

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



О.Д. РОЖКОВ

ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Частина I

Дніпропетровськ НМетАУ 2008

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

О.Д. РОЖКОВ

**ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ
ПОКРИТТІВ**

Частина I

Затверджено на засіданні Вченої ради академії
як навчальний посібник

Дніпропетровськ НМетАУ 2008

Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина І: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 51 с.

З пропозиції сучасних наукових поглядів викладені актуальні і перспективні технології підготовки поверхні, газотермічного напилення покриттів та їх фінішної обробки

Призначений для студентів спеціальності 7.090103 – композиційні та порошкові матеріали, покриття, а також може бути корисним студентам інших спеціальностей, які навчаються за напрямом 0901 - інженерне матеріалознавство.

Лл. 29. Табл.7.

Відповідальна за випуск С.Й. Пінчук, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: Є.О. Кириченко, д-р техн. наук, проф. (НГАУ)
О.М. Гришин, канд. техн. наук, доц. (НМетАУ)

© Національна металургійна
академія України, 2008
© Рожков О.Д., 2008

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ДО НАПИЛЕННЯ.....	5
1.1 Класифікація забруднень.....	5
1.2 Основні цілі підготовки поверхні до напилення.....	6
1.3 Технологічні процеси підготовки поверхні до напилення.....	6
1.3.1 Знежирення.....	6
1.3.2 Абразивно-струминна підготовка поверхні.....	7
1.3.3 Механічні методи підготовки поверхні.....	9
1.3.3.1 Насікання зубилом.....	9
1.3.3.2 Накатування.....	9
1.3.3.3 Нарізання «рваної» різи.....	9
1.3.3.4 Нарізання «рваної» різи з накочуванням вершин.....	10
1.3.4 Електричні методи підготовки поверхні.....	10
1.3.4.1 Електроіскрова підготовка поверхні.....	10
1.3.4.2 Обробка тліючим розрядом.....	10
1.3.4.3 Електрополіровка.....	11
1.3.5 Хімічна підготовка поверхні.....	11
1.4 Вплив методу підготовки поверхні на адгезійну міцність покриттів.....	11
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ГТН.....	11
2.1 Узагальнена схема процесу ГТН.....	11
2.2 Класифікація процесів ГТН.....	12
2.3 Способи і технологічні особливості плазмового напилення покриттів.....	13
2.3.1 Плазмовий струмінь як джерело нагріву і розпилення матеріалу.....	13
2.3.2 Класифікації способів плазмового напилення.....	15
2.3.3 Плазмоутворюючі гази.....	15
2.3.4 Способи плазмового напилення.....	17
2.3.5 Вплив параметрів плазмового напилення на ефективність процесу.....	20

2.3.6 Основні переваги і недоліки плазмового напилення покриттів.....	32
2.4 Способи і технологічні особливості газополуменевого напилення (ГПН).....	33
2.4.1 Газове полум'я як джерело нагріву і розпилення матеріалу.....	33
2.4.2 Класифікації способів ГПН.....	35
2.4.3 Параметри процесу ГПН і їх вплив на ефективність процесу напилення.....	35
2.4.4 Основні переваги і недоліки газополуменевого напилення.....	37
2.5 Способи і технологічні особливості детонаційно-газового напилення покриттів (ДГН).....	37
2.5.1 Детонаційно-газовий вибух і продукти його розпаду - джерело нагріву і прискорення частинок, що напилюються.....	37
2.5.2 Особливості процесу ДГН.....	38
2.5.3 Класифікації способів ДГН.....	39
2.5.4 Параметри процесу ДГН і їх вплив на ефективність напилення.....	40
2.5.5 Основні переваги і недоліки ДГН.....	42
2.6 Способи і технологічні особливості електродугової металізації (ЕДМ).....	43
2.6.1 Електрична дуга як джерело нагріву матеріалу, що розпилюється.....	43
2.6.2 Класифікація способів ЕДМ.....	45
2.6.3 Параметри ЕДМ і їх вплив на ефективність процесу.....	45
2.6.4 Основні переваги і недоліки ЕДМ, галузі застосування.....	50

ВСТУП

Нанесення покриттів газотермічними і вакуумними методами дозволяє виготовляти вироби з широким діапазоном властивостей поверхні. Це дає змогу різко скоротити витрати металів за рахунок підвищення надійності і терміну експлуатації деталей машин, устаткування і споруд, виготовляти їх з рядових марок сталей і сплавів, а необхідні властивості робочих поверхонь забезпечувати сформованими на них шарами. Важливим є використання покриттів для відновлення розмірів зношених деталей.

У навчальному посібнику розглянуті особливості методів і способів газотермічного і вакуумного нанесення покриттів, вплив їх технологічних параметрів на ефективність процесу і основи технологій напилення; методи підготовки поверхні до напилення, фінішної обробки покриттів і діагностики їх якості.

1 ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ДО НАПИЛЕННЯ

Підготовка поверхні до напилення є однією з основних технологічних операцій нанесення покриттів. Від якості її проведення багато в чому залежить адгезійна міцність напиленого шару та ряд інших його властивостей.

Поверхня деталі, що поступає на напилення, покрита різними забрудненнями. Вона не активна. Вільні валентності поверхневих атомів насичені хімічними зв'язками забруднень.

1.1 Класифікація забруднень

1. Фізичні або механічні забруднення. Вони вступають з поверхнею в слабкі адгезійні взаємодії. До них відносяться: пил, ворса, абразивні частинки та ін.
2. Органічні забруднення. Вони присутні у вигляді товстих і тонких плівок. До них відносяться: мастила, оливи, віск тощо.
3. Розчинні у воді. Це: солі, кислоти, луги.
4. Хімічно пов'язані з поверхнею. До них відносяться: оксиди, гідрооксиди тощо.
5. Газоподібні забруднення, адсорбовані поверхнею.

Найбільшу небезпеку при напиленні представляють органічні забруднення. Звичайний їх вміст на поверхні знаходиться в межах 1-5 г/м². Суттєвий вплив виявляється вже при вмісті 1 г/м².

Менший негативний вплив на адгезійну міцність покриттів надають хімічно пов'язані з поверхнею забруднення. Стійкі оксидні плівки товщиною менше 0,5мкм не надають суттєвого впливу на контактну температуру. Їх наявність виявляється при товщині 10-15 нм. Менший вплив спостерігається за присутності на поверхні деталі легкосублімованих оксидних плівок. У контакті з розплавленими напиленими частинами вони руйнуються, сприяючи утворенню міцних зв'язків. Це відноситься до таких металів, як вольфрам, молібден і ін.

1.2 Основні цілі підготовки поверхні до напилення

1. Видалення забруднень.
2. Створення відповідної мікрогеометрії поверхні, що напилюється.
3. Активація поверхні, що напилюється.

При розробці технології підготовки поверхні до напилення необхідно прагнути того, щоб в одному технологічному процесі були досягнуті всі ці цілі або максимальна їх кількість.

1.3 Технологічні процеси підготовки поверхні до напилення

1.3.1 Знежирення

Проводиться для видалення з поверхні виробу всіх видів жирових забруднень. Завдяки попередній і подальшим промивкам видаляється більшість забруднень, не пов'язаних з поверхнею.

Якщо на напилення поступає велика кількість відносно невеликих деталей, то доцільно знежирення проводити у ваннах. Склад миючого розчину, що рекомендується: 35-40 г/л три натрій фосфату;
40-45 г/л кальцинованої соди.

Температура ванни 75-85°C, тривалість знежирення - 20-25 хв. Потім - промивка в гарячій і холодній воді та сушка стислим підігрітим повітрям.

Коли покриття наносяться на ділянки поверхні крупногабаритних виробів, доцільно застосовувати місцеве знежирення протиранням дрантям, змоченим ацетоном, чотирихлористим вуглецем, бензином, уайт-спіритом і іншими активними розчинниками.

Якщо на напилення поступають сильно замастилені деталі і можливий їх нагрів до температури 700-800°C, їх поміщають в печі і прожарюють на повітрі при цих температурах до повного вигорання органічних забруднень.

1.3.2 Абразивно-струминна підготовка поверхні

Проводиться шляхом обдування поверхні виробу струменем абразивного матеріалу. Для розгону частинок використовується стисле повітря. Для створення подібних струменів служать пістолети інжекторного або напірного типу.

Як абразивні матеріали використовують: ДЧК - дріб чавунний колений; ДСК - дріб сталевий колений; кварцевий пісок; електрокорунд.

Розмір частинок 0,3-1,5 мм. Тиск повітря 0,4-0,7 МПа. Воно не повинно містити вологи і мастила. Дистанція обробки 8-15 см, час 20-30 секунд.

Після обробки поверхня повинна бути матовою, блискучі ділянки на ній не допускаються. Шорсткість визначається товщиною покриттів, методом і способом напилення.

Після абразивно-струминної обробки поверхня стає надзвичайно активною. Так, наприклад, коефіцієнт самодифузії Ni підвищується до 30 разів. Звичайно дозволяється зберігати підготовлену до напилення деталь в сухому повітрі не більше 3-х годин.

Розміри частинок абразивного матеріалу вибирають залежно від товщини матеріалу, що напилюється, матеріалу основи і ряду інших технологічних чинників. Рекомендації по грануляції абразивних частинок наведені на рисунку 1.1 і в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Грануляція частинок кварцевого піску і сталевго дрібняку, що рекомендується для обробки поверхні різних матеріалів

Вид матеріалу, що оброблюється	Розмір часток, мм	
	Кварцевий пісок	Сталевий дрібняк
1. Сталь маловуглецева	0,8-1,0	01,8-1,0
2. Сталь середньовуглецева	1,0-1,8	1,0-1,5
3. Чавун сірий	0,25-0,5	-
4. Чавун білий	1,5-0,5	1,5-2,5
5. Скло	0,25-0,5	-
6. Пластмаси	0,3-0,6	-

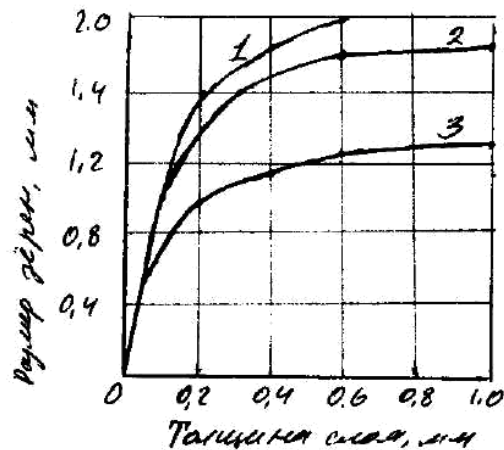


Рисунок 1.1 - Залежність грануляції зерен абразивного матеріалу від товщини напиленого шару: 1 - кварцевий пісок, 2 - сталевий дрібняк, 3- сталевий дріб

Шорсткість поверхні, що готується, також визначається тиском стислого повітря. З його збільшенням вона зростає.

Важливою характеристикою, що визначає результати обдування поверхні виробів, є кут атаки. Експериментально показано, що вироби з сірого чавуну краще обробляти при кутах атаки, близьких 90°, а сталі - 45°.

При обробці сірого чавуну і падінні частинок нормально поверхні, абразивний матеріал вибиває м'які графітні частинки. Малі кути атаки (45° і менш) небажані, оскільки в таких умовах абразивні частинки зрізають виступи на поверхні, що готується, шорсткість зменшується.

В таблиці 1.2 наведені рекомендації щодо вибору режиму обдування поверхні різних матеріалів абразивними частинками.

Таблиця 1.2 - Рекомендовані режими абразивно-струминної обробки поверхні різних матеріалів

Матеріал деталі, що оброблюється	Відстань від сопла до деталі, мм	P повітря, МПа	Кут атаки, град.
Сталь високовуглецева	100-150	0,4-0,6	65-80
Сталь маловуглецева	100-150	0,2-0,4	45-65
Чавун сірий	100-150	0,15-0,30	~90
Кольорові метали	150-200	0,10-0,15	65-80
Пластмаси	200-250	0,10-0,15	65-90
Скло або деревина	200-250	0,05-0,10	45-80

1.3.3 Механічні методи підготовки поверхні

1.3.3.1 Насікання зубилом

Застосовується для підготовки поверхонь деталей типу вал, виготовлених з матеріалів з низькою і середньою твердістю. Обробка проводиться зубилом паралельно осі деталі. Зубило заточують під кутом 45°. Крок 3-6 мм. Глибина обробки 0,2-0,4 мм.

Така підготовка забезпечує підвищену міцність зчеплення покриттів з основою при тангенціальних навантаженнях.

1.3.3.2 Накатування

Застосовується для підготовки поверхонь в'язких матеріалів. Виконується одним або декількома зубчастими дисками, насадженими на один вал. Після накатування корисне обдування абразивним матеріалом.

1.3.3.3 Нарізання «рваної» різи

Метод знайшов широке розповсюдження при підготовці до напилення зовнішніх і внутрішніх поверхонь круглих виробів. Для отримання «рваної» різи різець встановлюється дещо нижче за центр деталі. Величина зсуву h визначається за формулою

$$h=R \cdot \sin\gamma, \quad \sin\gamma = \frac{K_1}{\sqrt[3]{\delta}},$$

де h - зсув різця щодо осі деталі;

R - радіус деталі;

γ - кут заточування різця;

K - коефіцієнт, що характеризує матеріал, який оброблюється. Для сталі $K_1=0,393$;

δ - відносне видовження матеріалу деталі.

Крок «рваної» різі повинен бути не менше діаметра напилених частинок.

1.3.3.4 Нарізання «рваної» різі з накочуванням вершин

Така підготовка проводиться при необхідності нанесення тонких покриттів на деталі або для забезпечення підвищеної міцності зв'язку напиленого шару з основою. Утворюється замок типу «ластівчин хвіст», що забезпечує збільшення адгезійної міцності покриттів.

1.3.4 Електричні методи підготовки поверхні

1.3.4.1 Електроіскрова підготовка поверхні

При торканні поверхні деталі електродом збуджується дуговий розряд. Частина матеріалу електрода переноситься на основу і приварюється до неї. Багаторазові торкання забезпечують утворення необхідної шорсткості на поверхні деталі. Метод застосовується для підготовки до напилення твердих поверхонь. Продуктивність - до $0,5 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Матеріал електрода вибирають залежно від матеріалу основи. При нанесенні покриттів на мідь і її сплави електроди виготовляють з міді, при напиленні покриттів на нікелеві сплави, сталь - їх матеріалом є нікель. Для забезпечення стійкого процесу електроіскрової обробки поверхні електроди охолоджують водою. Живлення електричного розряду здійснюється від спеціальних, рідше зварювальних трансформаторів.

1.3.4.2 Обробка тліючим розрядом

Застосовується для підігріву і активації поверхні виробів при вакуумному нанесенні покриттів і газотермічному напиленні при зниженому тиску.

1.3.4.3 Електрополіровка

Метод може бути використаний для підготовки поверхні деталей при вакуумному напиленні.

1.3.5 Хімічна підготовка поверхні

Заснована на різній швидкості травлення поверхні кристалів, їх меж і включень. Відповідні режими травлення забезпечують створення на поверхні основи необхідної шорсткості. Метод застосовується для підготовки до напилення тонкостінних деталей. Недолік - необхідність якісної промивки деталей і нейтралізації промивальної води і травильних розчинів.

1.4 Вплив методу підготовки поверхні на адгезійну міцність покриттів

Вплив методу підготовки поверхні виробів до напилення на адгезійну міцність корозієстійких покриттів ілюструють дані, що наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Вплив методу підготовки поверхні сталевих основи на адгезійну міцність покриттів [МПа]

Матеріал, що напилюється	Метод підготовки поверхні			
	Піскоструминна обробка	Обдування Al_2O_3	Нарізання «рваної» різи	Нарізання «рваної» різи з накопчуванням вершин
Al	9.8	21.3	24.7	28.2
Zn	10.1	13.7	17.1	21.0
X18H10T	14.1	47.8	73.5	88

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ГТН

2.1 Узагальнена схема процесу ГТН

Узагальнена схема газотермічного напилення (ГТН) наведена на рисунку 2.1. Матеріал, що розпилюється у вигляді порошку, дроту, шнурів або стрижнів, подається в зону нагріву. Розрізняють радіальну і осьову подачу матеріалу. Нагрів напилених частинок поєднується з їх взаємодією з потоком розпилюючого газу. Основне його призначення полягає в розпиленні і прискоренні частинок в осьовому напрямі. У ряді методів напилення газ, що розпилює, виконує і функцію нагріву. При малому числі методів ГТН існує

Вид матеріалу, що розпилюється:

- порошкові матеріали. Застосовуються при ПН, ГПН, ДГН;
- дротяні і стрижньові матеріали. Застосовуються при ПН, ЕДМ, ВЧМ, ГПН;
- порошковий дріт, порошкові шнури.

Ступінь захисту процесу:

- без захисту;
- з місцевим захистом;
- із загальним захистом процесу (напилення в камерах).

В останньому випадку процес може здійснюватися при атмосферному, зниженому або підвищеному тиску.

Ступінь механізації і автоматизації процесу:

- ручні способи (механізована тільки подача матеріалу);
- механізовані способи (також механізовано переміщення розпилювача відносно деталі, що напилюється);
- роботизовані та автоматизовані комплекси.

Періодичність потоку:

- напилення здійснюється безперервним потоком;
- циклічне ведення процесу.

2.3 Способи і технологічні особливості плазмового напилення покриттів

2.3.1 Плазмовий струмінь як джерело нагріву і розпилення матеріалу

Узагальнена схема плазмового напилення наведена на рисунку 2.2.

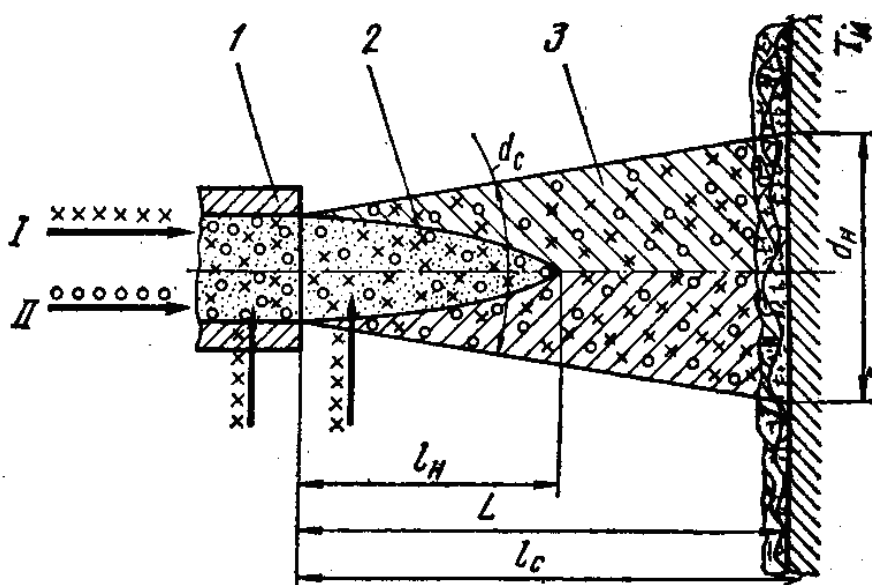


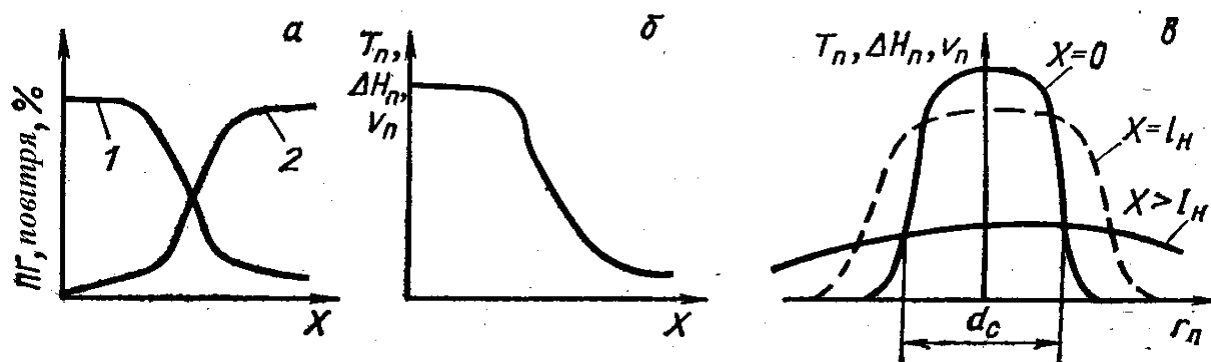
Рисунок 2.2 – Узагальнена схема плазмового напилення покриттів: 1 – плазмоутворююче сопло; 2 – ядро плазмового струменя (початкова ділянка); 3 – основна ділянка плазмового струменя; I – подача матеріалу, що розпилюється; II – подача плазмоутворюючого газу

Плазмовому струменю (ПС) притаманні висока швидкість і температура:

- середньомасова температура плазмового струменя на зрізі сопла сягає $(6-25) \cdot 10^3 \text{K}$ і легко регулюється;
- середньомасова швидкість плазмового струменя легко регулюється від дозвукових значень до надзвукових і досягає 1000-1500 м/с;
- часто для характеристики плазмових струменів, особливо їх теплофізичних параметрів, використовують середньомасове значення тепловмісту (ентальпії) на зрізі сопла. Воно знаходиться в межах 25-60 кДж/г і більш. Цей чинник надає вирішальний вплив на нагрів напилених частинок.

Наведені параметри плазмового струменя свідчать, що він є високошвидкісним, високотемпературним і високоентальпійним джерелом нагріву частинок. В ньому до температури плавлення можуть бути нагріті всі речовини, що є в природі, плавкі конгруентно.

На рисунку 2.3 (б, в) наведено зміну параметрів плазмового струменя по його довжині і радіусу. Основну роль в нагріві і прискоренні напилених частинок грає ядро плазмового струменя.



1- ПГ; 2 - повітря

Рисунок 2.3 - Зміна складу плазмоутворюючого газу (ПГ) на осі струменя (а), теплофізичних властивостей плазмового струменя по осі (б) і в перетинах (в)

ПС бувають турбулентні і ламінарні. Для турбулентних плазмових струменів довжина ядра (l_n) звичайно складає від 5 до 10 діаметрів сопла (d_c) і знаходиться в межах 15-60 мм.

Ламінарні ПС характеризуються набагато більшою протяжністю ядра (до 1м). Отже, в них створюються набагато кращі, ніж в турбулентних, умови для прогрівання і прискорення частинок. Також в ламінарних струменях практично відсутнє характерне для турбулентних перенесення маси уперек потоку. Це зумовлює набагато менше підсмоктування в них повітря і, як

наслідок, меншу взаємодію напилених частинок з компонентами навколишнього середовища (окислення, насичення газами і ін.).

Важливою характеристикою плазмових струменів є відношення потужності плазмотрона до витрати плазмоутворюючого газу. Для турбулентної плазми воно звичайно знаходиться в межах 6-8 кВт/м³, а для ламінарної - 11-12 кВт/м³. Також ламінарні плазмові струмені характеризуються меншим рівнем шуму (до 30-40дБ) в порівнянні з турбулентними (60-120 дБ).

При використанні ламінарних плазмових струменів утруднено введення порошку, оскільки він викликає їх турбулізацію. Тому в практиці напилення, в основному, використовуються затоплені турбулентні ПС як з дозвуковою, так і з надзвуковою швидкістю. В останньому випадку якість покриттів може наближатися до такої для детонаційно-газового напилення.

2.3.2 Класифікації способів плазмового напилення

Способи плазмового напилення частіше за все класифікують:

- 1) за видом матеріалу, що розпилюється;
- 2) за ступенем захисту;
- 3) за ступенем механізації.

2.3.3 Плазмоутворюючі гази

Плазмоутворюючі гази доцільно класифікувати за наступними групами:

а) інертні плазмоутворюючі гази:

- Аргон. Цей газ найбільш часто використовується для напилення. Вміст аргону в марках вищого, першого і другого сорту відповідно складає 99,99; 99,98; 99,95%. Основні домішки - азот і волога. Основний недолік - невисокі значення ентальпії плазмового струменя.

- Гелій. Вміст домішок в гелії високої чистоти - не більш 0,02%, технічному – 0,2% (об). Гелій забезпечує високі показники ентальпії ПС, але він в Україні дефіцитний і дорогий. Недолік - має малу густину. Отже, потрібні високі його витрати. Гелій, в основному, використовується як добавки до аргону для підвищення ентальпії плазмових струменів. Він застосовується при нанесенні покриттів з високотемпературних матеріалів (вольфрам, молібден і ін.)

б) активні плазмоутворюючі гази:

- Азот. З активних газів він частіше всього використовується в практиці напилення. В основному застосовують азот високої чистоти (99,5% N₂). Його використання забезпечує отримання високоентальпійних плазмових струменів з більшою довжиною високотемпературної частини (див. рис. 2.4). В ній добре прогриваються порошкові частинки з тугоплавких матеріалів. Основний недолік: можлива азотизація розпиленних частинок.

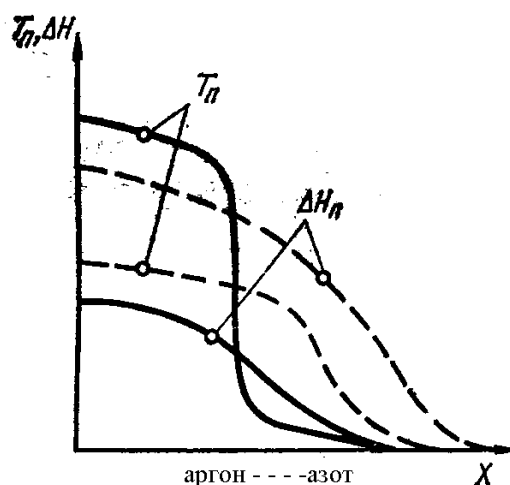


Рисунок 2.4 - Розподіл середньомасової температури T_p і ентальпії ΔH_p по осі плазмового струменя X для різних плазмоутворюючих газів

- Азот з добавками H₂. Водень використовується для підвищення ентальпії плазмового струменя. Його добавка в кількості, що перевищує 20%, приводить до ерозії плазмових сопел. Зазвичай його вміст в суміші з азотом складає 5- 20%.

Для напилення використовується водень різного ступеня чистоти. Найчистішим є водень марки А, що одержується електролізом води (98,8% H₂). Основні домішки: волога, кисень.

- Аміак забезпечує інтенсивне розігрівання частинок, але сопла стоять погано через ерозію.

- Повітря. найдешевший плазмоутворюючий газ. В ньому добре прогривається матеріал, що напилюється. Основний недолік - окислення частинок і насичення їх азотом.

- Кисень (повітря) + пальні гази (природний газ, пропан - бутанові суміші та ін). Ці суміші характеризуються високою тепловою потужністю. Додаткове тепло зумовлено згорянням пальних газів. При використанні цих сумішей

можливе регулювання окислювально-відновного потенціалу плазмових струменів.

в) суміші інертних і активних газів:

- Ar + H₂. Ця суміш частіше за все застосовується в промисловості. Звичайно вміст в ній водню знаходиться на рівні 10-20%.

- Ar + N₂. Зміст азоту зазвичай складає 10-70%.

2.3.4 Способи плазмового наплення

Розрізняють ПН з використанням високочастотних індукційних і дугових плазмотронів. ВЧ - плазмотрони (рисунок 2.5) знаходяться у стадії розробки. Їх основна перевага - введення матеріалу, що розпилюється, по осі плазмового струменя (осьова подача). Недолік: громіздкість (H ~ 600 мм, d ~ 300 мм).

Найбільше поширення для плазмового нагріву газу одержали дугові плазмотрони. В них джерелом нагріву газу і переведення його в стан низькотемпературної плазми є електрична дуга.

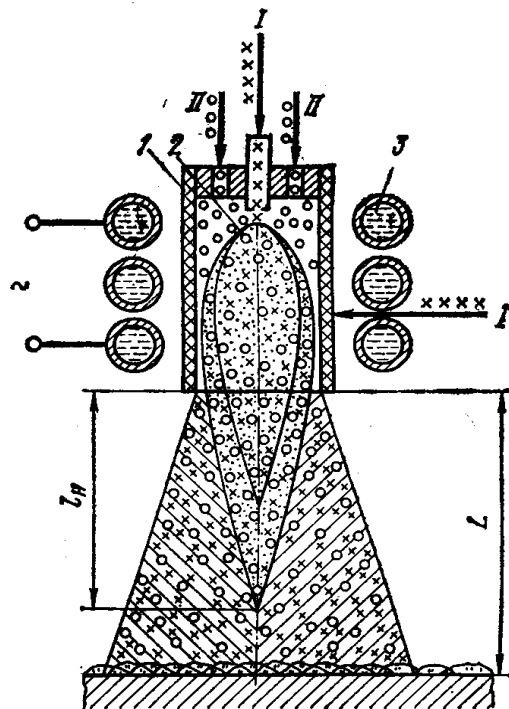


Рисунок 2.5 - Схема високочастотного індукційного плазмотрона:

1 - сопло плазмотрона; 2 - плазмовий струмінь; 3 - індуктор; I - подача матеріалу, що розпилюється; II - подача плазмоутворюючого газу

В основному в практиці напilenня застосовуються однодугові плазмотрони. Принципова схема подібного плазмового пальника наведена на рисунку 2.6.

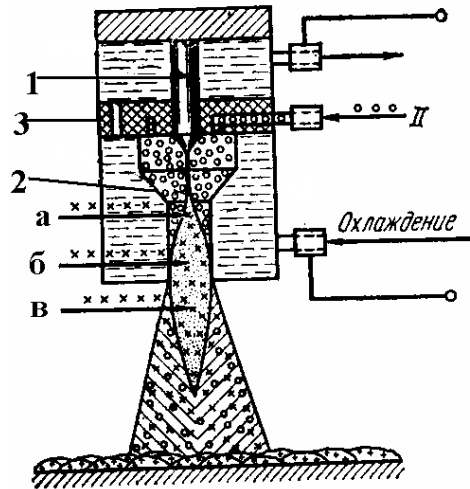


Рисунок 2.6 - Схема однодугового плазмотрона

Пальник складається з: стрижньового електрода 1; соплового електрода 2 і розділювальної ізолюючої вставки 3.

В однодугових плазмотронах осьова подача матеріалу утруднена. Тому застосовується його радіальне введення за схемами (див. рис. 2.6):

- а) введення матеріалу, що розпилюється, вище за розташування активної плями дуги в сопловому пристрої (доанодна подача). При цьому досягаються найвищі значення ККД нагріву частинок;
- б) введення матеріалу, що розпилюється, нижче за розташування активної плями дуги (заанодна подача)
- в) введення матеріалу, що розпилюється нижче за зріз сопла (на зріз сопла).

Якщо негативний полюс джерела живлення приєднаний до стрижньового електрода, а позитивний - до соплового, говорять, що плазмотрон працює на «прямій» полярності. Якщо «+» приєднаний до стрижньового, а «-» до соплового електрода - плазмотрон працює на зворотній полярності.

В СНД набула поширення подача матеріалу за схемами а) і б). За кордоном – за схемою в). При цьому спрощується конструкція плазмового пальника.

Разом з однодуговими набувають поширення двоструменеві плазмотрони і плазмотрони з трифазною дугою. Їх принципові схеми наведені на рисунку 2.7.

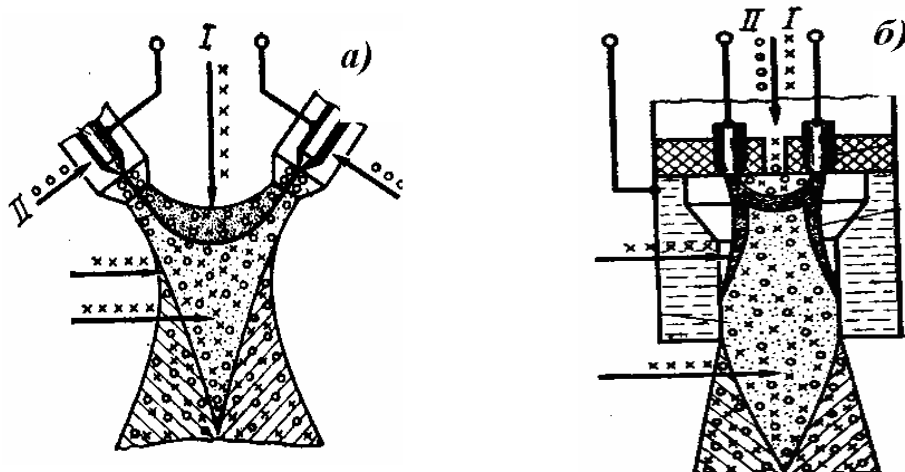


Рисунок 2.7 – Схема двоструменевого плазмотрона (а) і плазмотрона з трифазною дугою (б)

Найбільше поширення набули однодугові розпилювачі, в яких використовуються два види дуг:

а) дуги з довжиною, що самовстановлюється, в яких анодна або катодна пляма в сопловому пристрої не фіксована. Струм дуги визначається її довжиною. Оскільки довжина дуги в цьому випадку непостійна, отже, не постійна і сила струму. Коливання довжини дуги відбувається з періодом, сумірним з часом нагріву порошку. Це погіршує умови його прогрівання. При короткій дузі спостерігатиметься слабкий нагрів плазмоутворюючого газу. Різко зросте частка тепла, що витрачається на нагрів електродів.

б) дуги з фіксованою довжиною. В одному з варіантів прив'язки опорної плями дуги робиться уступ в сопловому електроді на його торці. Кут забезпечує концентрацію напруженості електричного поля і тим самим стабілізацію довжини дуги. $L_d \sim \text{const}$, отже $I_d \sim \text{const}$.

В іншому - до торця соплового електрода через електроізолюючу прокладку під'єднують кільце з електропровідного матеріалу, і на нього перемикають відповідний потенціал від джерела живлення. В цьому випадку довжина дуги також залишається практично незмінною. Подібних міжелектродних вставок може бути декілька, що дозволяє максимально розтягнути електричну дугу (рис. 2.8).

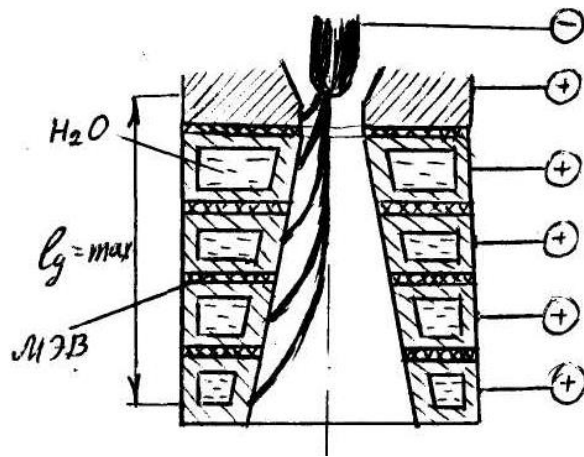


Рисунок 2.8 - Плазмотрон з міжелектродними вставками (МЕВ)

В подібних плазмотронах при використанні аргону в якості плазмоутворюючого газу можна збільшити напругу на дузі до 120 В. Для звичайних плазмових пальників воно знаходиться на рівні 35-40 В.

2.3.5 Вплив параметрів плазмового наплення на ефективність процесу

Ефективне нанесення покриттів високої якості повинне протікати при мінімальних витратах електричної енергії і максимальному використанні матеріалу, що розпилюється.

Розглянемо чинники, що впливають на ефективність цього процесу.

I. Конструктивні параметри розпилювача (плазмотрона)

Конструктивні параметри розпилювача закладаються при його виробництві і при його експлуатації змінюються незначно.

Найбільший вплив на ефективність процесу надають параметри електродного вузла соплової частини розпилювача. До них відносяться: діаметр сопла d_c , довжина каналу сопла l_c , заглиблення електрода в соплі l_z , довжина прив'язки самовстановлюючої або фіксованої опорної плями дуги l_d , діаметр електрода d_e , кут його заточування α_e і діаметр притуплення електрода d_n (рис. 2.9).

Найбільший вплив на ефективність процесу надає *діаметр сопла*. Звичайно у плазмотроні $d_c \sim 3 - 8$ мм. На рисунку 2.10 якісно показаний вплив зміни діаметра сопла на параметри плазмового струменя і потоку частинок.

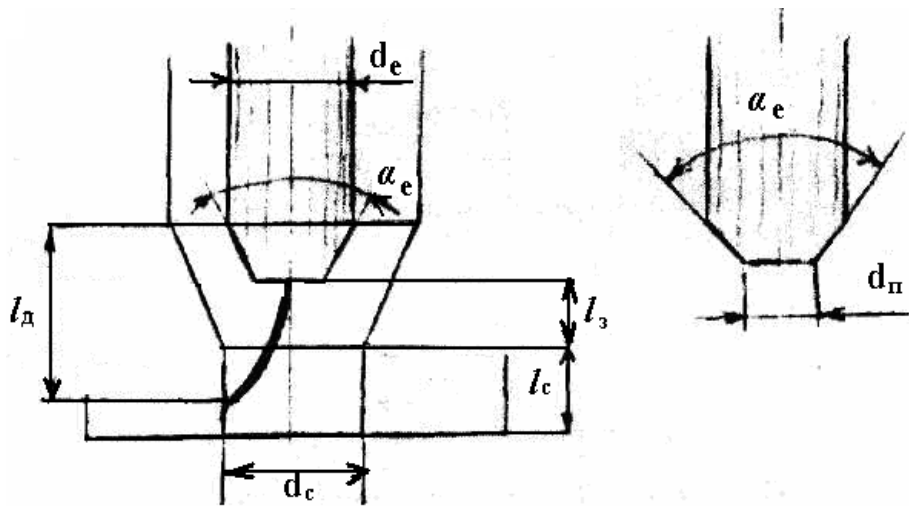


Рисунок 2.9 - Конструктивні параметри соплової частини однодугового плазмового розпилювача: l_3 - заглиблення електрода в сопло; d_c - діаметр сопла; l_d - довжина дуги; α_e - кут заточування електрода; d_n -діаметр притуплення; l_c - довжина сопла; d_e - діаметр електрода

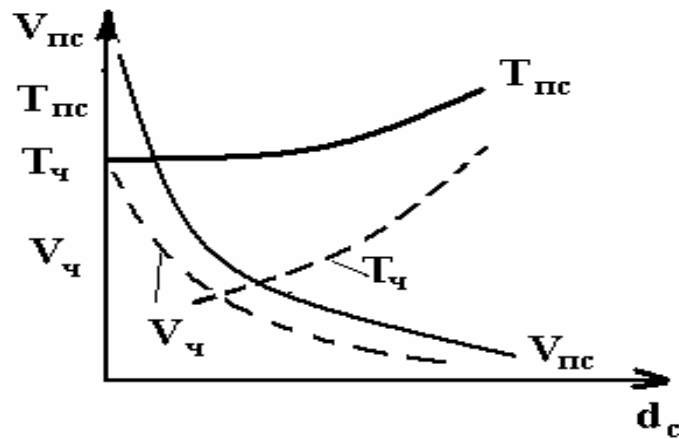


Рисунок 2.10 - Вплив діаметра сопла на параметри плазмового струменя і потоку частинок

Зі збільшенням діаметра сопла швидко зменшується швидкість плазмового струменя. Темп падіння швидкості частинок - менше. Температура плазмового струменя зростає незначно. Спостерігається різке зростання температури частинок. Цьому сприяє збільшення тривалості їх перебування в зоні нагріву і зростання температури плазми.

Подібна зміна параметрів потоку газу і напилених частинок обумовлює екстремальний вплив d_c на пористість покриттів (рис. 2.11).

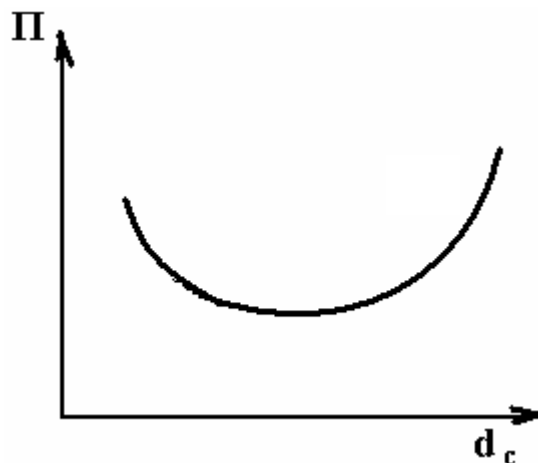


Рисунок 2.11 - Вплив діаметра сопла плазмового розпилювача на пористість покриттів

- Довжина каналу сопла.

З довжиною каналу сопла тісно пов'язана довжина дуги. Звичайно довжина каналу сопла вибирається з таким розрахунком, щоб активна пляма дуги знаходилася в самому каналі. В коротких соплах вона розташовується на їх торцевій частині. Це приводить до виходу сопла з ладу. Для розтяжки дуги використовують довгі сопла. В плазмових розпилювачах з довжиною дуги, що самовстановлюється, $l_c \approx 2-4d_c$. В розпилювачах з фіксованою довжиною дуги $l_c \approx 7-10d_c$. Вплив довжини дуги каналу сопла на тепловий ККД розпилювача наведений на рисунку 2.12.

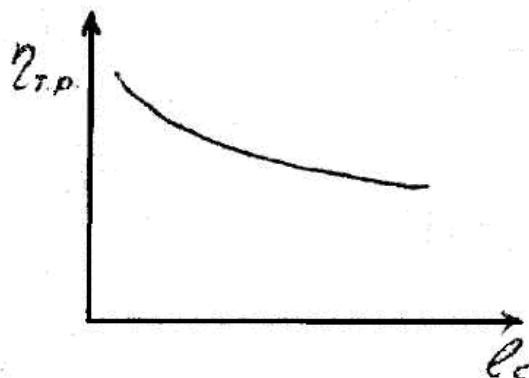


Рисунок 2.12 - Вплив довжини сопла l_c на тепловий ККД розпилювача η_{tr}

- Вплив конструкції сопла на температуру плазмового струменя T_{pl}

Вплив конструкції сопла на температуру плазмового струменя розпилювача наведений на рисунку 2.13.

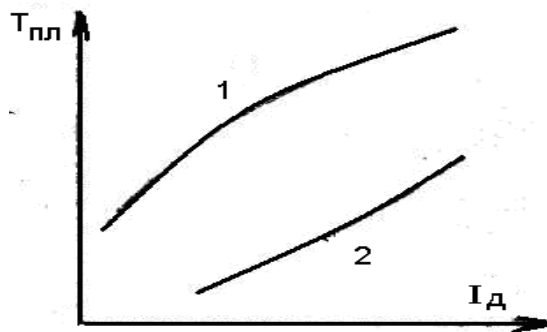


Рисунок 2.13 – Вплив конструкції сопла плазмового розпилювача на температуру плазмового струменя: 1 – розпилювач з МЕВ; 2 - розпилювач з нефіксованою довжиною дуги

- *Заглиблення електрода в сопло*

При невеликих заглибленнях скорочується довжина дуги, збільшуються витрати тепла в електроди, параметри плазмового струменя (температура і ентальпія) суттєво падають.

Звичайно, $l_3 = 2 - 3$ мм

- *Профілювання сопла*

Для забезпечення надзвукових швидкостей плазмових струменів застосовують сопла типу Лаваля. При використанні циліндричних сопел формуються дозвукові плазмові струмені.

- *Діаметр електрода, кут його заточування і притуплення*

Їх величини вибираються, в основному, виходячи з умов максимальної стійкості електрода. Зазвичай приймають $d_e = 3-10$ мм; $\alpha = 45-65^\circ$; $d_n = 1-3$ мм.

- *Місце введення матеріалу, що розпильовується*

На рисунку 2.14 показаний вплив місця введення порошку в однодуговий плазмовий розпилювач на ефективність його нагріву. Найвищі значення ефективного ККД нагріву порошку (η_i) і коефіцієнта його використання досягаються при використанні доанодної подачі.

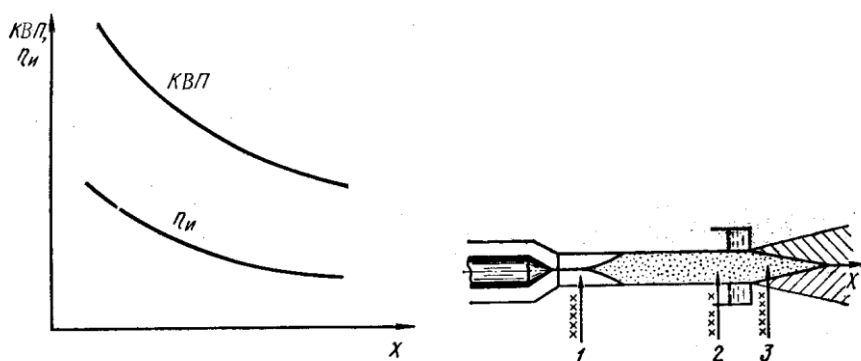


Рисунок 2.14 - Вплив місця введення порошку на ефективний ККД його нагріву (η_i) і коефіцієнт використання (КВП)

III. Параметри, що характеризують режим роботи плазмового розпилювача

Визначаючим в нагріві матеріалу, що розпилюється, є тепловміст (ентальпія), температура і швидкість плазмового струменя. Найбільш значущі параметри режиму роботи плазмового розпилювача входять в рівняння:

$$\Delta H = T_{nc} \cdot C_{nc} = \frac{N_d \cdot \eta_{тр}}{K_p \cdot G_{пр}},$$

де N_d - потужність дуги розпилювача;

$\eta_{тр}$ - тепловий ККД розпилювача;

$G_{пр}$ - витрата плазмоутворюючого газу;

K_p - коефіцієнт, що враховує рівномірність нагріву плазмоутворюючого газу.

Порядок величин: $\eta_{тр} \approx 0.45-0.65$; $K_p = 0.4 - 0.7$.

Потужність, що підводиться до розпилювача, дорівнює: $N_d = U_d I_d$. При плазмовому напиленні прагнуть максимальної напруги на дузі. Потужність регулюють зміною сили струму. На рисунку 2.15 наведені дані, що характеризують вплив потужності дуги на ефективність плазмового напилення при постійній витраті плазмоутворюючого газу.

Із збільшенням N_d суттєво росте ентальпія, температура плазмового струменя і температура напилених частинок. Вплив цього чинника на швидкість плазмового струменя і напилених частинок виявляється слабкий.

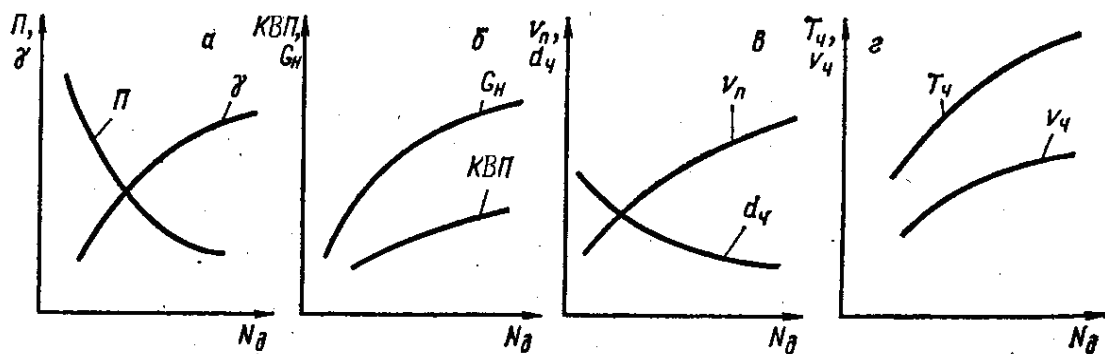


Рисунок 2.15 - Вплив потужності дуги плазмового розпилювача на ефективність напилення

Із збільшенням витрати плазмоутворюючого газу ($N_d = \text{const}$) швидкість плазмового струменя і напилених частинок зростає, а їх температура - падає (рис. 2.16). Довжина ділянки нагріву частинок більша для двоатомних газів. При великих $G_{пр}$ настає заходження плазмового струменя.

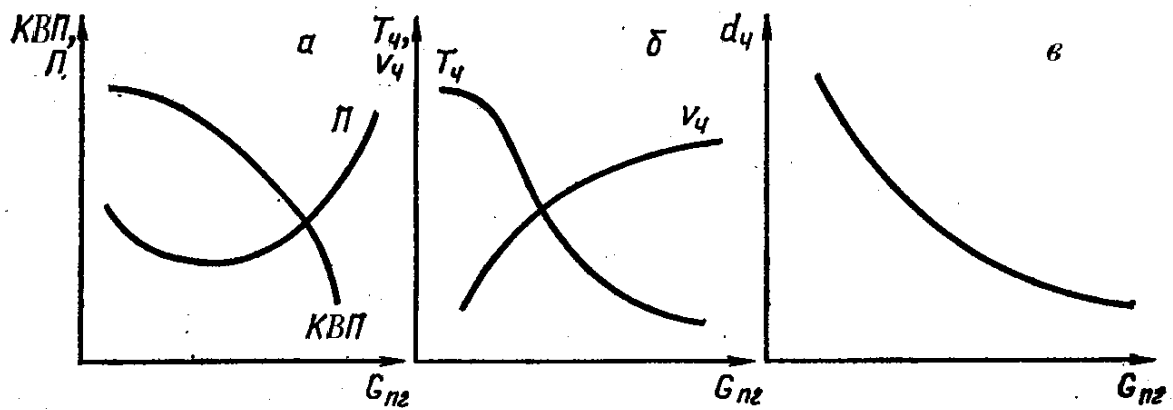


Рисунок 2.16 – Вплив витрати плазмоутворюючого газу на КВП і пористість П(а); температуру $T_ч$ і швидкість $V_ч$ частинок (б); діаметр частинок при розпилюванні дроту (в)

При зростанні витрати плазмоутворюючого газу понад оптимальні значення суттєво зростає пористість покриттів, зменшується їх адгезійна міцність і коефіцієнт використання порошку.

Окрім $G_{пл}$, великий вплив на ефективність напилення чинить вид плазмоутворюючого газу. Він визначає характеристики плазмового струменя і умови теплообміну.

Це підтверджують результати розрахунку теплофізичних характеристик плазмових струменів при використанні різних плазмоутворюючих газів, що наведені у таблиці 2.1. При розрахунках було прийнято: $N_d=20$ кВт, $G_{пл}=3$ м³/г, $d_c=6$ мм, $d_n=100$ мкм.

Таблиця 2.1 - Параметри теплообміну при плазмовому напиленні порошковими матеріалами і використанні різних плазмоутворюючих газів

Плазмо-утворюючий газ	Середньо-масова температура на зрізі сопла $T_{пл}$, К(розрах.)	Швидкість плазмового струменя середньо-масова $V_{пс}$, м/с	Коефіцієнт тепловіддачі від плазми до частинки α , Вт/м ² ·град	Умовна довжина ділянки нагріву плазмового струменя (до 2000°К), м
Ar	10000	1000	$0.9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$
N ₂	5000	1100	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-2}$
NH ₃	3500	1000	$17.0 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-2}$

З наведених в таблиці даних виходить, що з переходом від одноатомних газів до двох - і багатоатомних зростають теплообмінні критерії i , отже, поліпшуються умови прогрівання порошку.

Характер нагріву частинок визначається критерієм Біо

$$Bi = \frac{\lambda_{пл}}{\lambda_ч},$$

де $\lambda_{пл}$ и $\lambda_ч$ – коефіцієнти теплопровідності плазми і частинки відповідно.

У таблиці 2.2 наведені результати розрахунку критерію Біо для нагріву в плазмовому струмені ZrO_2 і використанні найуживаніших при напиленні плазмоутворюючих газів.

Таблиця 2.2 - Результати розрахунку критерію Біо при нагріві ZrO_2 в різних плазмоутворюючих газах

Плазмоутворюючий газ	Ar	N ₂	NH ₃	H ₂
Bi	0,18	0,63	3,5	5,5

З наведених в таблиці даних виходить, що водень забезпечує найбільш ефективний нагрів ZrO_2 . Для металевих частинок малого діаметра нагрів може бути ефективний і в аргоні.

При $Bi < 1$ - теплопровідність плазми набагато менше теплопровідності частинки. Вона прогривається на всю глибину. При розрахунках градієнтом температури можна нехтувати.

При $Bi > 1$ - градієнтом температур в частинці нехтувати не можна.

III. Параметри матеріалу, що розпильється, і умови введення його до розпилювача

а) порошкове напилення:

- *Діаметр порошку*

Із збільшенням діаметра порошку різко зростають труднощі їх нагріву до температури плавлення і різко знижується ефективність процесу (рис. 2.18).

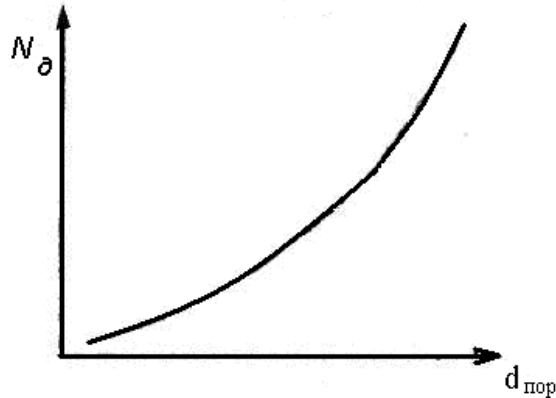


Рисунок 2.18 - Вплив діаметра порошкових частинок на потужність, що підводиться до розпилювача

Для плазмового напилення застосовують порошок з середнім діаметром частинок 10-200 мкм. Порошки більшого розміру практично неможливо прогріти до $T_{пл}$ за час перебування в зоні нагріву. Кудінов В.В. показав, що тонкі порошки (10мкм і менш) обтікають виріб як газ і не беруть участі у формуванні покриття. Їх при атмосферному тиску не використовують, а застосовують при напиленні при зниженому тиску.

- Введення порошку

Введення порошку здійснюється за допомогою транспортуючого газу.

Звичайно $G_{тр}=7-10\% G_{пл}$, тобто $G_{тр}=5-10$ л/хв.

При малих витратах транспортуючого газу порошок поступає в розпилювач нерівномірно. Можливе забивання трактів. При великих його витратах потік частинок зміщується з осі ПС, погіршуються умови їх прогрівання.

- Відсічення транспортуючого газу.

Транспортуючий газ, потрапляючи разом з порошком в розпилювач, сприяє заходженню плазмового струменя і, тим самим, погіршує умови прогрівання частинок. Доцільне його відсічення після доставки частинок до плазмового пальника. На рисунку 2.19 показаний один з можливих способів відсічення. Під дією відцентрових сил важкі частинки «пролітають» в розпилювач, а легкий транспортуючий газ відводиться від нього по трубі.

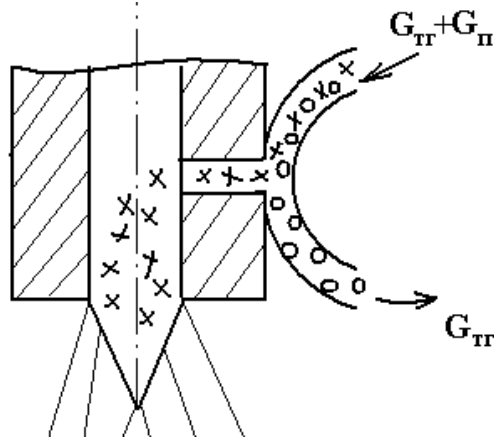


Рисунок 2.19 - Можлива схема відсічення транспортуючого газу

- Швидкість введення порошку

Звичайно $G_{п}=0,25-2,5\text{г/с}$. Великі швидкості введення приводять до заохолодження ПС.

б) Дротове напилення

- Діаметр дроту

Зазвичай $d_{др}=0,5-2,5\text{ мм}$. Його подача здійснюється радіально на зріз сопла. Існує два способи плазмового напилення з використанням дроту: нейтральним дротом і дротом - анодом (рис. 2.20).

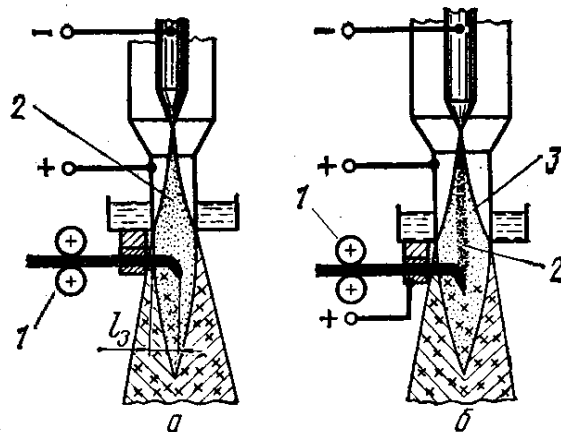


Рисунок 2.20 - Схема плазмового напилення розпиленням дроту:

а - нейтральний дріт; б - дріт-анод; 1 - механізм подачі дроту;

2 - основна дуга; 3 - допоміжна дуга

Нагрів, плавлення і розпилення нейтрального дроту здійснюється плазмовим струменем. Швидкість подачі дроту в розпилювач складає 10-25 мм/с.

У разі схеми дріт-анод на нього подається позитивний потенціал джерела живлення дуги. Основна дуга горить між катодом і дротом. Його нагрів і плавлення переважно відбувається за рахунок тепла, що виділяється в анодній плямі. Допоміжна дуга горить між стрижньовим і сопловим електродами і забезпечує переведення газу в стан низькотемпературної плазми. Плазмовий струмінь виконує, в основному, функцію розпилення. При подібній схемі нагріву і плавлення дроту швидкість його введення в розпилювач складає 30-70 мм/с.

На рисунку 2.21 наведена залежність діаметра частинок і потужності дуги від діаметра дроту, що розпилюється. При його зменшенні підвищується дисперсність напилених частинок і знижується потужність дуги.

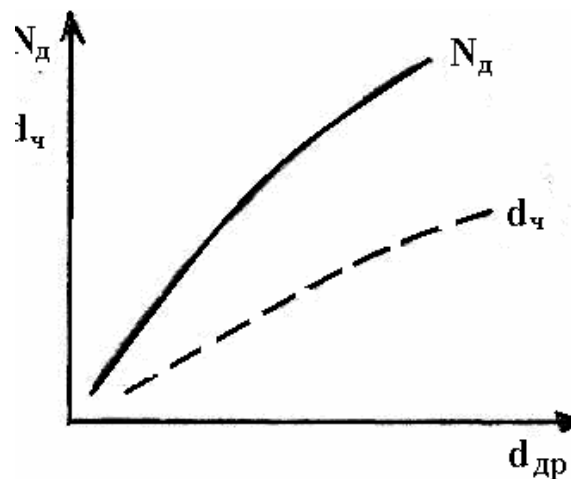


Рисунок 2.21 - Вплив діаметра дроту на дисперсність напилених частинок і потужність дуги

- Заглиблення дроту

На дисперсність розпилених частинок великий вплив чинить заглиблення дроту в плазмовий струмінь. Малі заглиблення ($l_3 < 1/2d_c$) сприяють утворенню крупних слабодиспергованих крапель. Їх потік не компактний і не придатний для напилення. Із збільшенням швидкості подачі дроту глибина його заглиблення зростає ($l_3 > 1/2d_c$) і, відповідно, формується компактний потік дисперсних частинок. Згідно з даними Боброва Г.В. при плазмовому напиленні нейтральним дротом розузгодження осей потоків плазмового струменя і частинок може досягати 5-6°.

- Початкова температура порошку і дроту

Для підвищення ефективності процесу іноді вдаються до попереднього нагріву дроту і порошку.

IV. Параметри, що характеризують зовнішні умови напилення

Їх вплив на ефективність процесу плазмового напилення аналогічний такому для інших методів ГТН. Звичайно дистанція напилення при ПН складає 60 - 300 мм

V. Параметри плазмового струменя (ПС) і потоку напилених частинок

До параметрів ПС відносяться:

- середньомасова температура, ентальпія і швидкість ПС на зрізі сопла;
- зміна цих параметрів і складу газу по осі ПС і в перетинах;
- теплові і швидкісні її межі;
- довжина початкової ділянки ПС;
- довжина високотемпературної ділянки ПС.

Ці параметри визначають нагрів і прискорення частинок. До параметрів потоку частинок (ПЧ) відносяться:

- температура, швидкість і ентальпія частинок і, в першу чергу, у поверхні основи, а також на зрізі сопла і в перетинах струменя;
- взаємодія частинок з газовою фазою;
- випаровування, дисоціація і сублимація матеріалу частинок;
- густина потоку частинок;
- кут розбіжності потоку частинок і ПС.

Розподіл температури, швидкості ПС по осі і перетинах потоку, зміна її складу по довжині плазмового струменя показані на рисунку 2.3.

При турбулентному режимі витікання ПС відбувається її інтенсивне перемішування з навколишнім газом. Склад струменя сильно змінюється через підсмоктування повітря з навколишнього середовища.

В межах початкової ділянки ПС ($l_p=5-10d_c$) температуру, швидкість і ентальпію ПС можна прийняти постійними. На основній ділянці спостерігається різке їх зниження. Воно особливо інтенсивне для одноатомних газів. Довжина ділянки нагріву тим більше, чим вище ступінь дисоціації двоатомного або багатоатомного газу.

Теплові і швидкісні межі ПС приблизно співпадають. При атмосферному

тиску кут розкриття затопленої ПС (φ) дорівнює $10-18^\circ$. В ламінарних струменях $\varphi=6-8^\circ$. Температура частинок звичайно дорівнює температурі плавлення або значно вище її. Швидкість розплавлених частинок не повинна перевищувати $100-300$ м/с через розбризкування. Густина потоку частинок складає $10^3 - 10^5$ ч/см²·с.

- *Захист процесу плазмового напилення*

За ступенем захисту процесу розрізняють плазмове напилення: без захисту (див. рис. 2.6), з місцевим захистом і загальним захистом.

- а) Плазмове напилення без захисту

Процес ведуть у відкритій атмосфері без ізоляції плазмового струменя, потоку напилених частинок і плями напилення від повітря. При цьому створюються сприятливі умови для окислення матеріалу, що розпилюється, і насичення його азотом. Вживання інертних плазмоутворюючих газів не забезпечує захист частинок від взаємодії з повітрям (див. рис. 2.3 а).

- б) Плазмове напилення з місцевим захистом

Для цих цілей застосовують місцеві камери (рис. 2.22 а), які переміщують по поверхні виробу, або газову атмосферу з використанням додаткових соплових пристроїв (рис. 2.22 б і в). Основним недоліком струменевого захисту (див. рис. 2.22 б) є велика витрата захисного газу, що значно перевищує витрату плазмоутворюючого. Подібний захист технологічно малоефективний.

Достатньо надійний спосіб захисту при використанні насадок на соплову частину розпилювача (див. рис. 2.22 в). В насадці відбувається нагрів і прискорення частинок плазмовим струменем при повній ізоляції їх від повітря. На виході плазмовий струмінь відбирається за допомогою відсмоктування. Потік напилених частинок і пляма напилення легко ізолюються кільцевим потоком захисного газу, що створюється сопловим пристроєм. Цей спосіб також дозволяє регулювати, аж до усунення, термосилову дію плазмового струменя на поверхню виробу.

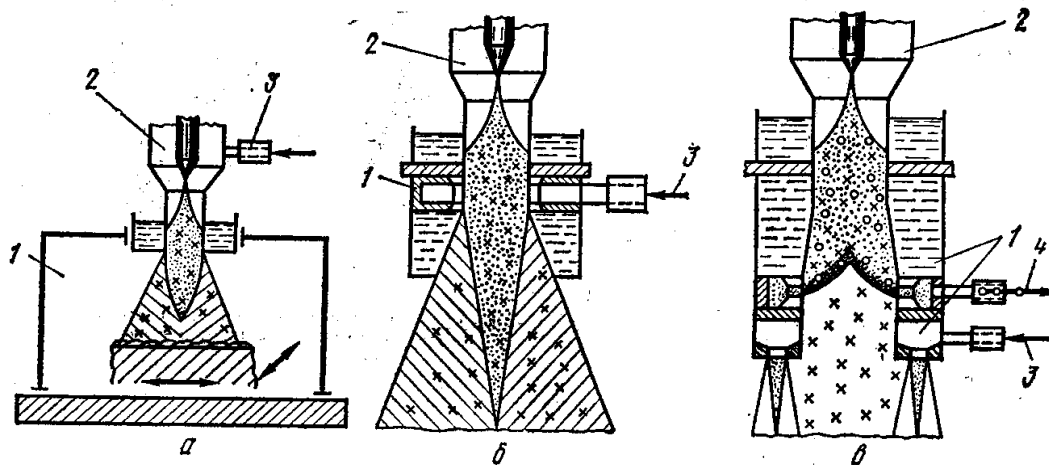


Рисунок 2.22 - Схеми плазмового напилення з місцевим захистом: а - місцева камера, б - струменевий захист з сопла, в - струменевий кільцевий захист з насадки; 1- місцева камера, сопло, насадка; 2- плазмовий розпилювач; 3 - подача захисного газу; 4 - відсмоктування ПС

в) Плазмове напилення із загальною захисною атмосферою

Напилення покриттів виконується в камері. Процес повністю ізольований від повітря. Атмосфера в камері формується плазмоутворюючим газом. Він скидається в атмосферу або поступає на регенерацію і процес проводять по замкнутому циклу. Тиск в камері може бути рівним атмосферному, менше і більше його. Способи плазмового напилення в камері перспективні, дозволяють одержувати покриття більш високої якості.

2.3.6 Основні переваги і недоліки плазмового напилення покриттів

а) Основні переваги:

- 1) висока продуктивність процесу (від 2-8 кг/г для плазмотронів потужністю 20 - 60 кВт до 50 - 80 кг/г для плазмотронів потужністю 150- 200 кВт);
- 2) широкий діапазон видів матеріалу, що розпилюється (дріт, порошки з різною температурою плавлення, стрижні);
- 3) велика кількість параметрів, що забезпечують гнучке регулювання процесу напилення, якості напилених покриттів;
- 4) високі значення КВМ при напиленні дротяних матеріалів (0,25 - 0,7) і порошків (0,3 - 0,8);

- 5) можливість комплексної механізації і автоматизації;
 - 6) широка доступність методу;
 - 7) достатня економічність методу і невисока вартість найпростішого устаткування.
- б) Основні недоліки:
- 1) невисокі значення коефіцієнта використання енергії: при дротяному напиленні 0,02-0,18; при порошковому - 0,001-0,02;
 - 2) наявність пористості та інших видів несцільностей (2-20%);
 - 3) невисока адгезійна і когезійна міцність покриттів ($\sigma_{a,max} = 80-100$ МПа);
 - 4) високий рівень шуму (60-120 дБ при відкритому веденні процесу).

2.4 Способи і технологічні особливості газополуменевого напилення (ГПН)

2.4.1 Газове полум'я як джерело нагріву і розпилення матеріалу

При ГПН джерелом нагріву і розпилення матеріалу є газове полум'я, одержане при згорянні палих газів в кисні, рідше в повітрі. В розпилювачах по периферії сопла подається пальна суміш. Центральна частина служить для подачі в газополуменевий струмінь матеріалу, що розпилюється. Поблизу сопла газове полум'я є порожнім конусом з кільцевим перетином. По мірі віддалення від сопла утворюється суцільний потік високотемпературного газу. Схема газополуменевого напилення наведена на рисунку 2.23.

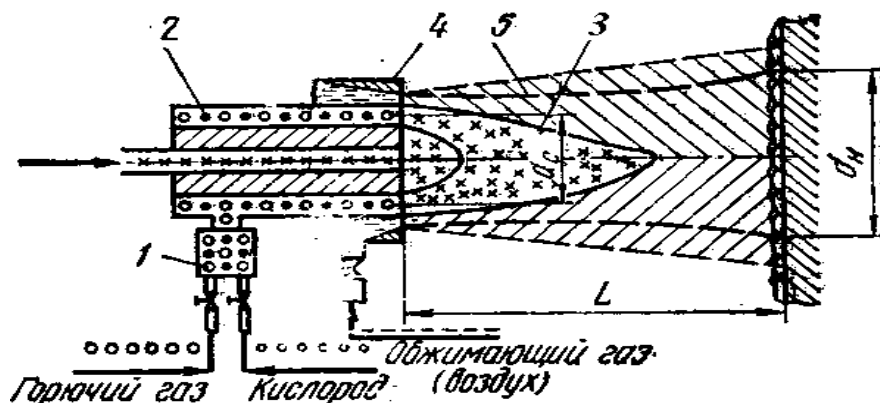


Рисунок 2.23 - Узагальнена схема газополуменевого напилення покриттів:

- 1 - змішувач; 2 - газополуменеве сопло; 3 - газований струмінь;
- 4 - повітряне сопло; 5 - повітряний обтискний потік

Як пальні гази використовують: ацетилен (C_2H_2), метан (CH_4), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), водень і ін. Їх основні теплофізичні характеристики наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Основні теплофізичні характеристики пальних газів, що використовуються при газополуменевому напиленні покриттів

Газ	C_2H_2	CH_4	C_3H_8	C_4H_{10}	H_2
Відносна густина по повітрю	0,91	0,56	1,57	2,10	0,07
Теплотворна здатність при $293^{\circ}K$ і $P=0.1$ МПа, мДж/м ³	56,5	35,8	93,5	125	10,8
Швидкість розповсюдження газового полум'я в суміші з O_2 , м/с	13,5	3,3	3,7	-	8,9
Максимальна температура газового полум'я в суміші з O_2 , °К	3373-3473	2273-2373	2673-2973	2673-2973	2273-2773

В основному застосовують газобалонне живлення розпилювачів. Тепловий ККД розпилювачів 0,8-0,9. Тобто в цьому випадку велика частина підведеної енергії витрачається на нагрів газу. На нагрів порошкових частинок витрачається тепла мало (ККД нагріву порошкових частинок складає 0,01-0,1).

Поряд з високою температурою газове полум'я має достатньо високу швидкість (300-800 м/с), що дозволяє розганяти частинки, що напилюються, до 30-80 м/с і більш. Таким чином, газове полум'я є високотемпературним і високошвидкісним джерелом і може бути використане для напилення покриттів.

Найвищу теплотворну здатність мають пропанобутанові суміші ($\Delta H=93,5-125$ мДж/м²), найбільша температура газового полум'я реалізується при використанні ацетилену в якості пального газу.

При ГПН подача матеріалу, що розпилюється, здійснюється по осі

поток, який покращує умови нагріву і прискорення частинок.

Для збільшення довжини високотемпературної частини газового струменя, в якому в основному відбувається нагрів і прискорення частинок, і тим самим інтенсифікації цих процесів, проводять обжимання газового полум'я струменем стислого повітря.

2.4.2 Класифікації способів ГПН

Нижче наведені класифікації способів ГПН, що найчастіше використовуються:

- 1) ГПН порошковими і дрововими матеріалами;
- 2) ГПН різними пальними газами;
- 3) ГПН ручними і механізованими способами.

2.4.3 Параметри процесу ГПН і їх вплив на ефективність процесу наплення

I. Конструктивні параметри

До конструктивних параметрів, що роблять найбільший вплив на ефективність процесу, відносять: діаметр газового сопла d_c , розміри отворів і їх нахил до осі розпилювача. Ці параметри вибираються оптимальними при проектуванні. В процесі експлуатації вони майже не міняються.

II. Параметри режиму роботи розпилювача

а) Рід пального газу

Вплив роду пального газу на характеристики газового полум'я розглянуті раніше (див. підрозділ 2.4.1). Велику роль відіграє відношення витрати кисню до витрати пального газу $\beta = \frac{G_{O_2}}{G_{пг}}$. Значення β визначає фізико-хімічні властивості полум'я, яке залежно від величини цього критерію може бути нейтральним, окислювальним або відновним (вуглецючим). В процесі наплення $\beta = 1,4-4$; нижня межа для ацетилену, верхня - для пропанобутанової суміші.

б) Витрати і тиск газів

При ГПН витрати пального газу змінюються в межах 0,5-3,0 м³/г. Його тиск знаходиться на рівні 0,030-0,035 МПа, сягаючи в пальниках рівного тиску 0,1МПа. Вплив витрат пального газу ($G_{пг}$) на теплову потужність газового полум'я ($W_{пг}$), його швидкість ($V_{пг}$), і довжину високотемпературної частини газового полум'я (l_B) якісно проілюстровано на рисунку 2.24 а, а на швидкість введення дроту ($V_{др}$) і продуктивність наплення ($G_{нап.}$) - на рисунку 2.24 б.

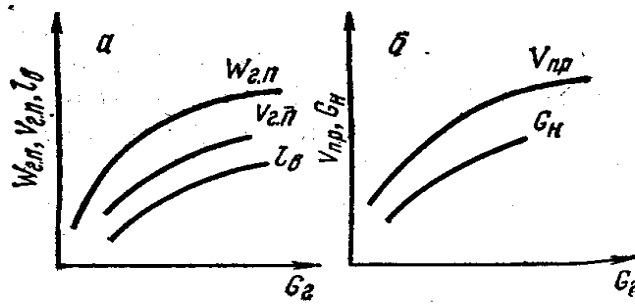


Рисунок 2.24 - Вплив витрат пального газу ($G_{\text{пг}}$) на ефективність газополуменевого напилення

Витрати повітря, що використовується для обтиснення газового полум'я, складають $30-40 \text{ м}^3/\text{г}$, його тиск $0,3-0,5 \text{ МПа}$. Такий же тиск кисню, що використовується при напиленні.

III. Параметри матеріалу, що розпилюється і його введення в розпилювач

При ГПН дисперсність порошкових частинок, що подаються в розпилювач, складає $10-100 \text{ мкм}$. Більш крупні частинки прогриваються недостатньо. Швидкість введення порошку в розпилювач складає $0,5-10 \text{ кг/г}$. Введення його здійснюється: за рахунок власної маси, власної маси в поєднанні з інжектуванням струменем, за допомогою транспортуючого газу (кисень або повітря).

Діаметр дроту при ГПН знаходиться в межах $1,0-5,0 \text{ мм}$, швидкість його подачі - до $0,1-0,15 \text{ м/с}$.

IV. Параметри, що характеризують зовнішні умови напилення

Їх вплив на ефективність процесу газополуменевого напилення аналогічний такому для всіх методів ГТН. Дистанція напилення при ГПН складає $100-200 \text{ мм}$.

V. Параметри, що характеризують зовнішні умови напилення

Характеристики газового струменя і потоку частинок наведені в підрозділі 2.4.1. Розподіл ентальпії, швидкості, температури і складу по осі струменя аналогічний плазмовим струменям. Довжина високотемпературної частини газополуменевого струменя залежить від роду пального газу, його витрат і β . Для ацетилену і пропанобутанової суміші нагрів частинок відбувається на ділянці завдовжки $70-150 \text{ мм}$. Теплові і швидкісні межі струменя близькі і складають $17-25^\circ$. Густина потоку напилених частинок знаходиться на рівні $10^3-10^5 \text{ ч/см}^2 \cdot \text{с}$.

2.4.4 Основні переваги і недоліки газополуменевого напилення

а) основні переваги:

- 1) можливість осьової подачі матеріалу;
- 2) простота і невисока вартість устаткування;
- 3) високі значення коефіцієнта використання матеріалу, особливо, при дротовому напиленні.

б) основні недоліки:

- 1) невисока продуктивність процесу, особливо при напиленні тугоплавких порошків;
- 2) наявність в газовому струмені активних газів;
- 3) більш низька в порівнянні з плазмовим напиленням якість покриттів;
- 4) низькі значення теплового ККД нагріву порошкових частинок;
- 5) обмеження по температурі плавлення матеріалів, що наносяться (для дротяних не більш - 2973°K , для порошкових - 2473°K).

2.5 Способи і технологічні особливості детонаційно-газового напилення покриттів (ДГН)

2.5.1 Детонаційно-газовий вибух і продукти його розпаду - джерело нагріву і прискорення частинок, що напилюються

Узагальнена схема детонаційно-газового напилення наведена на рисунку 2.25.

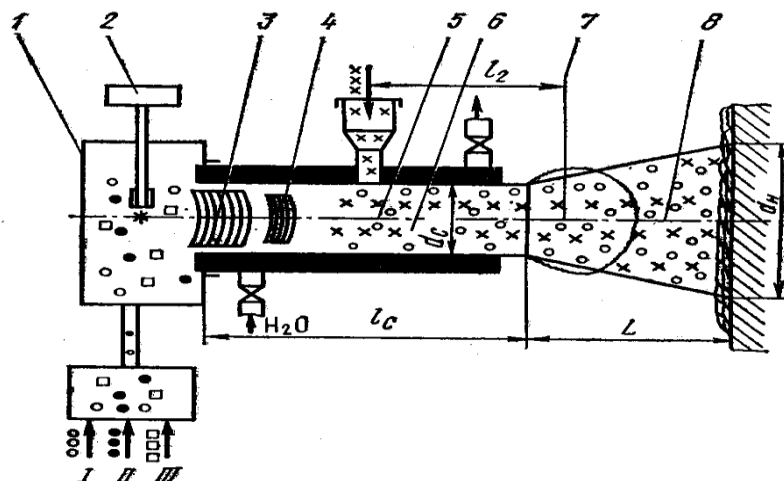


Рисунок 2.25. – Узагальнена схема детонаційно-газового напилення покриттів:
I - палийний газ; II-окислювальний газ; III- технологічний газ;
 d_c , l_c - діаметр і довжина сопла

При ДГН джерелом нагріву і прискорення частинок є високотемпературний потік газової суміші, що утворюється в результаті направленої вибуху.

Детонаційна хвиля характеризується високою температурою (4000-5700°K) і швидкістю (2000 - 3000 м/с). Швидкість і температура продуктів її розпаду дещо нижчі. Теплова потужність детонаційних газових струменів досягає 10^4 - 10^7 Вт. Для ацетиленово-кисневих сумішей її значення досягає $15 \cdot 10^6$ Вт ($d_c=16$ мм, 45% C_2H_2). Швидкість продуктів детонації визначає швидкість напилених частинок, яка може досягати 800-1300 м/с і більш. Таким чином, детонаційно-газовий вибух і продукти його розпаду відносяться до високоенергетичних, високошвидкісних і високотемпературних джерел і можуть бути використані для напилення покриттів.

2.5.2 Особливості процесу ДГН

При ДГН в камеру запалення 1 (див. рис. 2.25) подається задана кількість суміші робочих газів, наприклад, $C_2H_2-O_2-N_2$. За допомогою малопотужного електричного розряду 2 суміш підпалюють. Теплові хвилі, що виникають при цьому, породжують ударну 3, а потім і детонаційну хвилю 4. В каналі ствола 5 детонаційна хвиля розпадається, утворюючи продукти згоряння газової суміші 6. Одночасно з заповненням ствола вибуховою сумішшю вводять напилений порошок

Метод відноситься до циклічних процесів. Виділяються три його складові ($\tau_{ц}$): час, необхідний для заповнення камери і ствола газовою сумішшю (τ_3); час, що затрачується на утворення вибуху і викиду продуктів детонації і порошку ($\tau_в$); час продування камери і ствола ($\tau_{пр}$)

$$\tau_{ц} = \tau_3 + \tau_в + \tau_{пр}.$$

Час циклу складає 0,2-1с. Прагнуть мінімальних значень $\tau_{ц}$ і, тим самим, максимальної продуктивності. Протягом одного циклу на поверхню напилення наноситься 30-100 мг порошку.

У процесі ДГН обов'язкова присутність технологічного газу, в якості якого частіше всього використовують: азот, аргон, повітря. Призначення технологічного газу:

1. Регулювання умов протікання детонаційно-газового вибуху і тим самим продуктивності напилення. Вплив добавок азоту на характеристики вибуху еквімолярної суміші $C_2H_2-O_2$ ілюструється даними, наведеними в таблиці 2.4.

2. Запобігання сажеутворення. Для цього вміст технологічного газу в робочій суміші, як правило, знаходиться на рівні 10-15% об.
3. Очищення робочої камери (ствола) від продуктів детонаційно-газового вибуху.
4. Замикання каналів робочих газів під час дії вибуху (в установках з пневмоавтоматикою).

Таблиця 2.4 - Вплив добавок азоту на характеристики вибуху еквімолярної суміші $C_2H_2-O_2$

Характеристика	Добавки N_2 , моль		
	0	3	4
Тиск вибуху, МПа	0,5	0,23	0,22
Температура вибуху, К	4560	3300	3110
Швидкість продуктів детонації, м/с	1375	880	870
Швидкість детонаційної хвилі теоретична, м/с	2960	2170	2020

2.5.3 Класифікації способів ДГН

1. За типом пальної суміші:
 - з використанням пальних газів (C_2H_2 , H_2 і др.);
 - з використанням пальних рідин (гас, бензин і ін.).
2. За способом запалення:
 - з форкамерним запаленням;
 - без камер запалення.
3. За розташуванням стволів установки:
 - з вертикальним розташуванням стволів;
 - з горизонтальним розташуванням стволів.
4. За числом стволів:
 - одноствольні;
 - багатоствольні.
5. За геометрією стволів:
 - зі стволами постійного перетину;
 - зі стволами змінного перетину;
 - з прямолінійними стволами;
 - зі стволами у вигляді змійовика.

2.5.4 Параметри процесу ДГН і їх вплив на ефективність напилення

I. Конструктивні параметри розпилювача

Найбільший вплив на ефективність процесу надають: діаметр ствола (d_c), його довжина (l_c) і форма.

- *діаметр (калібр) ствола*

Зазвичай калібр ствола вибирають в межах 8-40 мм. У стволах малого діаметра утруднені умови протікання детонаційно-газового вибуху і великі втрати тепла. Із збільшенням його калібру росте продуктивність процесу, але через гравітацію стає все більш нерівномірним розподіл порошку по перетину ствола, утруднюється експлуатація установки.

- *довжина ствола*

Звичайно її вибирають в межах 1200-2000 мм. Мінімальна довжина ствола повинна бути не менше переддетонаційної відстані. Максимальну довжину ствола вибирають виходячи з умов отримання найвищих швидкостей напилених частинок і формування потоку заданої конфігурації.

Великий вплив на ефективність напилення надають форма детонаційного каналу, чистота його поверхні, відношення l_c/d_c , наявність форкамери та ін. До конструктивних параметрів відноситься також швидкострільність установки. З її збільшенням зростає продуктивність процесу і знижується вплив гравітаційних сил при введенні порошку в детонаційну суміш. Для усунення гравітації при $d_c=25$ мм необхідна швидкострільність не менше 14 циклів в секунду. Звичайно швидкострільність установок знаходиться на рівні 1-4 цикли за секунду.

II. Параметри режиму роботи детонаційно-газового розпилювача

Найбільш значущими параметрами є рід і витрати газів, що входять в детонаційну суміш, співвідношення між палимим газом і киснем.

Найвища ефективність досягається при використанні для утворення детонуючої суміші ацетилену, менша - пропанобутанових сумішей. Це обумовлено високими значеннями теплофізичних властивостей цих газів. Звичайно витрати ацетилену складають 0,2-6,0 м²/г залежно від конструкції установки. Із збільшенням витрати основних газів продуктивність напилення зростає.

Найвищі показники ефективності досягаються при еквімолярному співвідношенні між ацетиленом і киснем. Проте в цьому випадку в продуктах розпаду детонаційної хвилі присутній вуглець у вигляді сажі, що негативно

впливає на якість покриттів. Тому при використанні ацетилену оптимальне значення β вище, ніж при ГПН, і складає 1,21-1,25.

III. Параметри матеріалу, що розпилюється і умови введення його в розпилювач

При ДГН матеріал, що розпилюється, використовується у вигляді порошку діаметром 10-50 мкм. Більш крупні частинки розігріваються і пришвидчуються недостатньо для утворення міцних зв'язків. Порошки малої щільності повинні мати великі швидкості. Подачу порошку в розпилювач ведуть як в осьовому, так і в радіальному напрямі. Для установок невеликої потужності продуктивність складає 0,5-1,5 кг/г. В потужних установках вона досягає 12 кг/г.

Завантаженість порошком пальної суміші складає 0,2-0,6 кг/м³. Найвищі швидкості частинок реалізуються при подачі порошку на відстані 200-400 мм від зрізу сопла.

IV. Параметри, що характеризують зовнішні умови напилення

Їх вплив на ефективність детонаційно-газового напилення покриттів аналогічний іншим методам ГТН. Дистанція напилення при ДГН звичайно складає 50-200 мм

V. Параметри детонаційної хвилі, продуктів її розпаду і потоку напилених частинок

Найбільш значущими параметрами є температура, ентальпія і швидкість газового потоку в середині каналу ствола і на виході з нього. В основному ці параметри залежать від складу і витрати робочої детонуючої газової суміші. Температуру детонаційної хвилі ($T_{дх}$) оцінюють значеннями 4000-5700°К, а швидкість ($V_{дх}$) 2000-3000 м/с. Продукти розпаду детонаційної хвилі мають менші показники: $T_{пр} = 3000-4000°К$, $V_{пр} = 1000-2000$ м/с.

При детонаційному вибуху тиск газової суміші, що розвивається у середині каналу ствола, складає 0,2-0,75 МПа. Слід зазначити, що всі параметри вихідної газової суміші (тиск, температура, густина і об'єм) змінюються у момент вибуху стрибкоподібно. Дульне полум'я, що утворюється на виході із ствола, в нагріві і прискоренні напилених частинок суттєвої ролі не грає. Швидкість і температура полум'я швидко знижуються на відстані 40-70 мм від зрізу ствола.

Параметри потоку напилених частинок характеризуються наступними величинами. Температура частинок в більшості випадків нижча за температуру

плавлення матеріалу, що розпилюється. Певно слід обирати температури нагріву частинок близькими до температури солідуса. Розплавлені частинки при їх високих швидкостях у момент удару мають розбризкуватися. Експериментами показано, що при детонаційно-газовому напиленні температура частинок поблизу поверхні напилення може досягати 1673-1873°K і більш. Швидкість частинок знаходиться в межах 800-1500 м/с. Прагнуть до реалізації максимальних швидкостей. Це полегшує утворення міцних зв'язків при контактуванні. Високошвидкісні потоки частинок забезпечують отримання найякісніших покриттів із всіх методів газотермічного напилення. Пористість покриттів не перевищує 1%, адгезійна міцність може перевищувати 100 МПа. Розподіл швидкості і температури частинок по осі потоку і в перетинах підкоряється загальним закономірностям газотермічного напилення. Проте при ДГН воно значно більш сприятливе. У багатьох випадках розкидом цих параметрів можна нехтувати. Виняток становлять периферійні частинки, що знаходяться в ділянках біля стінок каналу ствола.

Взаємодія нерозплавлених напилених частинок з газовою фазою не приводить до суттєвої зміни їх хімічного складу. Проте, слід враховувати окислювально-відновний потенціал високотемпературної газової суміші і можливість утворення в ній вільного вуглецю у вигляді сажі. В потоках нерозплавлених частинок слабо виявляються такі процеси, як випаровування, сублімація і дисоціація.

Густина потоку частинок по плямі напилення, як і при інших методах газотермічного напилення, підкоряється закону нормального розподілу. Інтегральна густина частинок по плямі напилення складає 10^3 - 10^5 ч/см²·с. Параметри потоку частинок визначають коефіцієнт використання порошку. Для цього методу $K_m = 0,3$ - $0,6$.

2.5.5 Основні переваги і недоліки ДГН

а) Основні переваги:

- 1) висока якість напилених покриттів;
- 2) можливість напилення покриттів на холодні вироби;
- 3) достатньо висока продуктивність (1-12 кг/г);
- 4) широка номенклатура напилених матеріалів;
- 5) невисока чутливість до стану поверхні.

б) можливість напилення на вироби практично будь-якої форми і розмірів;

7) незначна взаємодія частинок з газами.

б) Основні недоліки:

1) утруднено нанесення покриттів на вироби з підвищеною твердістю поверхні ($HRC > 60$);

2) складність формування покриттів з порошків з малою питомою масою (карбід титану і ін.);

3) високий рівень шуму (до 140 дБ і більш). Тому напилення ведуть в звукоізолюючих боксах;

4) достатньо висока вартість устаткування.

2.6. Способи і технологічні особливості електродугової металізації (ЕДМ)

2.6.1 Електрична дуга як джерело нагріву матеріалу, що розпилюється

Узагальнена схема процесу напилення покриттів методом електродугової металізації наведена на рисунку 2.26.

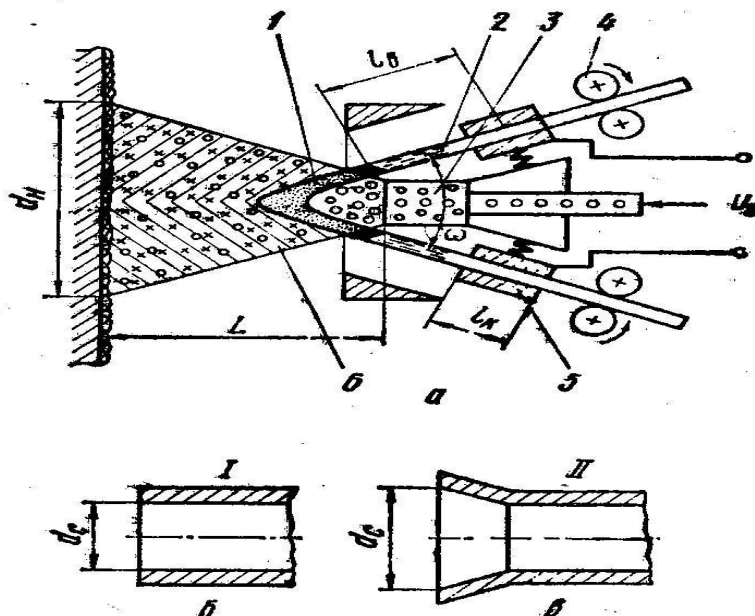


Рисунок 2.26 - Узагальнена схема електродугової металізації: I-циліндричне сопло; II- циліндричне сопло в поєднанні з конічним; l_k - довжина контактних пристроїв; l_b - довжина вильоту дроту

При ЕДМ нагрів і плавлення матеріалу, з якого формується покриття, здійснюється в активних плямах електричної дуги. Його розпилення і перенесення до поверхні основи здійснюється потоком стислого газу, у якості якого переважно використовується повітря.

Найбільше поширення набула двоелектродна схема (див. рис. 2.26).

Розпилений матеріал у вигляді дроту 2 діаметром 1-5 мм подається в зону горіння дуги 1 механізмом подачі 4. Напряга від джерела живлення U_0 проводиться до електроконтактних пристроїв 5. Між електродами, що схрещуються, розташовується газове сопло 3, призначене для створення високошвидкісного потоку газу, що розпилює. Горіння дуги відбувається в специфічних умовах:

1) Дуга горить на кінцях плавких електродів.

Площа її опорних плям мала, оскільки діаметр дроту, що використовується для розпилення, знаходиться в межах 1,0-3,5 (5,0) мм.

2) Дуга в процесі горіння охолоджується потужною струминою холодного газу. Це обумовлює високий ступінь обтиснення (контрагування) стовпа дуги, що перевищує такий для плазмового напилення.

3) Стовп дуги виноситься за межі активних плям.

Важливою особливістю горіння дуги є непостійність її довжини. Залежно від умов можливі два механізми горіння дуги:

- з періодичними короткими замиканнями;
- без коротких замикань.

Характер горіння дуги, перш за все, визначається родом струму і режимом процесу. При живленні її змінним струмом коротких замикань уникнути не можна. При використанні джерел постійного струму можливі обидва режими горіння. Найбільш доцільно вести розпилення без коротких замикань, оскільки при цьому стабілізується плавлення і розпилення металу. Навіть при горінні електричної дуги без коротких замикань простежується його циклічність. Чітко простежуються дві стадії в циклі горіння:

1 стадія. Початкова - відповідає періоду збудження дуги

$$\tau = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ с.}, U_d = \min; I_q = \min.$$

2 стадія. Винесення дуги за межі міжелектродного простору і стабільне її горіння протягом деякого часу. Цей період супроводжується інтенсивним плавленням матеріалу, що розпилюється

$$\tau = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ с.}, U_d = \max; I_q \approx \text{const.}$$

Розділовий етап між циклами - скидання металу і перехід до процесу збудження дуги в наступному циклі. Смуга частот знаходиться в межах 250-2500Гц.

При нагріві дугою торців електродів фронт їх плавлення орієнтується під кутом ϕ до осі дроту. Оптимальні значення кута встановлюються автоматично залежно від режиму роботи розпилювача. Наприклад, при постійних значеннях кута схрещування електродів ω і швидкості подачі дроту зміна потужності дуги приводить до зміни кута нахилу фронту плавлення. В цьому виражається процес саморегулювання системи. Тому при живленні дуги постійним струмом, не дивлячись на різне тепловиділення на катоді і аноді, швидкість подачі обох дротів однакова. Теплота, що виділяється в активних плямах дуги, практично повністю витрачається на плавлення електродного дроту. Енергетичний ККД розпилення при ЕДМ має найвищі значення зі всіх методів ГТН і досягає 0,7-0,9.

2.6.2 Класифікація способів ЕДМ

Способи ЕДМ класифікують, в основному, за наступними ознаками:

1) *за кількістю електродів:*

- а) двоелектродна схема напилення;
- б) триелектродна схема напилення.

2) *за ступенем механізації процесу*

- а) ручна металізація;
- б) механізований процес.

2.6.3 Параметри ЕДМ і їх вплив на ефективність процесу

I. Конструктивні параметри розпилювача

- Найбільший вплив на процес розпилення надають форма і розміри сопла. В основному, застосовують циліндрові сопла. Для створення ефективного потоку, що розпилює, такі сопла вимагають великої витрати газу (50-150 м³/г). Звичайно циліндрові сопла працюють в режимі «недорозширення». Статичний тиск газу на зрізі сопла вище атмосферного. В цьому випадку струмінь дорозширюється за його межами. Такий режим роботи відносять до нерозрахункових. В надзвуковому струмені нерозрахункового режиму виникають стрибки ущільнення, що супроводжуються ударними хвилями. На їх створення затрачується значна частина енергії струменя. В умовах «недорозширення» її здатність розпиляти падає. Відзначені недоліки значною мірою усуваються при вживанні циліндрових сопел в поєднанні з

конічною частиною, що розширюється.

Діаметр циліндрових сопел вибирається в межах $d_c=4-6$ мм. В конічній частині, що розширюється, $d_c=6,5 - 8,5$ мм. Загальна довжина сопла складає 30-50 мм.

- Кут схрещування електродів ω впливає на формування потоку напилених частинок. При малих кутах часто спостерігається утворення двох потоків частинок відповідно з кожного дроту. Великі кути утрудняють конструктивне виконання розпилювача; на практиці $\omega=30^\circ$.

- Конструкція пристроїв електроконтактів. Зі збільшенням довжини контакту (l_k) знижується сумарне падіння напруги. Допускається сумарне падіння напруги, що не перевищує 0,8-1,0 В на 1000 А. Більш досконалі конструкції забезпечують $\Delta U=0,2-0,3$ В на 1000 А.

- Число електродів - 2 або 3 (для трифазного струму).

Конструктивні параметри електродугового розпилювача визначають його тепловий ККД ($\eta_{т.р.}$), що має високі значення (0,8-0,9).

III. Параметри режиму роботи розпилювача

Найважливішими параметрами режиму роботи є: потужність дуги і витрата газу, що розпиляє.

Процес розпилення доцільно проводити при мінімальних значеннях питомої енергії, що затрачується на плавлення, перегрів і випаровування металевих частинок. Ентальпія частинок легко регулюється зміною питомої потужності дуги N_d^* . В практиці напильника цей параметр знаходиться в широких межах і складає 2000-10000 кДж/кг. Із збільшенням N_d^* зростають втрати перегрітого металу на випаровування і розбризкування при формуванні покриття. Проте збільшення ентальпії і температури частинок позитивно впливає на якість покриттів (рис. 2.27). Експериментальними дослідженнями встановлено, що при електродуговій металізації алюмінієм підвищення N_d^* з 3000 до 8500 кДж/кг (при постійній швидкості подачі дроту) зумовлює зростання температури напилених частинок з 1173 до 2173° К.

Потужність дуги (N_d) визначає як продуктивність процесу, так і ентальпію потоку частинок. Вона визначається значеннями струму і напруги. Напруга дуги звичайно не є регульованим параметром. Необхідну величину потужності встановлюють за допомогою зміни сили струму. В практиці електродугової металізації використовують потужності від 5 до 20 кВт, силу струму 80-600 А і напругу 18-35В.

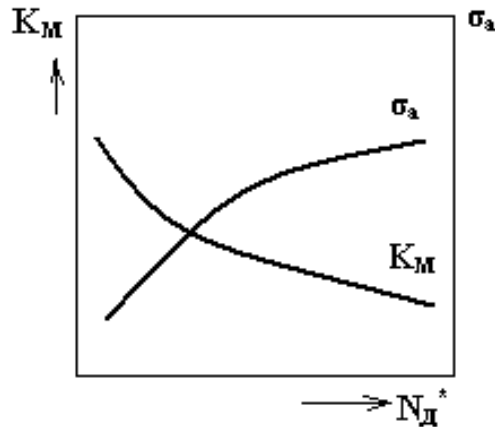


Рисунок 2.27 - Вплив питомої потужності дуги на коефіцієнт використання матеріалу (K_M) і адгезійну міцність покриттів (σ_a)

Збільшення тиску газу, a , отже, і його витрати приводять до зростання швидкості струменя і його здатності щодо розпилення. Необхідно прагнути надзвукового характеру витікання з мінімальним перепадом тиску на зрізі сопла. При цьому полегшується евакуація розплавленого металу з поверхні плавлення дроту, його диспергування і зростання швидкості частинок. На практиці тиск газу, що розпилює, вибирають рівним 0,35-0,55 МПа. При цьому його витрата складає 50-150 м³/г. В якості газу, що розпилює, в основному, використовують стисле повітря.

III. Параметри, що характеризують розпилений матеріал і умови введення його в розпилювач

Для електродугової металізації використовується матеріал у вигляді дроту.

Найбільш значущими параметрами є: діаметр електродного дроту d_d і швидкість його подачі. Звичайно d_d вибирають в межах 1,0-3,5 мм і більш. При максимальних d_d можна добитися більш високої продуктивності.

Необхідно враховувати, що із збільшенням діаметра дроту посилюється турбулізація струменя, що розпилює, і зменшується довжина його активної ділянки, в межах якої, в основному, відбувається диспергування частинок (рис. 2.28). Коефіцієнт турбулізації α може бути визначений із залежності

$$\alpha = (0,4d_d/d_c)^{2,56} + \alpha_1,$$

де α_1 - коефіцієнт турбулізації при вільному витіканні струменя в соплі.

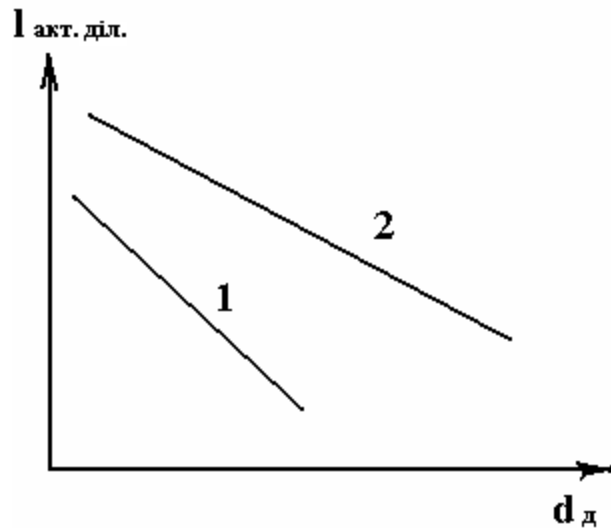


Рисунок 2.28 - Вплив діаметра дроту на довжину активної ділянки газового струменя: 1 - циліндрове сопло; 2 - циліндрове в поєднанні з конічним

Малі діаметри дроту ускладнюють процес. При цьому потрібна висока швидкість подачі; спостерігається інтенсивне блукання плавких торців дроту. Швидкість подачі дроту вибирають максимальною для заданого режиму роботи розпилювача. Завдяки цьому досягаються мінімальні значення питомої потужності дуги (N_d^*). В практиці електродугової металізації швидкість подачі дроту складає 0,05-0,35 м/с, а продуктивність розпилення $G_n = 2-50$ кг/г.

Суттєвий вплив на процес надає довжина вильоту дроту з контактної пристрою l_v . З його збільшенням зростає кількість тепла, що виділилося в ньому. Особливо це характерно для металів з підвищеним питомим електроопором (нержавіюча сталь, титан, нікель і ін.). Для таких металів швидкість плавлення дроту зростає на 10-20%. Збільшення вильоту приводить до небажаного блукання торців дроту. Величину зміщення дроту в процесі її розпилення допускають $\Delta \leq 1/4 d_n$.

IV. Параметри, що характеризують зовнішні умови напилення

Їх вплив на ефективність процесу електродугової металізації аналогічний такому для інших методів ГТН. Дистанція напилення при ЕДМ зазвичай знаходиться в межах 60-150 мм

V. Параметри струменя і потоку частинок матеріалу, що розпилюється

Середньомасова температура газу безпосередньо за межами стовпа дуги достатньо висока. Проте температура по осі і в перетинах швидко падає. Цьому сприяє турбулізація газового потоку схрещеними електродами. Додаткового нагріву розпиленних частинок на початковій ділянці струменя не відбувається. На основній ділянці струменя частинки охолоджуються.

Швидкість струменя, що розпилює, максимальна на зрізі сопла і зберігається практично постійною в межах початкової ділянки. Вона оцінюється значеннями, близькими до звукових або дещо їх перевищуючими. Зрив з фронту плавлення розплавленого металу і його диспергування відбуваються в межах початкової ділянки високотемпературним потоком газу або так званим «жорстким» струменем. На цій ділянці розпилені частинки одержують значне прискорення.

У момент диспергування металу розпилені частинки, що утворюються, знаходяться в рідкому стані. Їх середній розмір орієнтовно може бути оцінений за рівнянням

$$d_r = K_1 K_2 \sqrt[3]{G_n / \rho \cdot \mu},$$

де G_n - продуктивність розпилення; ρ - щільність матеріалу, що розпилюється; μ - коефіцієнт, що враховує безперервність горіння дуги ($\mu_{\max} = 1$); K_1 - константа, залежна від властивостей матеріалу, що розпилюється (для сталі 1,61; алюмінію 1,45; цинку 1,64; олова 0,85); K_2 - константа, залежна від радіуса і форми сопла (для циліндрових сопел $K_2 = 3,75/r_c + 0,29$). При розпиленні вуглецевих сталей більшість частинок має розмір 30-50 мкм. Для інших металів 10-100 мкм.

По мірі віддалення від вогнища плавлення і розпилення швидкість частинок падає. Поблизу поверхні напилення швидкість газового струменя і потоку напилених частинок приблизно однакові і складають 50-150 м/с. Завдяки високим швидкостям і перегріву металу при плавленні, більшість частинок поступає на поверхню напилення в розплавленому стані. В першу чергу це справедливо для крупних частинок (40-100 мкм і більш).

Висока продуктивність розпилення визначає велику густину потоку напилених частинок поблизу поверхні формування шару покриття. Їх оцінюють значеннями $10^3 - 10^5$ ч/см²·с.

Струмінь, що розпилює, протягом всього часу складається з повітря.

Тому створюються сприятливі умови для окислення металу, що розпилюється, і насичення його азотом.

2.6.4 Основні переваги і недоліки ЕДМ, галузі застосування

а) Основні переваги:

- висока продуктивність, що досягає 50 кг/г;
- високі значення енергетичного і ефективного ККД розпилення;
- економічність процесу.

б) Основні недоліки:

- активна взаємодія частинок з газами при напиленні;
- матеріал, що наноситься, може бути використаний тільки у вигляді дроту;
- високий рівень шуму.

Основні області використання:

- нанесення корозієстійких покриттів (Zn, Al і ін.);
- нанесення зносостійких покриттів (бронзи, сталі і ін.);
- нанесення композиційних покриттів (сталь+мідь, мідь+олово і ін.).

Навчальне видання

Рожков Олександр Дмитрович

ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Частина I

Навчальний посібник

Тем. план 2008, поз. 271

Редактор О.І. Лук'янець

Підписано до друку 26.08.08. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. 3,0. Умов. друк. арк. 2,95. Тираж 100 пр. Замовлення №

Національна металургійна академія України
49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

