Витрати, л/хв:	
	– кисень	50
	– ацетилен або пропан	20
Тиск стисненого повітря, МПа	0,5...0,55	

Додаток Г – Обладнання для вакуумно-конденсаційного напилювання

Назва установки	Характеристика
Установка VTT-700-REZ (виробник – Республіка Білорусь)	Призначена для напилювання в вакуумі магнетронним способом резистивних (PC3710, PC5406) і металевих (Cr, Ta тощо) наноплівкових шарів на підкладки розміром 60x48x1 і 60x48x0,5 мм
Установка VTT-1200 (виробник – Республіка Білорусь)	Призначена для нанесення декоративних покриттів на вироби з пластмаси при великій продуктивності. Установка дозволяє наносити покриття золотистого (під золото), сріблястого (під нікель, хром) кольорів та інших кольорових відтінків залежно від режимів напилювання та матеріалів, які розпилюють
Установка VTT 900 DUO (виробник – Республіка Білорусь)	Призначена для нанесення захисних та декоративних покриттів методом магнетронного та електродугового розпилення тугоплавких матеріалів (Ti, Mo, Zr тощо)
Установка VTT УВПМ (виробник – Республіка Білорусь)	Призначена для нанесення в вакуумі покриттів з різних матеріалів на порошкові матеріали, наприклад, графіт, з попереднім нагрівом та іонною очисткою
Вакуумний універсальний пост ВН-2000 (виробник – Україна)	Призначена для нанесення плівок в вакуумі з електропровідних, напівпровідних та діелектричних матеріалів методом магнетронного, резистивного і електронно-променевого розпилення, а також для травлення матеріалів в плазмі (в залежності від комплектації поставки)
Вакуумний напилювальний пост ВН-2000-08 (виробник – Україна)	Призначена для нанесення плівок в вакуумі з електропровідних, напівпровідних та діелектричних матеріалів

Продовження Додатку Г, аркуш 1

Вакуумний напилювальний пост ВН-3000 (виробник – Україна)	Призначена для дослідження механізмів по розпиленню металів, напівпровідників та діелектриків за допомогою магнетронів DC або RF
VNUK-6	Призначена для нанесення металевих, діелектричних і нанокompозитних покриттів на напівпровідникові та діелектричні підкладки
VNUK-5	Призначена для нанесення покриттів (декоративних, захисних) на рулонні матеріали, наприклад, полімерні плівки
VNUK-4	Призначена для нанесення функціональних покриттів, в тому числі багат шарових, нанокompозитних, тощо на об'ємні деталі
VNUK-3	Призначена для нанесення функціональних покриттів на плоскі підкладки великих розмірів, наприклад, віконне скло
Комплекс вакуумного напилення KBH-ШПЭ-1.5-002	Призначений для нанесення на зовнішню поверхню деталей машин, штампову оснастку, інструмент моно- і багат шарових покриттів різного призначення (жаро-, зносо-, ерозійно- стійких, декоративних, тощо) з вуглецю, багатокompонентних немагнітних сплавів любого легування, чистих металів, нітридів, карбідів, оксидів, і оксикабонітридів металів
Установка вакуумного напилення УВН-71П-3М	Призначена для резистивного напилення на керамічні підкладки плівкових елементів і схем.

Продовження Додатку Г, аркуш 2

<p>Установка ВАТТ-1600М</p>	<p>Призначена для нанесення захисно- декоративних та зміцнюючих покриттів. Установка дозволяє проводити двостороннє напилення покриттів на вироби складної форми довжиною до 1500 мм, шириною до 350 мм</p>
<p>Установки Веролме типу VSB-2 (виробник – Нідерланди)</p>	<p>Призначена для металізації в високомувакуумі текстилю, паперу, полівінілхлориду</p>
<p>Установки типу ESHW2 (виробник – Японія)</p>	<p>Призначена для металізації пластмасовихплівок, паперу, а також для виробництва металізованих ниток та пакувальних матеріалів</p>