

О. П. Шиліна, В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук

ВАКУУМНО - КОНДЕНСАЦІЙНЕ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. П. Шиліна, В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук

ВАКУУМНО - КОНДЕНСАЦІЙНЕ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів напряму підготовки 0923 - "Зварювання" Протокол № 11 від "30" червня 2005 р.

Вінниця ВНТУ 2007

УДК 621.762

Ш 23

Рецензенти:

П. С. Берник, доктор технічних наук професор

І. О. Сивак, доктор технічних наук професор

Ж. П. Дусанюк, кандидат технічних наук доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

О. П. Шиліна, В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук

Ш 23 **Вакуумно-конденсаційне напилювання покритть.**

Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 96 с.

В навчальному посібнику розглянуті фундаментальні основи технологічних процесів вакуумно-конденсаційного напилювання покритть. Посібник розроблений у відповідності з планом кафедри та програмам дисциплін "Розпилюючі пристрої та устаткування" та "Технологія та обладнання для напилення".

УДК 621.382

© О. Шиліна, В. Савуляк, А. Осадчук 2007

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВАКУУМНИХ КОНДЕНСАЦІЙНИХ МЕТОДІВ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ	7
1.1 Методи вакуумного конденсаційного напилювання і їхня класифікація	7
1.2 Основні загальні параметри вакуумного конденсаційного напилювання і їхній вплив на ефективність процесу	10
1.2.1 Конструктивні параметри.....	11
1.2.2 Параметри режиму роботи розпилювача.....	11
1.2.3 Параметри речовини, що розпилюється, і умови введення в зону розпилення.....	12
1.2.4 Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання	13
1.2.5 Параметри потоку напилюваних частинок	16
1.3 Способи і технологічні особливості вакуумного конденсаційного напилювання покритть термічним випаровуванням	17
1.3.1 Резистивне нагрівання при напилюванні покритть	23
1.3.2 Високочастотне індукційне нагрівання при напилюванні покритть термічним випаровуванням.....	24
1.3.3 Електронно-променеве нагрівання при вакуумному конденсаційному напилюванні покритть.....	25
1.3.4 Дугове нагрівання при напилюванні покритть термічним випаровуванням	26
1.3.5 Способи підвищення енергії напилюваних частинок при термічному випаровуванні.....	28
1.4 Способи і технологічні особливості вакуумного конденсаційного напилювання покритть вибуховим розпиленням	29
1.4.1 Напилювання покритть вибуховим розпиленням матеріалу дугою низького тиску.....	29
1.4.2 Параметри режиму напилювання і їхній вплив на ефективність процесу	31
1.4.3 Параметри режиму роботи розпилювача.....	32
1.4.4 Області застосування методу. Переваги і недоліки	33
1.5 Способи і технологічні особливості вакуумного конденсаційного напилювання покритть іонним розпиленням	33
1.5.1 Діодна схема іонного розпилення	36
1.5.2 Тріодна схема іонного (катодного) розпилення.....	37
1.5.3 Магнетронна схема іонного (катодного) розпилення	38
1.5.4 Параметри вакуумного конденсаційного напилювання і їхній вплив на ефективність процесу	39
1.5.5 Переваги і недоліки напилювання покритть іонним розпиленням	43
1.6 Вакуумне конденсаційне реакційне напилювання покритть	43

2 УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ	46
2.1 Основні елементи установок і їхня класифікація	46
2.1.1 <i>Вимоги, що висуваються до установок</i>	47
2.1.2 <i>Компонування установок</i>	47
2.2 Вакуумна система установок	48
2.2.1 <i>Компонування вакуумних систем установок</i>	48
2.2.2 <i>Робоча камера</i>	49
2.2.3 <i>Вакуумні насоси</i>	49
2.3 Пристрої для випаровування і розпилення матеріалу. Розпилювачі	50
2.3.1 <i>Термічні випарники (розпилювачі)</i>	50
2.3.2 <i>Вибухові розпилювачі (випарники)</i>	54
2.3.3 <i>Іонні розпилювачі</i>	54
2.4 Системи електроживлення в установках для вакуумного конденсаційного напилювання	55
2.4.1 <i>Силові джерела електроживлення</i>	55
2.4.2 <i>Джерела живлення дуги в дугових випарниках (розпилювачах)</i> .57	
2.4.3 <i>Джерела живлення тліючого розряду в установках іонного розпилення</i>	58
2.4.4 <i>Високовольтні джерела електроживлення</i>	60
2.5 Установки для вакуумного конденсаційного напилювання покриттів	61
2.5.1 <i>Установки періодичної дії</i>	61
2.5.2 <i>Установки для вакуумного напилювання покриттів термічним випаровуванням</i>	62
2.5.3 <i>Установки для вакуумного напилювання покриттів вибуховим дуговим розпиленням</i>	64
2.5.4 <i>Установки для вакуумного напилювання покриттів іонним розпиленням</i>	65
2.5.5 <i>Установки для вакуумного напилювання покриттів термічним випаровуванням і іонним розпиленням</i>	65
2.5.6 <i>Установки для вакуумного напилювання покриттів напівбезперервної дії</i>	67
2.5.7 <i>Установки для вакуумного напилювання покриттів безперервної дії</i> 68	
3 ТЕХНОЛОГІЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО І ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ	69
3.1 Вибір типу покриттів	69
3.2 Вибір складу покриття і його товщини.....	70
3.2.1 <i>Вимоги, пропоновані до покриттів</i>	72
3.2.2 <i>Правила приймання</i>	72
3.3 Застосування проміжних шарів.....	72
3.4 Вибір методів і способів напилювання покриттів	74
3.5 Порошки для газотермічного напилювання і способи їхньої підготовки .75	
3.5.1 <i>Однокомпонентні порошки</i>	75

3.5.2	Композиційні порошки.....	75
3.5.3	Одержання композиційних порошків.....	78
3.6	Дріт і стрижні для газотермічного напилювання покрить. Способи їх підготовки.....	79
3.7	Матеріали, що розпилюються, для вакуумного конденсаційного напилювання покрить	80
3.8	Підготовка поверхні напилюваних виробів.....	81
3.8.1	Знежирення напилюваних виробів.....	82
3.8.2	Очищення напилюваних поверхонь від хімічно зв'язаних з'єднань..	83
3.8.3	Очищення поверхні електричними газовими розрядами	84
3.8.4	Очищення поверхні розпилюваними часткинами	87
3.9	Наступна обробка напилених покрить.....	88
3.9.1	Зміцнювальна обробка	88
3.9.2	Спікання	88
3.9.3	Просочення	88
3.9.4	Оплавлення.....	89
3.9.5	Пластичне деформування	90
3.9.6	Механічна обробка напилених покрить.....	90
3.10	Контроль напилених покрить.....	91
3.10.1	Визначення товщини покриття.....	91
3.10.2	Зовнішній огляд покриття.....	92
3.10.3	Виявлення прихованих дефектів.....	92
3.10.4	Оцінювання адгезионної міцності.....	92
3.11	Технологічна схема газотермічного й вакуумного конденсаційного напилювання покрить	92
	ЛІТЕРАТУРА.....	94

ВСТУП

Основними показниками якості машин є надійність і ККД, що переважно визначаються властивостями поверхневих шарів деталей і з'єднань (границею витривалості, корозійною стійкістю, зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, контактною твердістю, міцністю посадок, герметичністю з'єднання й ін.). Кожна зупинка (останов) машини через ушкодження окремих її елементів або зниження технічних характеристик нижче припустимого рівня, як правило, спричиняє великі матеріальні збитки, а в окремих випадках приводить до катастрофічних наслідків. У наш час біля 15 — 30% щорічної виплавки металів витрачається на відновлення втрат на корозію. Втрати засобів у машинобудуванні розвинених держав внаслідок тертя і зносу досягають 4,5 % національного доходу. На опір тертю в усьому світі іде 30 — 40 % всієї енергії, що виробляється.

Досягнення високої якості й експлуатаційної надійності машин, а також їх більш низької вартості, що є умовою забезпечення високого й стійкого рівня ринкової конкурентноздатності, можливе лише на основі нових наукомістких технологій напилення та відповідного обладнання.

Сучасний рівень технології вакуумно-конденсаційного напилювання дозволяє здійснювати зміцнення деталей машин, одержувати спеціальні покриття з унікальними властивостями.

Вакуумно-конденсаційне напилювання розвилось в особливу технологію поверхневої обробки матеріалів, і відрізняється великою своєрідністю й галузями застосування.

Навчальний посібник написаний для студентів напрямку підготовки 0923 — “Зварювання”, відповідає навчальним програмам дисциплін "Розпилюючі пристрої та устаткування" та "Технологія та обладнання для напилення" спеціальності 6.092300 — “Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій”. Так в III розділі додатково розглянуто технології газотермічного напилення.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВАКУУМНИХ КОНДЕНСАЦІЙНИХ МЕТОДІВ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

1.1 Методи вакуумного конденсаційного напилювання і їхня класифікація

У методах і технологічних особливостях вакуумного конденсаційного напилювання (ВКН) покриттів є багато загального. У зв'язку з цим є доцільним розглянути узагальнену схему процесу (рис. 1).

Відомо, що покриття при вакуумному конденсаційному напилюванні формуються з потоку частинок, що знаходяться в атомарному, молекулярному або іонізованому стані. Потік частинок отримують розпиленням матеріалу за допомогою впливу на нього різними енергетичними джерелами. Розрізняють розпилення матеріалу, який наносять, методом термічного випаровування, вибухового випаровування, іонним розпиленням твердого матеріалу. Процес ВКН проводять у жорстких герметичних камерах при тиску $13,3 — 133 \cdot 10^{-3}$ Па. Завдяки цьому забезпечується необхідна довжина вільного пробігу розпилюваних частинок і захист процесу від взаємодії з атмосферними газами.

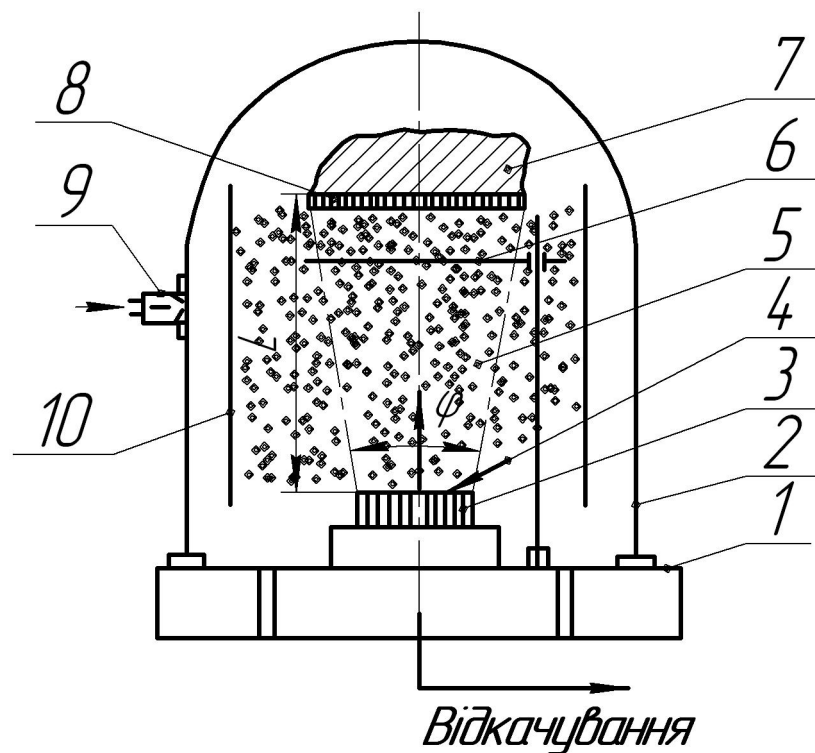


Рисунок 1 — Узагальнена схема процесу вакуумного конденсаційного напилювання покриттів: 1—базова плита; 2—камера; 3—матеріал, що розпилюється; 4—підведення енергії для розпилення матеріалу; 5—потік розпилюваних частинок; 6—заслінка; 7—напилюваний виріб; 8—покриття; 9—наповнювач робочого газу; 10—екран

У загальному випадку рушійною силою перенесення частинок у напрямку до поверхні напилювання є різниця в парціальних тисках парової фази. Найбільш високі тиски пари, що досягають 133 Па і більше, спостерігаються поблизу поверхні розпилення (випаровування). Це й обумовлює переміщення частинок у напрямку напилюваного виробу, де тиск пари мінімальний. Інші сили переносу можуть бути введені для частинок, що знаходяться в потоці в іонізованому стані. У цьому відношенні напилювання покриття з іонізованих парових потоків переважає. Крім того, іонізовані частинки мають більшу енергію. Це полегшує формування покриття високої якості.

Процес вакуумного конденсаційного напилювання покриття доцільно розглядати таким, що складається з трьох стадій: 1) перехід конденсованої фази (твердої або рідкої) у газоподібну (пара); 2) формування потоку і перенос розпилюваних частинок на поверхню напилювання; 3) конденсація пари на поверхню напилювання — формування покриття.

Для одержання якісних покриттів необхідне гнучке керування цими процесами, за допомогою створення оптимальних режимів їхнього протікання.

Дві перші стадії значною мірою визначають третю стадію. Це, зокрема, видно з формул, що визначають швидкість осадження покриття (V_n).

Для точкового джерела розпилення (випаровування) $S_{роз} \ll L$

$$V_n = \frac{V_p S \cos \alpha}{4\pi L^2}, \quad (1.1)$$

Для плоского джерела

$$V_n = \frac{V_p S \cos \alpha \cos \theta}{\pi L^2}, \quad (1.2)$$

де V_p — швидкість розпилення (випаровування);

S — площа розпилення;

L — дистанція напилювання;

α — кут між напрямком потоку частинок і нормаллю до поверхні напилювання;

θ — кут між напрямком потоку частинок і нормаллю до поверхні розпилення (випаровування).

З наведених залежностей виходить, що загальними параметрами процесу вакуумного конденсаційного напилювання є швидкість і площа розпилення, а також напрямок потоку щодо поверхні напилювання і дистанція.

Перша стадія процесу повинна забезпечувати, поряд з регульованою швидкістю і площею розпилення, відсутність у потоці конденсованої фази у вигляді рідких або твердих частинок. В другій стадії необхідно прагнути до формування потоку з максимальним ступенем іонізації парової фази. Завдяки цьому створюються умови для підвищення енергії розпилюваних частинок і керування потоками (фокусування, відхилення) і ін.

Методи і способи вакуумного конденсаційного напилювання класифікують за різними ознаками.

Класифікація за способами розпилення матеріалу і формування потоку розпилюваних частинок: термічним випаровуванням матеріалу з твердого або розплавленого стану, вибухоподібним (інтенсифікованим) випаровуванням — розпиленням; іонним розпиленням твердого матеріалу.

Класифікація за енергетичним станом розпилюваних частинок: напилювання нейтральними частинками (атомами, молекулами) з різним їхнім енергетичним станом; напилювання іонізованими частинками; напилювання іонізованими прискореними частинками. У реальних умовах у потоці присутні різні частинки.

Класифікація за способом взаємодії розпилюваних частинок із залишковими газами камери: напилювання в інертному розрідженому середовищі або високому вакуумі ($133 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$); напилювання в активному розрідженому середовищі ($133 \text{—} 133 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$).

Введення в камеру активних газів дозволяє перейти до способу вакуумного реакційного напилювання покрить. Напилюванні частинки в потоці або на поверхні конденсації вступають у хімічну взаємодію з активними газами (киснем, азотом, чадним газом і ін.) і утворюють відповідні з'єднання: оксиди, нітриди, карбіди й ін.

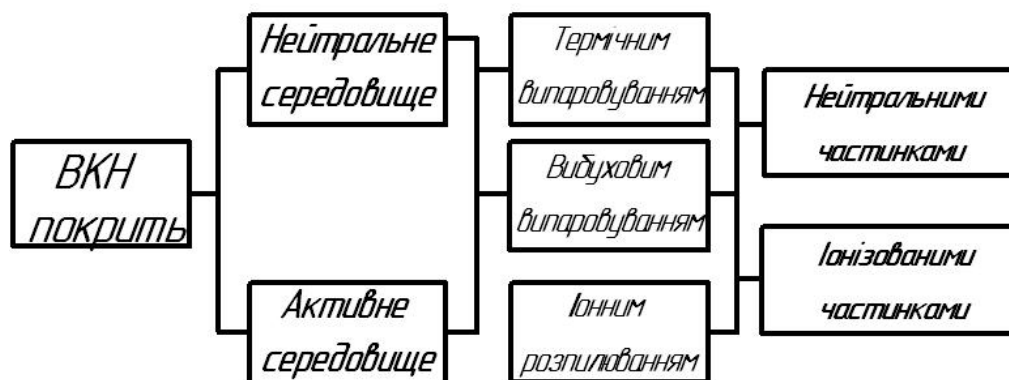


Рисунок 2 — Класифікація методів і способів вакуумного конденсаційного напилювання покрить

Схематично класифікація вакуумного конденсаційного напилювання (ВКН) покрить показана на рис. 2. Вибір методу напилювання і його різновидів (способів) визначається вимогами, що ставляться до покрить з урахуванням економічної ефективності, продуктивності, простоти керування, автоматизації й ін. Найбільш перспективні способи вакуумного конденсаційного напилювання з іонізацією потоку розпилюваних частинок, стимульовані плазмою. Часто їх називають іонно-плазмовими.

До виробів, напилюваних вакуумним конденсаційним методом, висуваються такі основні вимоги: розміри напилюваних виробів повинні відповідати технічному рівневі створення сучасних установок; матеріал напилюваного виробу повинний мати невисокий тиск насиченої пари при температурі процесу; можливість нагрівання поверхні напилювання для підвищення адгезійної міцності покрить.

Вакуумне конденсаційне напилювання покрить широко застосовують у різних галузях техніки. Вакуумним реакційним напилюванням створюються зносостійкі покриття на вироби різного призначення: пари тертя, пресовий, різальний інструмент й ін.

Переваги вакуумного конденсаційного напилювання полягають у високих фізико-механічних властивостях покрить, можливості одержання покрить із синтезованих з'єднань (карбідів, нітридів, оксидів і ін.); нанесення тонких і рівномірних покрить; використання для напилювання широкого класу неорганічних матеріалів.

Технологічні процеси, що пов'язані з вакуумним конденсаційним напилюванням, не забруднюють навколишнє середовище і не порушують екологію. У цьому відношенні вони вигідно відрізняються від хімічних і електролітичних методів нанесення тонких покрить.

До недоліків методів вакуумного конденсаційного напилювання варто віднести невисоку продуктивність процесу (швидкість конденсації близько 1 *мкм/хв*); підвищену складність технології й устаткування, низькі показники енергетичних коефіцієнтів розпилення і напилювання.

1.2 Основні загальні параметри вакуумного конденсаційного напилювання і їхній вплив на ефективність процесу

Для вакуумного конденсаційного напилювання характерна велика кількість параметрів, що впливають на якість покрить, продуктивність, коефіцієнт використання енергії й інших показників ефективності процесу. При оцінюванні якості покрить найбільша увага приділяється адгезійній міцності і величині залишкових напруг. Продуктивність процесу в основному визначається швидкістю розпилення (випаровування) і значеннями коефіцієнта використання матеріалу (КВМ).

1.2.1 Конструктивні параметри

Найбільше впливають на ефективність процесу: розміри і конструкція робочої камери; метод відкачування; конструктивні особливості розпилювача (випарника) і ін.

Розміри робочої камери визначаються геометрією напилюваних виробів, одночасністю їхнього завантаження, конструктивними особливостями розпилювачів, технологічного оснащення й ін. З розмірами робочої камери в першу чергу пов'язане коливання тиску залишкових або робочих газів у процесі напилювання покриттів. У цьому відношенні збільшення об'єму камери впливає позитивно. Разом з тим збільшення внутрішньої поверхні камери пов'язано з підвищенням газовідділенням.

Якість напилених покриттів значною мірою залежить від способу створення вакууму в робочій камері. Найбільш високі результати реалізуються при використанні безмасляної системи відкачки з застосуванням насосів сорбційного типу.

Ефективність процесу напилювання пов'язана також з конструктивними особливостями розпилювача (випарника). Зокрема, він повинен забезпечувати мінімальні втрати енергії, що підводиться до розпилюваного матеріалу. Очевидно, у цьому відношенні найбільш доцільні конструкції без примусового охолодження.

1.2.2 Параметри режиму роботи розпилювача

Найбільш загальним параметром режиму розпилення є питома потужність, яка витрачається на створення потоку пари заданої густини. Очевидно, що зі збільшенням енергії, яка підводиться до речовини що розпилюється (що випаровується), парціальний тиск пари і густина потоку розпилюваних частинок буде рости. Частина енергії, яка підводиться до матеріалу, що розпилюється, витрачається на підвищення енергетичного рівня частинок у розпилюваному потоці. У такий спосіб зі збільшенням енергії, що підводиться до одиниці поверхні речовини, що розпилюється, росте і продуктивність процесу. Зі збільшенням густини потоку частинок при конденсації зменшується критична величина зародка ($r_{кр}$) і збільшується швидкість їхнього виникнення. Це полегшує одержання дрібнокристалічної будови в покритті. В умовах високошвидкісного напилювання звичайно, формується стовпчаста структура покриття. У цьому випадку кожен атом (іон) утримується на поверхні напилювання в точці зіткнення без істотної поверхневої дифузії. Регулюванням підведеної потужності до речовини, що розпилюється, одержують покриття з різною структурою і властивостями. Необхідно враховувати, що при високошвидкісних способах розпилення речовини за допомогою

випаровування в потоці пари збільшується кількість конденсованої фази.

Для ведення процесу вакуумного конденсаційного напилювання з найбільшою ефективністю необхідний високий ступінь іонізації потоку розпилюваних частинок. З цією метою парова фаза потоку іонізується додатковим підведенням енергії за рахунок тліючого або дугового розряду, електромагнітного поля й ін. Параметри іонізуючих джерел енергії безпосередньо пов'язані зі ступенем іонізації потоку і побічно — з показниками ефективності напилювання.

Якість покриття, швидкість конденсації й інші показники залежать від енергії частинок, що надходять на поверхню напилювання (рис. 3). Прискорення іонів у напрямку поверхні напилювання здійснюють впливом електромагнітного або електричного поля за допомогою регулювання параметрів цих джерел.

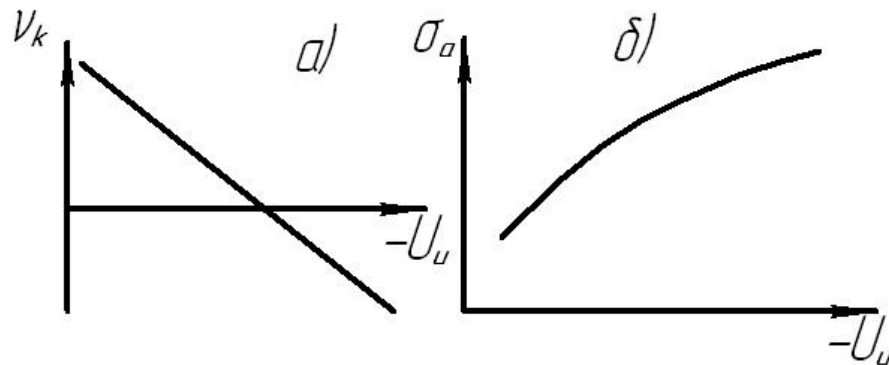


Рисунок 3 — Вплив величини негативного потенціалу джерела U_k на напилюваному виробі на швидкість конденсації V_k покриття (а), його адгезійну σ_a міцність (б)

1.2.3 Параметри речовини, що розпилюється, і умови введення в зону розпилення

Фізико-хімічні властивості речовини, що розпилюється, і її температура дуже впливають на процеси випаровування і розпилення. Ці параметри будуть розглянуті нижче, стосовно до відповідних методів. Ефективність процесу залежить також від форми і розмірів речовини, що розпилюється. Вибір форми речовини багато в чому визначається методом і способом напилення, умовами її подачі в зону розпилення, фізико-хімічними властивостями й іншими особливостями. Найчастіше для розпилення використовують компактні речовини у вигляді стрижнів, дроту, таблеток, дисків. Застосовують і диспергований матеріал у вигляді порошку, гранул і т.д. Розміри матеріалу вибирають з умов одержання оптимальної площі розпилення (випаровування), максимального його

використання, рівномірної подачі в зону розпилення.

Температура речовини, що розпилюється. При звичайному термічному випаровуванні температура речовини, що розпилюється, має вирішальне значення. При високошвидкісних способах розпилення іонами або дуговим розрядом температура не відіграє істотної ролі в розпиленні речовини.

1.2.4 Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання

До цієї групи відносяться важливі параметри, що мають великий вплив на показники ефективності процесу. До них відносяться: дистанція напилювання, кут розходження потоку розпилюваних частинок; кут падіння частинок, тиск і робоче середовище; температура і розміри напилюваного виробу й ін.

Дистанція розпилювання. При незмінних значеннях кута зустрічі потоку частинок з поверхнею напилюваного виробу найбільше впливає на рівномірність покриття. У цьому відношенні виявляється ідентичність з газотермічними методами. При вакуумних конденсаційних методах напилювання для парових потоків застосовні закони Ламберта-Кнудсена.

Перший закон констатує, що інтенсивність пари в напрямку поверхні напилювання пропорційна косинусові кута розбіжності потоку з точкового джерела.

Другий закон пов'язує кількість осадженої речовини в покритті в залежності від дистанції напилювання. Воно обернено пропорційне квадратів відстані від розпилювача (випарника) до поверхні напилювання. Так, наприклад, при випарюванні матеріалу з малої поверхні область рівномірного покриття при дистанції $L = 200$ мм поширюється на пляму напилювання діаметром 80—120 мм. На практиці для одержання рівномірних покриттів збільшують дистанцію напилювання, використовують кілька розпилювачів, змінюють конфігурацію площі розпилення; застосовують різні траєкторії переміщення напилюваних виробів і ін. Дистанція напилювання впливає і на інші показники ефективності. Збільшення дистанції понад оптимальні значення знижує КІМ. Змінюються умови зародження і росту покриттів, що приводять до зниження адгезійної міцності.

Для різних способів вакуумного конденсаційного напилювання дистанцію вибирають у широких межах — від 20 до 500 мм.

Тиск у камері. З цим параметром у першу чергу пов'язана довжина вільного пробігу розпилюваних частинок. У цьому відношенні максимальна ступінь розрідження (глибокий вакуум) полегшує процес перенесення частинок. Так, наприклад, при $P_k = 10^{-4}$ Па довжина вільного

пробігу частинок складає 1000 мм, а при $P_k = 0,1$ Па вона дорівнює 10 мм. Тиск насиченої пари мало залежить від величини P_k . Однак дифузія частинок із приграничного шару розпилювача і швидкість розпилення (випарювання) істотно знижуються при підвищенні P_k . Поряд з цим у камері знижується кількість залишкових газів, активних стосовно розпилюваної речовини. Тиск у камері впливає і на рівномірність напилених покриттів. На практиці іноді прибігають до збільшення тиску в камері з метою одержання покриттів з великою рівномірністю по товщині. Іноді при методах розпилення речовини електричними розрядами підвищують тиск в камері. Високий рівень розрідження не сприяє стабільному горінню дугового або тліючого розряду. При вакуумних реакційних способах напилювання тиск у камері є таким, як це буде показано далі, що визначається при синтезуванні в покриттях з'єднань різного типу.

Температура напилюваного виробу. Температура напилюваного виробу виявляється одним з найбільш значимих параметрів процесу напилювання. З температурою поверхні напилюваного виробу, у першу чергу пов'язана адгезійна міцність, структура покриття, рівень залишкових напруг і, відповідно, його властивості.

Різні дослідники пропонують зонні моделі залежності структури товстих покриттів (понад 1 мкм) від температури поверхні напилювання. Найбільш простою є трizonна модель вакуумних конденсаційних покриттів (рис. 4, а). У першій низькотемпературній зоні покриття формуються при температурах напилюваної поверхні від звичайної для навколишньої атмосфери до граничної температури T_1 . Її значення оцінюється приблизно рівним 0,3 від температури плавлення речовини, що розпилюється ($0,3T_{пл}$). При низьких температурах у покритті формується специфічна куполоподібна будова кристалів.

В другій зоні (середньотемпературній) в інтервалі температур $T_1—T_2$ у покритті формується яскраво виражена стовпчаста будова. Причому зі збільшенням температури ширина стовпчастих кристалів зростає. Температура T_2 оцінюється приблизно (0,45—0,5) від температури плавлення матеріалу покриття ($0,45—0,5 T_{пл}$).

У третій — високотемпературній зоні, при температурі напилюваної поверхні вище T_2 у покритті формується переважно рівновісна структура.

У табл. 1 наведені значення граничних температур T_1 і T_2 для товстих покриттів, напилених з різних речовин. Метод напилювання і склад парового потоку (ступінь іонізації) мало впливають на зміну меж температурних зон.

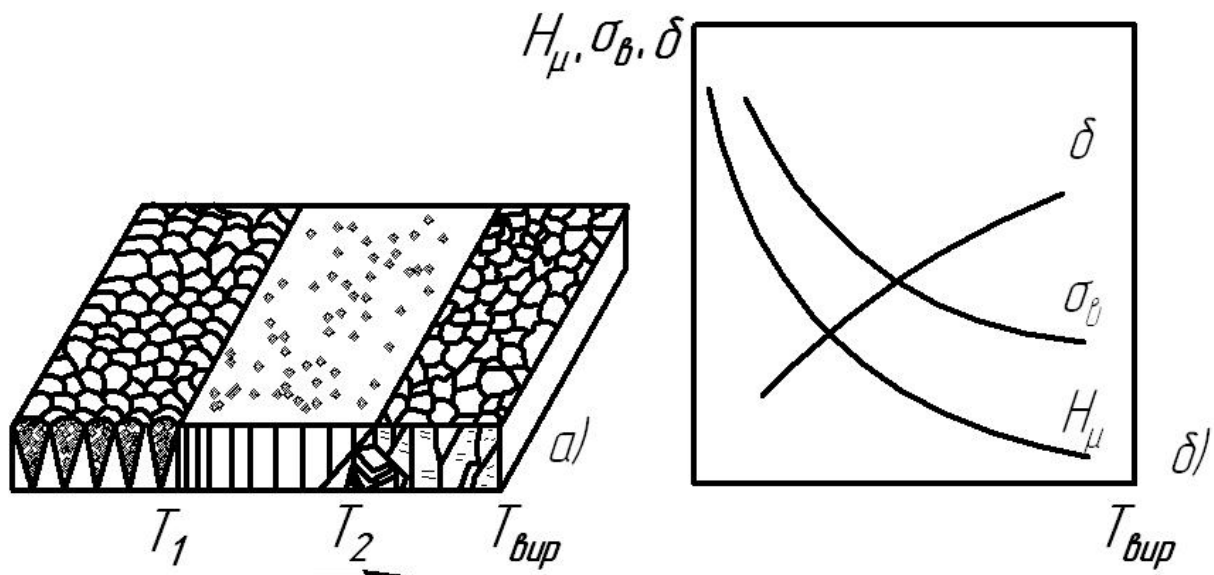


Рисунок 4 — Схема розподілу структурних зон у напиленому покритті (а) і якісна залежність мікротвердості H_{μ} тимчасового опору $\sigma_{\text{в}}$ і відносного подовження покриттів δ від температури напилюваного виробу $T_{\text{вир}}$

Таблиця 1 — Граничні температури T_1 і T_2 і їхні відношення $T_1/T_{\text{нл}}$ $T_2/T_{\text{нл}}$ тризонаної структурної моделі формування покриттів

Хімічні елементи матеріалу	$T_{\text{нл}}, K$	T_1, K	$T_1/T_{\text{нл}}$	T_2, K	$T_2/T_{\text{нл}}$
Титан	1945	643±10	0,33	948±30	0,49
Нікель	1726	543±10	0,31	723±10	0,42 0,45
Мідь	1356	433±10	0,32	673±20	0,50
Залізо	1809	563±20	0,31	863±20	0,48
Берилій	1573	473±20	0,29	1023±50	0,63
Ni+20 % Cr	1673	500±50	0,30	870	0,52
Молібден	2883	923±20	0,32	1200	0,42
Вольфрам	3683	1133±50	0,30	1723±50	0,47
Оксид хрому	2973	648±10	0,22	1273±100	0,43
Оксид алюмінію	2323	623±10	0,26	1173±100	0,50
Карбід титану	3340	1070±30	0,31	—	—
Карбід цирконію	3690	1323±50	0,36	1623±50	0,44

При температурі поверхні напилювання вище T_2 у покритті відбуваються процеси об'ємної рекристалізації, що призводять до росту зерна. Змінюючи температуру поверхні напилювання, і, власне, структуру покриття, можна в широких межах регулювати їхні механічні властивості. Для конденсаційних покриттів спостерігається чітка залежність механічних властивостей від структури.

На рис. 4, б наведені якісні залежності мікротвердості H_μ , тимчасового опору σ_b і відносного видовження δ від температури напилюваного виробу. Причому ці закономірності властиві більшості напиленим покриттям: з чистих металів, сплавів, з'єднань, композиційних формувань.

Температура поверхні напилювання дуже впливає на адгезійну міцність покриттів. Зі збільшенням температури адгезійна міцність зростає. Це особливо характерно при формуванні покриттів з потоку частинок з низьким енергетичним рівнем, наприклад, з малим ступенем іонізації. Температуру нагрівання напилюваних виробів вибирають, виходячи з багатьох передумов. При цьому враховують властивості матеріалу і конструктивні особливості напилюваного виробу, вимоги, що висувуються до структури покриття, рівень залишкових напружень, спосіб напилювання і т.д. У залежності від умов підігріву напилюваних виробів здійснюється від температури 300 °C і вище.

Формування покриттів при високих температурах, близьких до температури плавлення речовини, що розпилюється, пов'язано з процесами ревіпаровування. Це зменшує продуктивність напилювання.

1.2.5 Параметри потоку напилюваних частинок

Ця група визначається раніше розглянутими параметрами і впливає на показники ефективності процесу вакуумного конденсаційного напилювання.

До параметрів потоку відносять: густину потоку напилюваних частинок (N , частинок/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)); енергію напилюваних частинок (W , eV/атом); ступінь іонізації напилюваних частинок (n_i , %); швидкість частинок у напрямку поверхні напилювання (V_c , м/с); кут розбіжності потоку розпилених частинок (φ , °).

Орієнтована густина і енергія частинок для різних способів вакуумного конденсаційного напилювання наведені на рис. 5. Область I охоплює, в основному, способи розпилення термічним випаровуванням. Характеризується високими густинами потоку напилюваних частинок 10^{16} — 24^{24} 1/см²·с малими значеннями енергій ($W \leq 0,5$ eV). Область II характерна для іонного розпилення речовини з наступним прискоренням

заряджених частинок. Область III включає високошвидкісні способи розпилення з наступною іонізацією частинок і їх прискоренням.

Верхня границя (суцільна лінія) відповідає максимально припустимому потокові енергії на поверхню напилювання. Ступінь іонізації потоку розпилюваних частинок залежить від способу напилювання. Термічне випаровування дає малий ступінь іонізації. Ступінь іонізації будь-яких потоків може бути збільшена застосуванням додаткових джерел енергії.

Швидкість частинок у напрямку поверхні виробу залежить від способу напилювання, застосування прискорювальних пристроїв і характеризується значеннями 2000 м/с і більше.

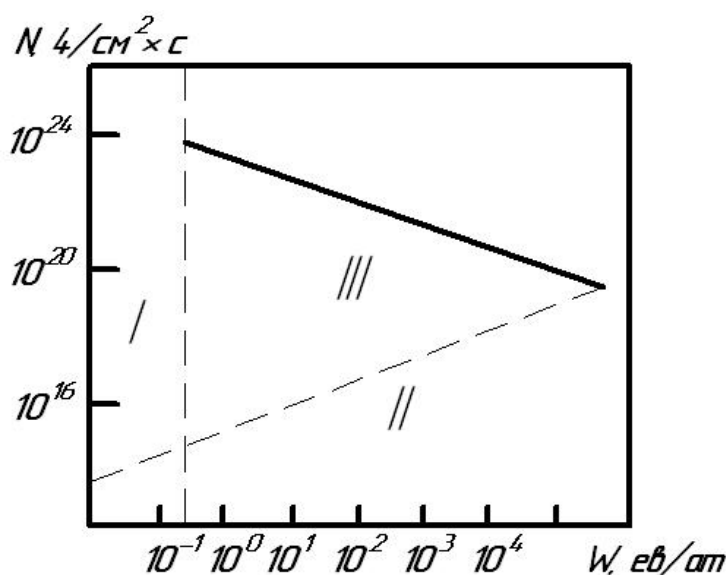


Рисунок 5 — Діаграма розподілу густини потоку частинок N і енергії W для різних способів ВКН

Кут розбіжності частинок при розпиленні коливається в широких межах і визначається способами розпилення, поверхнею розпилення й ін. Для точкового джерела розпилення кут розбіжності підкоряється закономірі косинуса.

1.3 Способи і технологічні особливості вакуумного конденсаційного напилювання покриттів термічним випаровуванням

Розпилення матеріалу покриттів здійснюється за допомогою його термічного випаровування. Найбільш висока ефективність випаровування досягається при нагріванні матеріалу вище температури його плавлення. Однак можливе утворення потоку з достатньою для напилювання

концентрацією частинок і при випаровуванні твердого матеріалу (хром і ін.). На рис. 6, а наведена узагальнена схема процесу напилювання покритть термічним випаровуванням розплавленого матеріалу. Для нагрівання матеріалу, що розплюється, застосовують різні джерела теплоти: резистивні, електронний і світловий промінь, індукційні і дугові. Відповідно до цього розрізняють і способи напилювання покритть термічним випаровуванням. Для будь-якого способу напилювання необхідний випарник. Його призначення — утримувати розплавлений матеріал при температурі, достатній для одержання необхідного тиску пари (1—100 Па). Для більшості матеріалів, що представляють практичний інтерес, ці температури перевищують 1000—2000 °С.

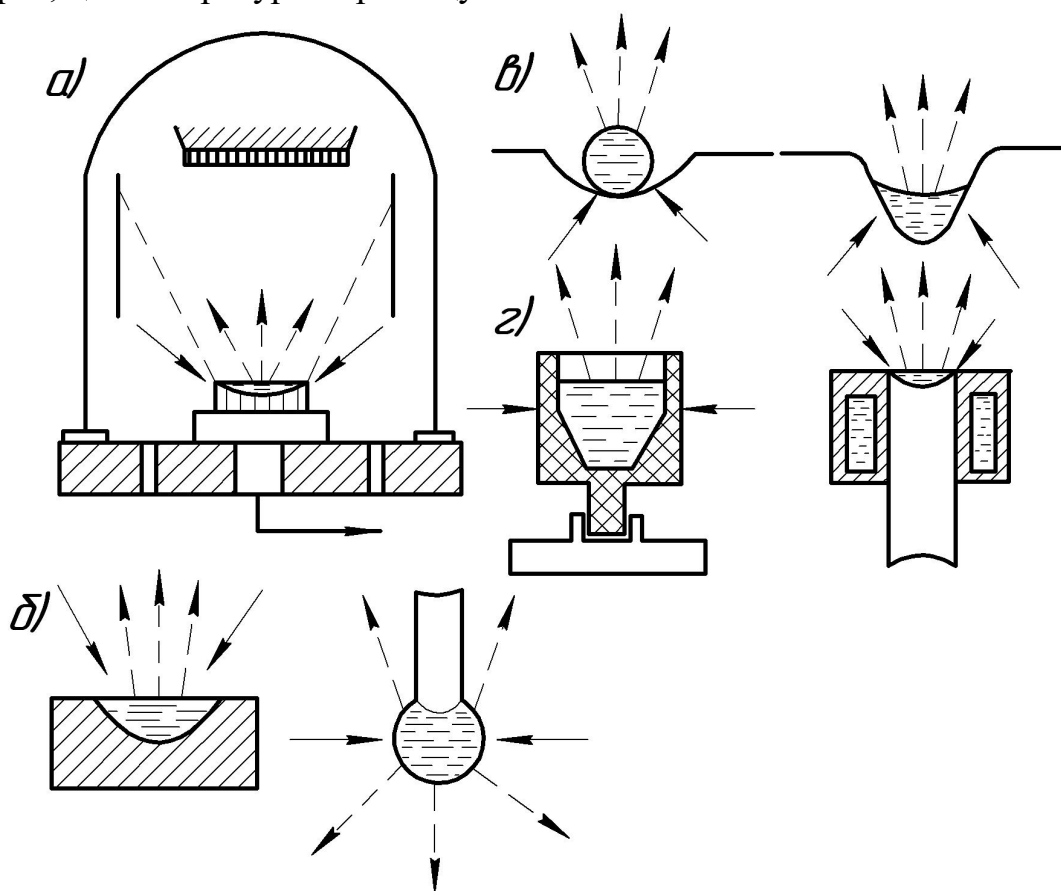


Рисунок 6 — Узагальнена схема вакуумного конденсаційного напилювання покритть термічним випаровуванням (а) і способи випаровування речовини, що розплюється, (б—г): суцільними стрілками умовно показане підведення теплоти до матеріалу, що розплюється; пунктирними — потік пари

Найбільш чистий потік пари забезпечується при локальних способах нагрівання й утримання розплавленого матеріалу (рис. 6, б). При інших способах нагрівання неминуче контактування розплавленого матеріалу або з матеріалом тигля (рис. 6, г), або з матеріалом нагрівача — прямий

резистивний нагрів (рис. 6, б). При «контактному» нагріванні необхідно забезпечувати мінімальний ступінь взаємодії розплавленого матеріалу з тиглем або нагрівачем. Крім того матеріал тиглів і нагрівачів варто вибирати з незначною пружністю пари і високою стабільністю хімічного складу. При дотриманні названих вимог вдається уникати істотного забруднення покриттів домішковими частинками.

Параметри вакуумного конденсаційного напилювання покриттів термічним випаровуванням і їхній вплив на ефективність процесу

Найбільш значимим показником ефективності процесу є швидкість випаровування речовини, що розпилюється. У загальному випадку всі речовини здатні до випаровування при температурі вище абсолютного нуля. Умовно прийнято вважати температуру випаровування ту, при якій тиск насиченої пари складає $1,33 \text{ Па}$. Тиск насиченої пари (P_0), як відомо, визначається рівнянням Клаузиуса—Клапейрона:

$$\frac{dP_0}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{T_{\text{вип}}(V_n - V_p)}, \quad (1.3)$$

де $\Delta H_{\text{вип}}$ — теплота випаровування;

V_n, V_p — молярні об'єми пари і рідини;

$T_{\text{вип}}$ — температура поверхні випаровування.

Для розрахунків звичайно користуються рівнянням

$$\lg P_0 = AT^{-1} + Y \lg T + CT + D, \quad (1.4)$$

де A, Y, C, D — константи.

При випаровуванні у високому вакуумі швидкість випаровування ($V_{\text{вип}}, \text{г/см}^3 \cdot \text{с}$) визначають за допомогою співвідношення Ленгмюра

$$V_{\text{вип}} = 4,44 \cdot 10^{-4} P_0 \sqrt{M/T}, \quad (1.5)$$

де M — молекулярна маса матеріалу.

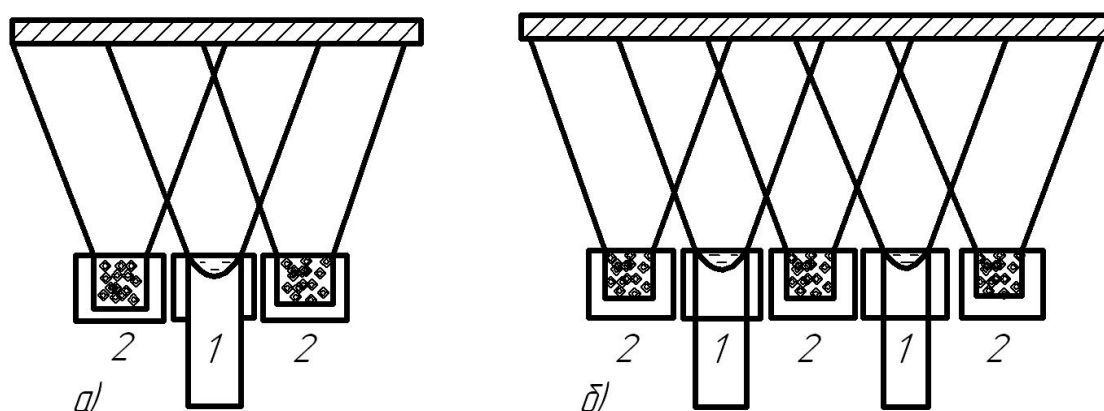


Рисунок 7 — Схема випаровування металевих (1) і неметалевих (2) матеріалів із трьох (а) і п'яти (б) джерел

Розглянемо вплив параметрів вакуумного конденсаційного напилювання термічним випаровуванням на показники ефективності процесу.

Конструктивні параметри. Найбільше впливає на швидкість випаровування та ефективний *ККД* склад потоку частинок, а якість покриття залежить від конструкції випарника. Насамперед випарник повинний забезпечувати мінімальні теплові втрати речовини, що випаровується. Завдяки цьому скорочується кількість енергії, необхідної для випаровування матеріалу. Наприклад, застосування керамічних тиглів при електроннопроменевому випарюванні знижує потужність джерела теплоти в 4—6 разів у порівнянні з мідним водоохолоджуваним тиглем. У той же час з мідних водоохолоджуваних тиглів можна випаровувати різні речовини і одержувати покриття без зміни вихідного складу. Одночасне застосування декількох випарників (рис. 7) дозволяє отримувати складні покриття за вмістом розпилюваних речовин, композиційні з високою рівномірністю щодо товщини.

Параметри режиму роботи випарника. Визначають енергію, яка підводиться до речовини, що випаровується, і рівень використання цієї енергії. Загальним параметром режиму роботи випарника є електрична потужність, яка підводиться до джерела теплоти: резистора, електронного променя, індуктора, дуги і т.д. Зі збільшенням потужності джерела електроживлення зростає і потужність джерела теплоти. Регулювання потужності джерела електроживлення здійснюється за рахунок зміни струму або напруги. З потужністю джерела теплоти, розподілом її по поверхні нагрівання пов'язана температура матеріалу, що випаровується, і поверхня випаровування. Ці показники в найбільшій мірі відповідальні за продуктивність процесу. У практиці напилювання реалізуються потужні джерела електроживлення від 0,5 до 200 *кВт*.

Параметри речовини, що розпиляється, і умови її введення в зону випаровування. З рівнянь (1.3)—(1.5) видно, що тиск насиченої пари і швидкість випаровування при обраній речовині залежить від температури поверхні випаровування.

Регулюванням потужності джерела теплоти доводять температуру речовини до випаровування, при якій $P_0 > 1,33 \text{ Па}$. Зі збільшенням температури матеріалу, що випаровується, тиск насиченої пари різко зростає. Так, при випаровуванні алюмінію і хрому збільшення T_u на 10—15 % приводить до зростання P_0 майже на порядок. На рис. 8 показані залежності швидкості випаровування від температури для більшості елементів, що використовуються для вакуумного конденсаційного напилювання покриття. У табл. 2 наведені температури випаровування, що

рекомендуються, різних матеріалів для досягнення тиску насиченої пари, рівного $1,33 \text{ Па}$. Тиск насиченої пари і швидкість випаровування істотно залежать від стану поверхні, що випаровується. Сторонні включення, наявність оксидної плівки ускладнюють протікання процесу випаровування. Неприпустима також висока концентрація газоподібних домішок у речовині, що випаровується. Велике значення для стабілізації процесу має форма і розміри поверхні випаровування.

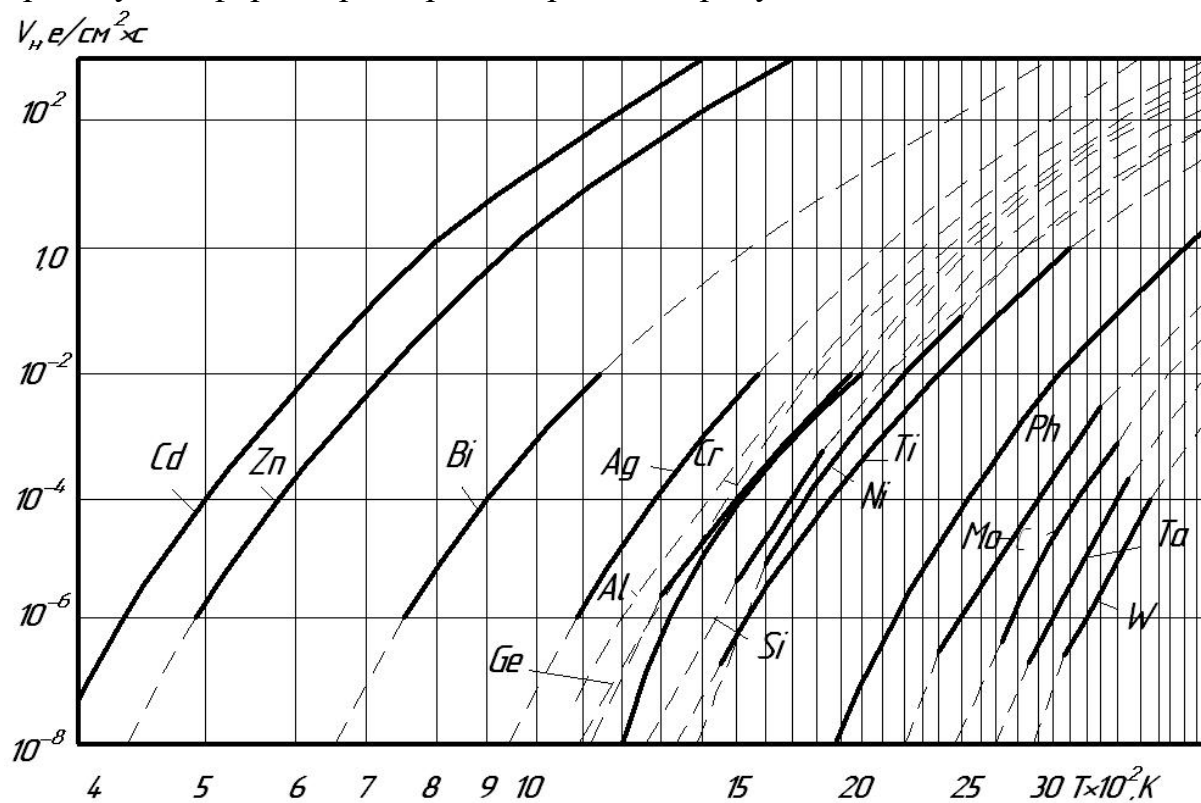


Рисунок 8 — Вплив температури на швидкість випаровування деяких елементів

Це досягається різними способами і, зокрема, підживленням при тигельному випаровуванні або подачею стрижневого матеріалу із його витратою. Для підживлення тиглів застосовують порошкові або дотові речовини. Нерівномірна подача приводить до коливання рівня рідкометалевої ванни. Це впливає на характер розподілу елементів при електроннопроменевому напилюванні покриттів. Сталість рівня ванни досягається за допомогою різних систем спостереження, наприклад лазерного променя.

Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання. Найбільше впливають такі параметри: тиск у камері, дистанція напилювання, температура поверхні виробу. Інші параметри розглянуті раніше в загальних закономірностях вакуумного конденсаційного напилювання.

Тиск у камері (P_k) вибирають від 10^{-2} Па і нижче. При більш високих тисках ($P_k > 1,33 \cdot 10^{-1}$ Па) швидкість випаровування падає. Над поверхнею випаровування утворюється граничний шар. Тиск у камері впливає на дифузію пари з цього шару. Слід зазначити, що пружність пари практично не залежить від тиску P_k . При високому тиску насиченої пари ($P_0 > 133$) швидкість випаровування знижується. Це пояснюється зменшенням довжини вільного пробігу частинок над випарником.

Таблиця 2 — Температури випаровування, що рекомендуються, різних речовин при досягненні $P_0 = 1.33$ Па

Речовина	T_w , °C	$T_{пл}$, °C	$T_{кип}$, °C	Речовина	$T_{вип}$, °C	$T_{пл}$, °C	$T_{кип}$, °C
Кадмій	264	320	767	Вольфрам	3230	3345	5930
Свинець	715	327	1744	Хлористий натрій	670	800,8	1465
Срібло	1030	960	2212				
Алюміній	1220	660	2370	Хлористий магній	1130	1263	2270
Мідь	1260	1083	2595				
Золото	1400	1063	2530	Діоксид кремнію	1250	1993	2250
Хром	1400	1845	2508				
Нікель	1530	1455	2730	Фтористий кальцій	1300	1418	2530
Титан	1750	1672	3260	Діоксид алюмінію	1800	2320	3250
Платина	2100	1760	4410				
Молибден	2530	2622	4804				

Дистанцію напилювання вибирають у межах 150—250 мм. Для оптимальних значень P_k — це відстань значно менша довжини вільного пробігу розпилюваних частинок. Збільшення дистанції позитивно впливає на рівномірність покриття.

Температура поверхні напилюваних виробів найбільше впливає на адгезійну, когезійну міцність покриття і їхню структуру. Невисокі температури (менше 0,3 від температури плавлення речовини, що розпилюється,) сприяють формуванню на поверхні виробів слабо зчеплених покриття з низкою когезійною міцністю. Основна причина формування неякісних покриття, очевидно, пов'язана з невисоким енергетичним рівнем розпилюваних частинок. У табл. 3 наведені мінімальні значення температури напилюваних виробів для різних сполучень речовин покриття і виробу.

Таблиця 3 — Мінімальні температури (°C) напилюваних виробів для різних сполучень речовин виробу і покриття

Матеріал покриття	Матеріал виробу					
	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>Mb</i>	<i>Ni</i>
Молібден	650	500	750	350	400	400
Хром	650	450	700	600	—	400
Мідь	—	—	400	450	400	350
Нікель	—	350	500	350	—	—

Параметри потоку розпилюваних частинок. Раніше розглянуті параметри забезпечують створення потоку частинок, що характеризується такими показниками: густина потоку 10^{16} — 10^{23} частинок/см²·с; середня кінетична енергія 0,2—0,5 eV; ступінь іонізації 0,01—1,2 %.

Висока густина потоку частинок забезпечує підвищену продуктивність процесу. Швидкість росту покриття досягає 1 мкм/хв і вище.

Для підвищення ступеня іонізації й енергії розпилюваних частинок використовують, як це буде показано, різні способи стимуляції потоків, наприклад, плазмою.

1.3.1 Резистивне нагрівання при напилюванні покриття

Нагрівання речовини, що розпилюється, здійснюють джоулевым теплом. Передача теплоти від резистора до речовини, що розпилюється, відбувається або безпосередньо (рис. 9, а — е) або через стінку тигля (рис. 9, з). Часто резистори використовують у формі човника з різним робочим об'ємом.

До матеріалів, які використовують для виготовлення резистивних випарників, висувається ряд вимог: тиск пари матеріалу випарника при температурі процесу повинний бути таким малим, що ним можна знехтувати; матеріал випарника повинний добре змочуватися речовиною, що розпилюється, для забезпечення між ними гарного теплового контакту; речовина, що розпилюється, не повинна утворювати з матеріалом резистора або тигля різного роду сполук, що призведе до забруднення покриття і руйнування випарника.

За конструктивними ознаками резистивні випарники розділяються на дровові, стрічкові, човнові і тигельні.

Великою перевагою способів вакуумного конденсаційного напилювання з резистивним нагріванням речовини, що розпилюється, є простота конструкції випарника, нескладність електроживлення; зручність контролю і регулювання режиму роботи розпилювача (випарника).

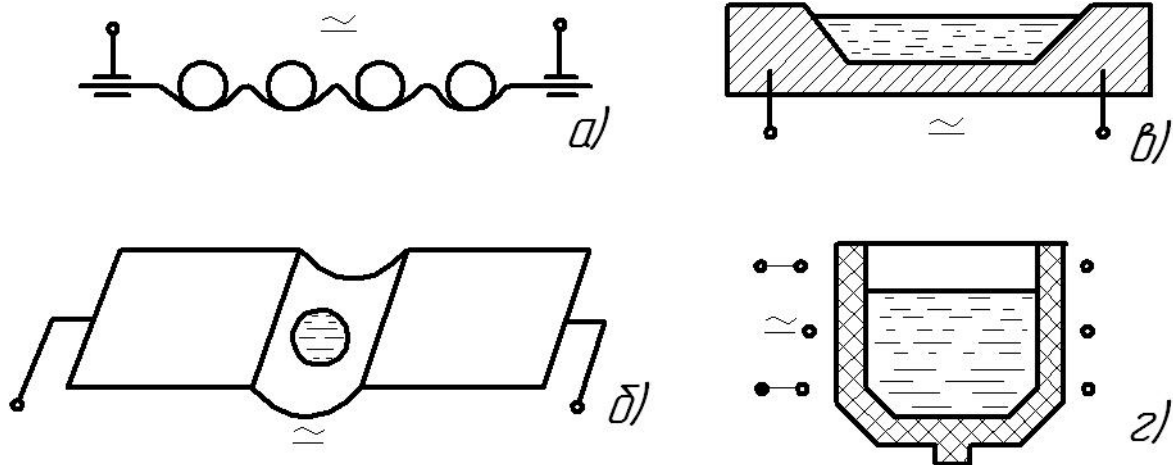


Рисунок 9 — Способи резистивного нагрівання речовини, що розплюється: а — дротовий; б — стрічковий; в — човновий; г — тигельний

Основний недолік випарників з резистивним нагріванням полягає в обмеженні максимальної температури випаровування до 1500 °С. Крім того ці способи енергоємні, відрізняються низькою питомою потужністю і малопродуктивні.

1.3.2 Високочастотне індукційне нагрівання при напилюванні покритть термічним випаровуванням

Тигель з речовиною, що розплюється, аналогічний тому, що показаний на рис. 9 г, установлюють на теплоізоляційній підставці. Нагрівання і розплавлення речовини здійснюється високочастотним індуктором. Змінне електромагнітне поле викликає коливальні рухи полярних молекул і заряджених частинок у речовині, що нагрівається. Енергія, отримана частинками з електромагнітного поля, передається іншим атомам і молекулам. Завдяки цьому і відбувається безпосереднє нагрівання речовини в тиглі. Час нагрівання невеликий і складає, у залежності від маси речовини і потужності ВЧ-генератора, від декількох секунд до часток секунди. При випаровуванні матеріалу утвориться потік пари, спрямований до поверхні напилюваного виробу. Процес ведуть, як звичайно, у жорстких герметичних камерах, різних за конструктивним виконанням. Тиглі виготовляють з багатьох матеріалів, відповідно до вимог, сформульованих для нагрівачів, що контактують з матеріалом, що розплюється. Часто, наприклад, використовують тиглі, виготовлені з порошкової суміші нітриду бора і діборида титану.

У порівнянні з резистивним нагріванням індукційне високочастотне нагрівання є значно більш ефективним. Коефіцієнт використання енергії

істотно підвищується. Недоліком способу вакуумного конденсаційного напилювання з індукційним нагріванням речовини, що розпилюється, є досить висока складність устаткування і вартість.

1.3.3 Електронно-променеве нагрівання при вакуумному конденсаційному напилюванні покриттів

Одержало найбільше поширення для нагрівання і випаровування речовини, що розпилюється. Відомо багато різних схем випарників і установок для вакуумного конденсаційного напилювання, із застосуванням електроннопроменевого нагрівання. На рис. 10 наведені схеми, які найчастіше зустрічаються. До катода й анода електронної гармати від джерела живлення підводиться високовольтна напруга.

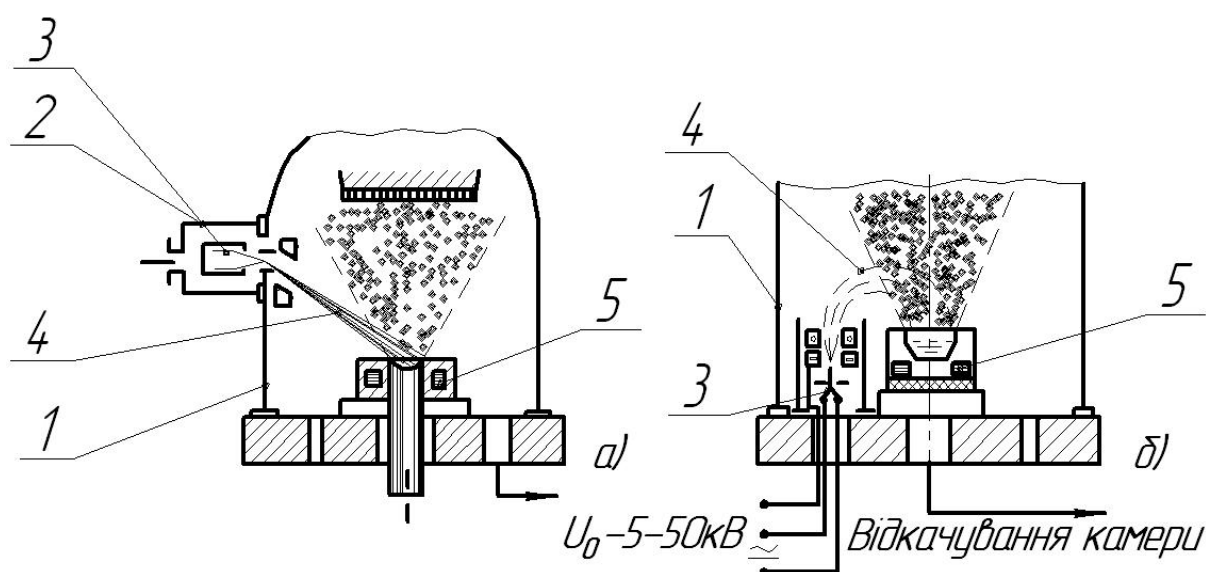


Рисунок 10 — Схеми електронно-променевих випарників для ВКН:

а — з незалежними вакуумними системами робочої камери і камери електронної гармати; б — зі сполученою вакуумною системою; 1 — робоча камера; 2 — камера електронної гармати; 3 — електронна гармата; 4 — електронний промінь; 5 — водоохолоджуваний тигель

У залежності від типу гармати вона складає 5—60 кВ. Термокатод (пряморозжарюваний або побічнорозжарюваний) емітує електрони, які прискорюються в напрямку водоохолоджуваного анода. Електромагнітні відхилювальні і фокусувальні системи (катушки) направляють сформований промінь на речовину, що випаровується, у вигляді стрижня або водоохолоджуваного тигля. Електронний промінь відноситься до поверхневих джерел нагрівання. Електрони після проходження

електричного поля з різницею потенціалів U_0 прискорюються і набувають кінетичну енергію E_k

$$E_k = \frac{1}{2} m_0 v_0^2 = eU_0, \quad (1.6)$$

де m_0 , v_0 і e — маса, швидкість і заряд електрона. Наприклад, проходячи через поле з напругою в 1 В швидкість $v_0 = 595$ м/с.

Сутність нагрівання полягає в електронному бомбардуванні поверхні речовини, що розпилюється. Кінетична енергія електронів витрачається, в основному, на нагрівання і випаровування матеріалу. Однак значна її частина витрачається на утворення вторинних електронів (15—30 %), рентгенівське випромінювання (близько 0,1 %). Енергія відбитих електронів витрачається на нагрівання стінок камери, напилюваного виробу, механізмів, розміщених у камері.

Необхідно враховувати особливості випаровування при нагріванні матеріалу електронним променем. Електрони гальмуються в поверхневому шарі на глибині 1—2 мкм (при $U_0 = 15—20$ кВ). Основне гальмування відбувається наприкінці пробігу. Теплота виділяється в об'ємі тонкого поверхневого шару. Це й обумовлює високу ефективність електроннопроменевих випарників, особливо при максимальних ступенях фокусування електронного променя.

Найбільш значимим параметром процесу при електроннопроменевому напилюванні покриттів є потужність променя.

Як і при інших способах напилювання покриттів термічним випаровуванням, енергія атомів у потоці невелика і складає 0,2—0,3 еВ; ступінь іонізації частинок 0,05—0,1 %. Однак для цього способу характерна висока густина парового потоку. До основних переваг способу напилювання покриттів електроннопроменевим випаровуванням відносяться: висока продуктивність; можливість напилювання покриттів зі сплавів і деяких сполук; підвищені властивості покриттів і ін.

Недоліки полягають у підвищеній складності установок у виготовленні й експлуатації; наявність твердого випромінювання при високих прискорювальних напругах. Спосіб електроннопроменевого напилювання особливо доцільний при нанесенні покриттів на великі поверхні. Наприклад, на стрічку в установках безперервної дії й інші виробу.

1.3.4 Дугове нагрівання при напилюванні покриттів термічним випаровуванням

Роботи, виконані в інституті металургії ім. О. О. Байкова, показали можливість використання для випаровування речовини дугового розряду,

що розпилюється, прямої полярності. Спочатку для нагрівання і розплавлення матеріалу застосовували електронний промінь, аналогічний описаному раніше, а потім джерело теплоти заміняли на дуговий розряд з фіксацією анода на поверхні розплаву. Схема процесу показана на рис. 11. В основу розрядного пристрою покладена конструкція електронної гармати з кільцевим катодом, що живляться від джерела розжарення катода 1. Термокатод працює в режимі електроннопроменевого і дугового процесу. На речовину, що розпилюється, подається позитивний потенціал від джерел живлення: високовольтного 2 при електроннопроменевому нагріванні і низьковольтного 3 для дугового розряду. Електронний промінь не тільки розплаває і випаровує матеріал, але й іонізує потік пари, створюючи тим самим умови для наступного збудження дугового розряду. Енергія і кількість частинок, що бомбардують катод, недостатні для емісії вторинних електронів. Тому розряд, що виникає, відносять до несамостійного. Для полегшення збудження розряду доцільно використовувати натікання в камеру робочого газу, наприклад, аргону. Із інтенсифікацією процесу натікання газу зменшують. Надалі розряд горить тільки в парах речовини, що розпилюється, при тиску в камері 10^{-2} — 10^{-3} Па. При цьому параметри розряду складають: сила струму до 150 А і більше; напруга 30—70 В. Спосіб забезпечує високу продуктивність напилювання, що не поступається чисто електроннопроменевому нагріву. Ступінь іонізації потоку пари може досягати 100 %. Завдяки цьому з'являється можливість керування енергією частинок, за допомогою їхнього прискорення в напрямку поверхні напилювання. Для цих цілей передбачений високовольтний випрямляч 2, негативний потенціал якого подається на виріб. Змінюючи напругу на джерелі негативного зсуву, проводять активацію й очищення поверхні.

Найбільш важливим параметром, що визначає ефективність процесу, є потужність дуги. В установках, що працюють за схемою випарника, з анодною формою дуги, реалізуються високі потужності розряду, що досягають 10 кВт і вище. Цим і досягається висока продуктивність процесу. Практично цілком іонізований потік пари дозволяє формувати покриття з високою адгезійною і когезійною міцністю без додаткового нагрівання виробу.

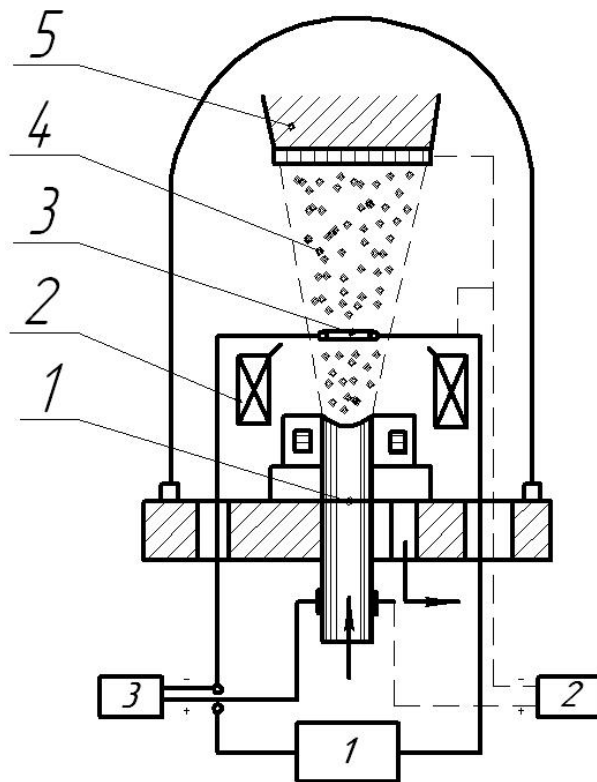


Рисунок 11 — Схема процесу напилювання покриттів дуговим випаровуванням розплавленого матеріалу у вакуумі:

1 — матеріал, що розплюється, (анод); 2 — система стабілізації і фокусування; 3 — термокатод; 4 — потік розплюваних частинок; 5 — напилюваний виріб

1.3.5 Способи підвищення енергії напилюваних частинок при термічному випаровуванні

Більшість способів напилювання покриттів за допомогою випаровування речовини, що розплюється, не забезпечує одержання в потоці пари частинок з високими значеннями енергії. Це негативно впливає на якість покриття. Можливості способів напилювання покриттів термічним випаровуванням істотно зростають при іонізації парового потоку. Для цих цілей використовують різні прийоми.

Найбільшу ефективність забезпечує постійний дуговий розряд у парах матеріалу, що випаровується. Це було показано в способі термічного випаровування дугою прямої полярності (див. рис. 11). У цьому випадку джерело нагрівання не тільки розплавляє і випаровує речовини, але й іонізує потік напилюваних частинок. При інших джерелах нагрівання (електронний промінь і ін.) потрібні автономні джерела іонізації. Часто для цих цілей використовують електричні розряди різних видів. Досить велике поширення одержав тліючий розряд у парах речовини, що випаровується. Напилюваний виріб виконує роль катода, а випарник є анодом.

1.4 Способи і технологічні особливості вакуумного конденсаційного напилювання покриттів вибуховим розпиленням

Вибухове розпилення здійснюється локальним впливом на напилювану поверхню енергетичних імпульсів. У результаті цього в мікроділянках створюються умови для високошвидкісного випаровування твердої речовини. При густинах енергії 10^7 — 10^9 Вт/см² на поверхні матеріалу реалізується розпилювально-випаровувальний процес з утворенням потоку розпилюваних частинок. У більшості випадків продукти розпилення ізотропно розлітаються в межах півсфери. Основна частина продуктів ерозії складається з парової фази. Практично завжди процес розпилення — випаровування супроводжується утворенням дрібних частинок конденсованої фази. Тверді або рідкі частинки мають розмір від часток до десятків мікронів і розлітаються зі швидкістю 1—10 м/с. Такі частинки часто називають краплинною фазою потоку. Однією з причин появи краплинної фази є оклюзія газів, нерівномірність мікро- і макроструктури речовини, що розпилюється, і інші особливості. Перехід їх у покриття часто неприпустимий. Тому при напилюванні покриттів способами вибухового розпилення необхідні пристрої для відділення конденсованої фази від основного потоку напилюваних частинок.

Рівень сучасної техніки дозволяє здійснювати вибухове розпилення з застосуванням різних імпульсних джерел теплоти, що переміщуються по поверхні речовини, яка розпилюється. Це може бути електронний або лазерний промінь, електричні розряди й ін.

1.4.1 Напилювання покриттів вибуховим розпиленням матеріалу дугою низького тиску

Найбільш ефективно процес розпилення речовини здійснюється при подачі на нього негативного потенціалу джерела живлення. У практиці таку дугу називають дугою зворотної полярності або катодною формою дуги. На рис. 12 показана схема вакуумного напилювання покриттів розпиленням катода дугою низького тиску. Для ведення процесу в камері створюється вакуум 10 — 10^{-1} Па. Між матеріалом-катодом 2, що розпилюється, і мідним водоохолоджуваним анодом 4 збуджується дуговий розряд. Для цієї мети застосовують силові джерела живлення постійного струму 1 з напругою холостого ходу 60—80 В. Для первісного збудження дуги (пробою міжелектродного простору) використовують різні схеми (допоміжний електрод, плавкі вставки й ін.). Для стабілізації катода в межах площі речовини, що розпилюється, передбачена електромагнітна

котушка 8. Дуговий розряд 7 існує в парах матеріалу катода. В окремих катодних плямах, що складаються, у свою чергу, з окремих елементарних комірок відбувається безперервний процес мимовільного розпаду комірок і безперервне утворення нових. Густина струму в катодних плямах складає $10^5—10^7 \text{ A/cm}^2$ при частоті коливань такого ж порядку. Як бачимо в цьому відношенні дуга мимовільно виконує роль імпульсного джерела теплоти.

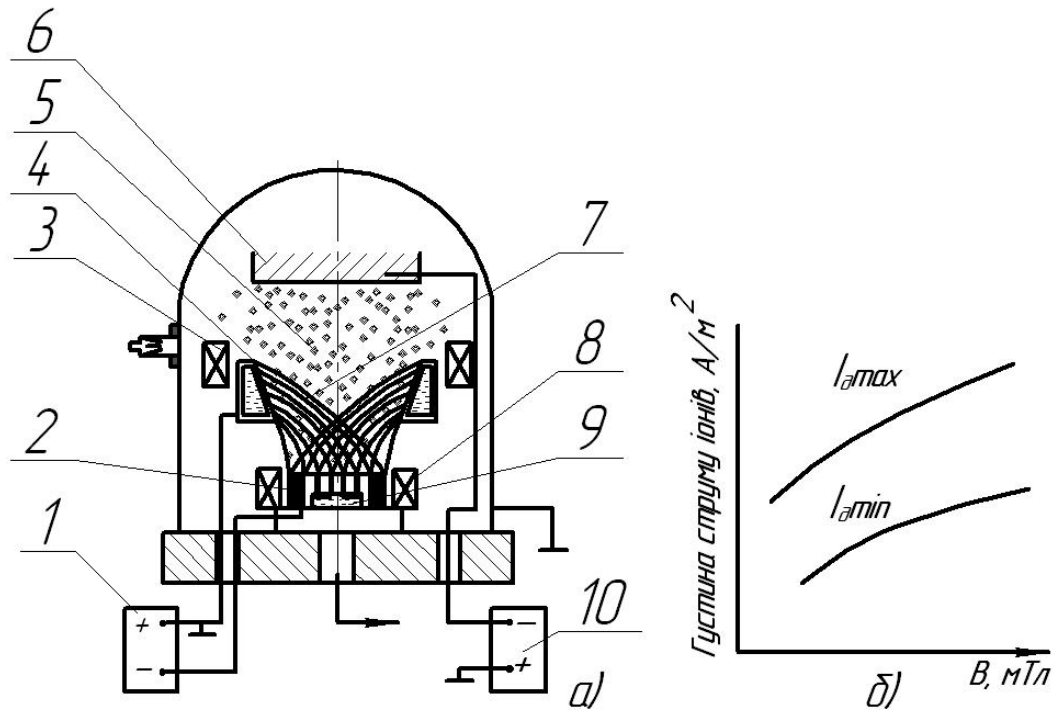


Рисунок 12 — Схема вакуумного напилювання покритть розпиленням катода дугою низького тиску (а) і якісна залежність густини іонного струму від індукції магнітного поля і струму дуги (б)

Стійкість дуги залежить від того, наскільки легко випаровується матеріал катода під дією потужності, яка виділяється в катодних плямах. Звичайно, катодні плями переносять струм від одиниць до сотень ампер. Густина потужності $10^7—10^8 \text{ Вт/см}^2$. Розподіл числа плям по поверхні описується законом Гауса, їхнє переміщення підпорядковане броунівському рухові зі швидкістю від десятих часток до декількох метрів у секунду. Відштовхуючись один від одного, вони рухаються до периферійної площі катода. Необхідною умовою генерації потоку напилюваних частинок є великі потужності, які виділяються в катодних плямах і, відповідно, високий тиск пари, що утворюють катодні струмені.

Швидкість розпилення матеріалу катода описується рівнянням:

$$\frac{d_m}{d_t} = \mu_p I_d, \quad (1.7)$$

де μ_p — коефіцієнт розпилення.

Практика показала, що найбільше стійко протікає процес розпилення речовини катода при його охолодженні водою 9 (холодний катод).

При катодному розпиленні застосовують аноди, які не піддаються ерозії. Їхня робота повинна протікати в ненапруженому тепловому режимі. Варто прагнути до мінімального спаду анодного потенціалу і дифузійного розподілу розряду по поверхні анода. При цьому знижується як абсолютна величина енергії, виділеної на аноді, так і величина питомої енергії на одиниці площі. Анодна пляма переміщається по поверхні зі швидкістю близько 10^4 м/с. Це, значною мірою, і оберігає анод від руйнування.

Пари розпиленої речовини, проходячи через дуговий розряд, значною мірою іонізуються. У залежності від умов ведення процесу ступінь іонізації знаходиться в широких межах і складає від 20 до 90 %. Завдяки цьому з'являється можливість формувати потік частинок 5 у напрямку поверхні напилювання 6. На практиці використовують два способи впливу на іонізовані частинки потоку: електромагнітним впливом і подачею на напилюваний виріб негативного зсуву. В електромагнітних (холловських) торцевих прискорювачах 3 прискорення частинок здійснюється під дією сили ампера. Для подачі на виріб негативного потенціалу передбачений високовольтний випрямляч 10, що забезпечує регулювання напруги в широких межах. Спосіб напилювання покритть вибуховим розпиленням катода дугою низького тиску розроблений Харківським фізико-технічним інститутом і названий способом КІБ (конденсація в поєднанні з іонним бомбардуванням). При удосконалюванні цього способу був введений холлівський плазмовий прискорювач. Спосіб також часто називають іонно-плазмовим вакуумним напилюванням, відзначаючи тим самим формування покритть переважно з іонізованого потоку частинок.

1.4.2 Параметри режиму напилювання і їхній вплив на ефективність процесу

Катодному розпиленню матеріалу дугою низького тиску властиві специфічні параметри режиму при напилюванні покритть.

Конструктивні параметри. Особливо великий вплив на стабільність процесу має конструкція і розміри анодного вузла. Недостатня площа анода і слабе його охолодження приводять до швидкої його ерозії. Важливим є і відстань між анодом і катодом, що розпилюється. Звичайно його вибирають у межах 50—100 мм. Збільшення відстані підвищує ступінь іонізації потоку пари. Однак продуктивність розпилення знижується. Велику роль відіграє конструкція магнітної системи стабілізації катодної плями на торці матеріалу, що розпилюється. Блукання катодної

плями поза торцем негативно впливає на можливість керування потоком частинок. Особливо велике значення на формування потоку частинок і їхню енергію має конструкція магнітного прискорювача і параметри його роботи. Конструктивні параметри закладаються при проектуванні і виготовленні установок. У процесі роботи необхідно підтримувати їхній вихідний стан.

1.4.3 Параметри режиму роботи розпилювача

Найбільше впливає на ефективність процесу питома потужність дугового розряду, а також потенціал зсуву, який подається на напилюваний виріб, і індукція магнітного поля. Ці параметри, в основному, визначають середню енергію іонів, густину потоку енергії плазмового струменя, густину потоку іонів і інші показники.

З підвищенням питомої потужності дуги зростає швидкість розпилення катода і, відповідно, продуктивність напилювання. При цьому ростуть показники параметрів потоку частинок. Питома потужність дуги регулюється двома параметрами: силою струму дуги і площею катода, що розпорошується. Напруга дугового розряду змінюється мало і складає 30—40 В. При заданих розмірах площі матеріалу, що розпилюється, основним енергетичним параметром є сила струму дуги. Сучасні установки дозволяють вести процес при силі струму від 20 до 1000 А. Найчастіше використовують значення струму 100 — 300 А (густина 1 — 20 А/см²). Великі густини струму різко збільшують у паровому потоці кількість конденсованої фази.

Індукція магнітного поля найбільше впливає на густину у потоці іонізованих частинок. Звичайно величину індукції В змінюють у межах від 0 до 4,5 мТл. На рис. 12, б показана якісна залежність впливу величини струму дуги й індукції магнітного поля котушки на густину струму іонів у розпилюваному потоці.

Потенціал зсуву впливає на швидкість іонного травлення вихідної поверхні напилювання і швидкості конденсації.

Параметри речовини, що розпилюється. Для вибухового розпилення катода дугою низького тиску застосовують матеріал у формі дисків (діаметром 50—100 мм і товщиною 15—20 мм), стрижнів і іншої форми. Звичайно площа поверхні, що розпилюється, складає 20—30 см² і більше. Це відповідає густині струму 5—20 А/см². При ерозії катода на поверхні диска утвориться чашоподібна заглибина. Стабільність процесу залежить від температури речовини, що розпилюється. Підвищення температури порушує кінетику блукання катодних плям, збільшує кількість конденсованої фази в потоці. Для усунення впливу температурного

фактора матеріал катода інтенсивно охолоджується водою.

Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання. Для стабілізації дугового розряду тиск у камері підтримують на рівні 10^{-1} — 10^{-2} Па. Дистанцію напилювання вибирають у межах 200 — 350 мм. Вплив інших параметрів аналогічний для всієї групи вакуумних конденсаційних методів напилювання.

Параметри потоку розпилюваних частинок. Зміною параметрів напилювання, розглянутих раніше, удається створювати потоки із широким діапазоном показників: густина потоку частинок 10^{20} — 10^2 частинок/см²·с; енергія частинок 5—40 eV; ступінь іонізації 20—90%; швидкість руху частинок 10^3 — 10^5 м/с; кількість конденсованої фази до 10 %.

1.4.4 Области застосування методу. Переваги і недоліки

Вакуумне конденсаційне напилювання вибуховим розпиленням матеріалу дугою низького тиску може бути використане для нанесення покриттів різного призначення з багатьох матеріалів. Особливе поширення метод одержав при вакуумному реакційному напилюванні зносостійких покриттів.

Переваги методу: універсальність за розпилюваними речовинами і покриттями; висока продуктивність процесу ($V_n = 1$ — 3 мкм/хв і вище); висока якість покриттів, особливо адгезійна міцність; підвищена кількість параметрів процесу і гнучкість їхнього регулювання; спрощене одержання покриттів з рівномірною товщиною.

До недоліків методу варто віднести наявність у потоці значної кількості конденсованої фази. Це ускладнює установки для напилювання за рахунок введення нових вузлів для сепарації потоку.

Перспективним напрямком у розвитку методу є застосування анодної форми дуги (рис. 11), використання сканувального імпульсного лазерного й електронного променя й ін.

1.5 Способи і технологічні особливості вакуумного конденсаційного напилювання покриттів іонним розпиленням

Речовина, що розпилюється, бомбардується прискореним потоком позитивно заряджених іонів (рис. 13). Найчастіше для цих цілей використовують тліючий розряд при невисокому розрідженні в камері (1 — $1 \cdot 10^{-1}$ Па). Уперше катодне розпилення в тліючому розряді спостерігав Гроув у 1948 р. На речовину, що розпилюється, подають негативний потенціал і він виконує в тліючому розряді роль катода.

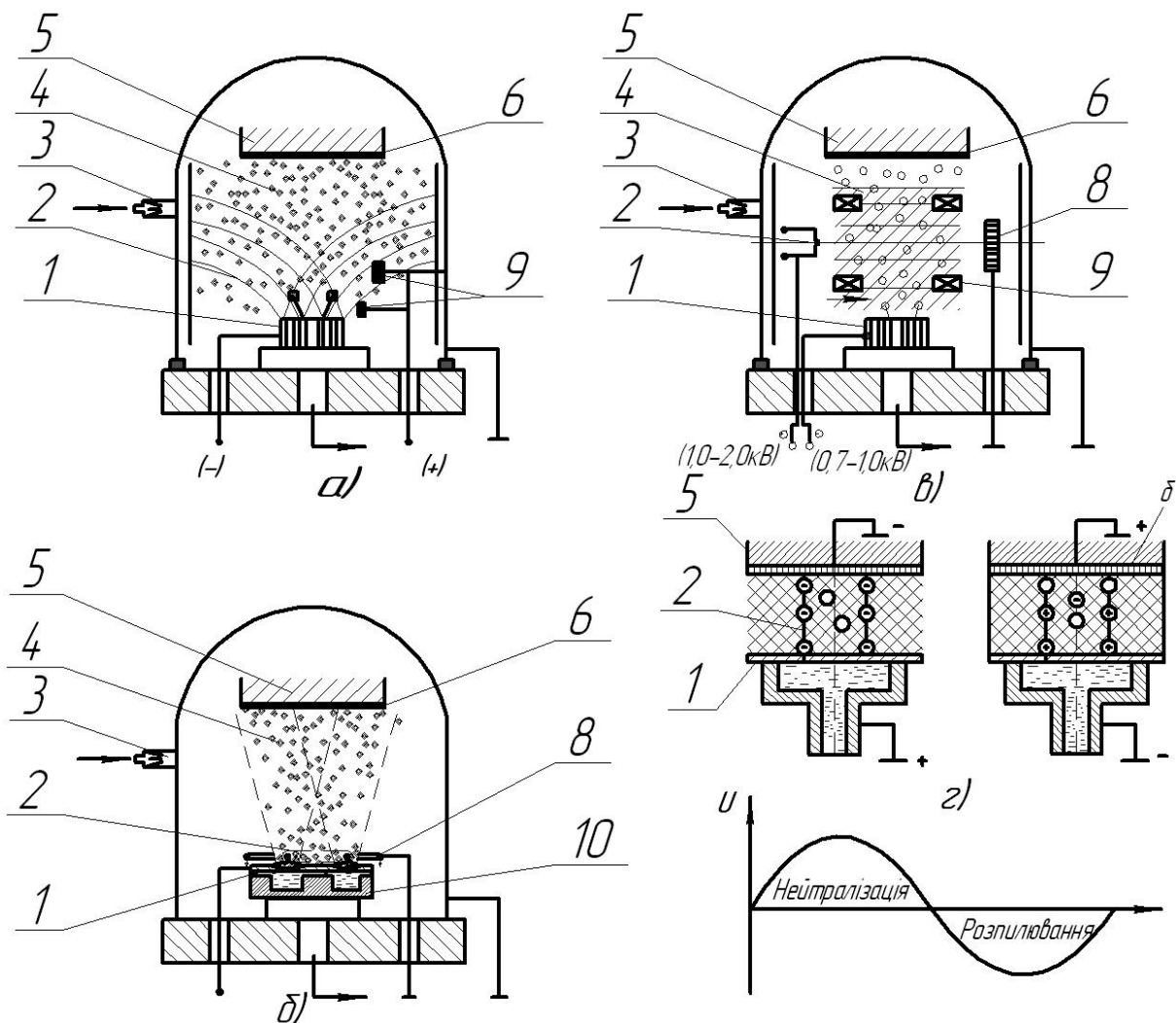


Рисунок 13 — Схеми напилювання покриттів катодним розпилювачем: а — діодна; б — тріодна; в — магнетронна; г — діодна ВЧ-розрядом; 1 — речовина, що розпилюється, (катод); 2 — тліючий розряд; 3 — наповнювач; 4 — потік розпилюваних частинок; 5 — напилюваний виріб; 6 — покриття; 7 — гарячий катод; 8 — анод; 9 — магнітна котушка; 10 — постійні магніти

Тому часто зустрічається інша назва процесу — напилювання покриттів катодним розпиленням. Для утворення позитивних іонів у розряді використовують аргон або інші гази, що подають у камеру через спеціальний наповнювач. Якщо в камеру подаються активні гази (азоту, оксиду вуглецю й ін.), то відбувається процес реакційного напилювання покриттів.

При розпиленні діелектриків їх розташовують на струмопровідному електроді.

Розпилення катода відбувається за такими механізмами:

1) вибивання частинок (атомів, молекул) у результаті прямої

передачі імпульсу позитивного іона поверхні розпилення;

2) у зоні удару енергія, що виділяється, створює умови, подібні з вибуховим випаровуванням речовини, що розпилюється.

У момент зіткнення з речовиною, що розпилюється, іон передає частину енергії кристалічним ґраткам. Розпилення відбувається, якщо енергія іона перевищує деяке граничне значення. Для більшості матеріалів граничні значення лежать в інтервалі 1—100 eV. Із збільшенням енергії іонів розпилення підсилюється. Спостерігається вихід атомів з матеріалу, що розпилюється, із глибини до 8 нм. (20 атомних шарів). Продуктами розпилення є нейтральні атоми (молекули). Частка заряджених частинок (позитивних і негативних іонів) складає близько 1 %.

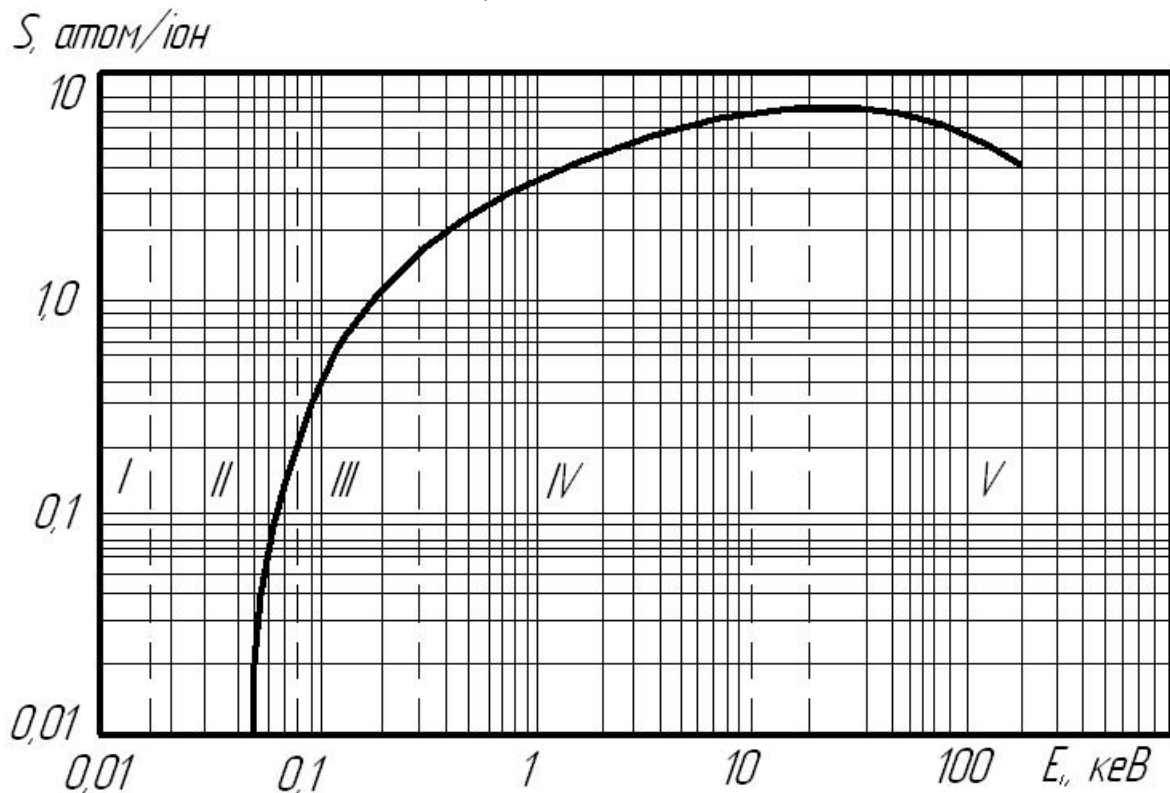


Рисунок 14 — Залежність коефіцієнта розпилення S від енергії бомбардувальних іонів, E_i

Ефективність іонного розпилення S (атом/іон) характеризується числом розпилених атомів N_a , які приходяться на один бомбардувальний іон N_i

$$S = N_a / N_i, \quad (1.8)$$

де S — коефіцієнт розпилення (число атомів, вибитих одним іоном).

Величину S можна виразити через втрату маси розпилюваної речовини (Δm , мкг), іонний струм (j , мкА) і час (τ , год):

$$S = \frac{K \cdot \Delta m}{A \cdot j \cdot \tau}, \quad (1.9)$$

де K — коефіцієнт, що залежить від вибору одиниць;
 A — масове число атомів.

На практиці часто розраховують швидкість розпилення матеріалу ($V_{роз}$, $мкг/мкА \cdot год$) за формулою

$$V_{роз} = 3.7 \cdot 10^{-2} \cdot A \cdot S, \quad (1.10)$$

або

$$V_{роз} = 6,15 \cdot 10^{12} \cdot S \cdot j. \quad (1.11)$$

Як видно з наведених залежностей, одним з найбільш значимих показників ефективності процесу є коефіцієнт розпилення. В основному цей показник визначається енергією іонів, які бомбардують поверхню виробу. Значення E_i повинне бути вище граничного (E_{in}) для кожної речовини, що розпилюється. На рис. 14 показана залежність $S = f(E_i)$ у загальному вигляді. Область I відноситься до допорогових значень енергії. Розпилення матеріалу практично не відбувається. В області II енергія іонів близька до граничної. Процес розпилення матеріалу інтенсифікується. Зі збільшенням енергії іонів значно вище граничної ($E_i \gg E_{in}$) розпилення матеріалу різко прискорюється. Залежність стає лінійною (область III). Подальше збільшення енергії іонів веде до загасання процесу (область IV, V). Іони велику частину своєї енергії розсіюють всередині речовини, що розпилюється.

На практиці одержали поширення різні схеми катодного розпилення, що відрізняються умовами утворення плазми тліючого розряду: діодна, тріодна і магнетронна (рис. 13).

1.5.1 Діодна схема іонного розпилення

Речовина, що розпилюється, у вигляді пластини (диска) товщиною кілька міліметрів з розміром поверхні близьким до розміру поверхні напилюваного виробу, зміцнюють на водоохолоджувальному електроді-катоді, до якого підводять негативний потенціал від джерела живлення. Другий електрод (анод) поміщають на відстані в декілька сантиметрів від катода (рис. 13, а). У ряді випадків анод може служити опорою для установки і закріплення напилюваного виробу. На анод подається позитивний потенціал джерела. Разом з камерою анод знаходиться під потенціалом землі. Умови існування тліючого розряду при діодній схемі процесу ускладнюють. Тому процес ведуть при максимально високому припустимому тиску робочого газу (1 — 10 Па), і підвищеній напрузі джерела живлення (5—10 кВ). Незважаючи на це реалізовані густини іонного струму не перевищують 0,1—5 $мА/см^2$. Швидкість розпилення катода, а отже, і швидкість конденсації невелика і складає 0,2—2 $Нм/с$. Утворенні вторинні високоенергетичні електрони (3—5 кВ) бомбардують

поверхню напилювання, сприяючи перегріву виробу. Діодну схему катодного розпилення застосовують в основному для напилювання тонких плівкових шарів при виробництві інтегральних схем і інших виробів радіоелектронної техніки. Для напилювання захисних покриттів ця схема не ефективна.

Одним з різновидів діодної схеми є високочастотне катодне розпилення (рис. 13, з).

Звичайні способи катодного розпилення не дозволяють проводити напилювання покриттів з діелектриків. У процесі іонного бомбардування на поверхні діелектрика, що розпилюється, накопичується позитивний заряд. Унаслідок цього поле концентрується поблизу матеріалу, що розпоршується, а не в розпилюваному газовому середовищі. Густина потоку іонів і їхня енергія різко падають. Розпилення практично припиняється.

При високочастотному розпиленні завдяки змінному впливові на матеріал електронів, що розпилюється, і іонів заряд не утвориться. Цим обумовлене активне розпилення діелектриків. Позитивний заряд, що накопичується на об'єкті, що розпилюється, нейтралізується електронами протягом позитивного півперіоду. Розпилення матеріалу відбувається тільки в негативні півперіоди. Розходження в рухливості іонів і електронів створює навколо електродів оболонку, збагачену іонами. Ці іони бомбардують поверхню, викликаючи її розпилення.

Високочастотне іонне розпилення найчастіше застосовують для напилювання тонких діелектричних плівок.

1.5.2 Тріодна схема іонного (катодного) розпилення

Прагнення підвищити ступінь іонізації робочого газу в тліючому розряді і, тим самим, збільшити кількість іонів, які бомбардують, призвело до створення трьохелектродної схеми процесу (рис. 13, б). Гарячий катод (7) є додатковим джерелом для електронів. Для збудження розряду між гарячим катодом і анодом (8) прикладають високу напругу (1,0— 2,0 кВ). Найбільша ефективність іонізації газу досягається за рахунок надання електронам складного руху. Цю роль виконує магнітна котушка (9). Магнітне поле, впливаючи на тліючий розряд, змінює головним чином, характер руху електронів. На більш важкі іони магнітне поле впливає слабо. В основному застосовують подовжнє магнітне поле, рівнобіжне електричному полю в темному катодному просторі. Під впливом магнітного поля електрони роблять більш складні рухи навколо магнітних ліній, наприклад, по спіралі. Зростає ефективна довжина шляху електронів і, отже, збільшується ступінь іонізації робочого газу.

Допоміжний катод, анод і котушка складають генератор плазми, незалежно від речовини, що розпилюється, і напилюваного виробу. Напилюваний виріб розташовують поблизу плазми або занурюють виріб у неї. Легко бачити, що напруга, яка подається на речовину, що розпилюється, (катод), не впливає на розряд, що творить плазму. Це дозволяє регулювати прискорювальну напругу, не застосовуючи її високих значень. Допускається велика гнучкість у виборі форми і положення катода, що розпилюється.

На речовину, що розпилюється, (холодний катод) подається негативний потенціал напругою (0,7—1,0 кВ). Створюються умови прискорення іонів з області гарячого катода в напрямку речовини, що розпилюється. На анод подається позитивний зсув відносно напилюваного виробу. Це запобігає рухові електронів до напилюваної поверхні і знижує небезпеку перегріву виробу.

Тріодна схема процесу розпилення катода значною мірою усуває недоліки, властиві діодній схемі. Процес ведуть при більш низьких тисках робочого газу (10^{-1} Па і нижче). Продуктивність розпилення зростає в кілька разів.

1.5.3 Магнетронна схема іонного (катодного) розпилення

Подальше підвищення густини іонного потоку, а отже, і швидкості розпилення забезпечують магнетронні системи (рис. 13, в). Під речовиною, що розпилюється, (катодом) 1 розташовують магніти 10. Силкові лінії у вигляді дуг замикаються між полюсами $N-S$, утворюючи неоднорідне магнітне поле. Над катодом поміщають кільцевий анод 8. При подачі постійної напруги (300—1000 В) між катодом і анодом виникає електричне поле напруженістю E і збуджується тліючий розряд. Силкові лінії електричного поля перпендикулярні поверхні катода і магнітним силовим лініям B . Електрони, імітовані катодом під впливом схрещених полів рухаються по циклоїдальних траєкторіях. У площині, рівнобіжній площині катода, утвориться область замкнутого дрейфу електронів. При русі електрони випробують багаторазові зіткнення з атомами робочого газу й іонізують його. Втративши велику частину своєї енергії електрони попадають на анод. Складний, замкнутий рух електронів і обумовлює зростання концентрації іонів, поблизу матеріалу, який розпилюється. Зона інтенсивного розпилення поверхні має вигляд замкнутої доріжки, розміри і форма якої визначаються геометрією магнітної системи.

У кільцеподібній зоні ступінь іонізації робочого газу наближається до 100%. Це дозволяє досягти високої густини іонного струму, що досягає

10—20 mA/cm^2 . Завдяки цьому, швидкість розпилення наближається до електронно-променевого термічного випаровування або вибухового розпилення катода дугою низького тиску. Гранична швидкість розпилення визначається теплопровідністю речовини, що розпилюється, і умовами його охолодження. Водяне охолодження речовини катода запобігає його високому нагріванню й оплавленню.

Магнетронні системи з різними просторовими формами мішені дозволяють напилювати покриття на складні поверхні виробів, наприклад, зовнішні або внутрішні циліндричні поверхні виробів.

1.5.4 Параметри вакуумного конденсаційного напилювання і їхній вплив на ефективність процесу

Конструктивні параметри. Ці параметри дуже впливають на показники ефективності. Так, введення гарячого катода або магнітної системи в двохелектродну схему різко інтенсифікує процес розпилення, знижує нагрівання анода і зменшує небезпеку перегріванню напилюваного виробу. Для того, щоб зосередити розпилення матеріалу катода, з однієї сторони встановлюють екрани. Металеві екрани повинні бути розташовані на відстані від речовини, що розпилюється, менше товщини катодного темного простору, повторювати на цьому рівні всі контури катода і мати потенціал анода. Гарні результати дає екранування катода діелектричними плівками. Від конструкції екрана залежить рівномірність розпилення катода. Зокрема, можна усунути крайовий ефект розпилення, коли краї мішені розпилюються швидше інших ділянок поверхні катода. Недостатня екранізація приводить до розпилення матеріалів, використовуваних для закріплення катода, збільшується густина повного іонного струму.

Параметри речовини, що розпилюється. На коефіцієнт розпилення, як це впливає з рівнянь (1.8) — (1.11) дуже впливають фізико-хімічні властивості речовини, що розпилюється. Величина S залежить від атомного номера і структури електронних оболонок. Вона зростає із заповненням d -оболонок атомів. Найбільші значення характерні для атомів з повним заповненням d -оболонки (міді, срібла, кадмію, золота). У табл. 4 наведені коефіцієнти розпилення і середні швидкості магнетронного напилювання покриттів з деяких матеріалів. Для розпилення застосовували плоскі мішені діаметром 150 мм. Потужність тліючого розряду складала 4 кВт, дистанція напилювання 60 мм.

Дуже впливає форма і розміри речовини, що розпилюється. Очевидно розміри поверхні розпилення повинні відповідати потоковій плазмі тліючого розряду. Часто розміри поверхні розпилення вибирають близькими до розмірів напилюваної поверхні. У загальному випадку в

залежності від способу (схеми) іонного розпилення площу мішеней, що розпилюються, вибирають у широких межах — від десятків до тисяч квадратних сантиметрів. У багатьох випадках застосовують плоскі мішені діаметром 50—200 мм, товщиною 5—15 мм.

Таблиця 4 — Коефіцієнт розпилення S і швидкість росту покриття V_n для деяких матеріалів

Матеріал, що розпилюється	S для іонів аргону з енергією 600 eV, атом/іон	Швидкість осадження $nm \cdot s^{-1}$	Матеріал, що розпилюється	S для іонів аргону з енергією 600 eV, атом/іон	Швидкість осадження $nm \cdot s^{-1}$
<i>Si</i>	0,5	6,7	<i>Ge</i>	1,2	12,8
<i>Ti</i>	0,6	7,8	<i>Cr</i>	1,3	16,6
<i>Ta</i>	0,6	7,8	<i>Pt</i>	1,6	21
<i>W</i>	0,6	7,8	<i>Cu</i>	2,8	30,0
<i>Nb</i>	0,65	8,4	<i>Pd</i>	2,4	31,2
<i>Mo</i>	0,9	11,7	<i>Au</i>	2,8	36,7
<i>Al</i>	1,2	12,7	<i>Ag</i>	3,4	44,2

Висуваються високі вимоги до хімічного складу матеріалу, що розпилюється. У ньому повинна міститися мінімальна кількість газів у несучільностях і твердому розчині. Негативні результати викликає наявність у структурі матеріалу сторонніх включень, що розпилюється. Поверхня мішені повинна бути без забруднень різного походження.

Коефіцієнт розпилення матеріалу мало залежить від його температури. Однак при іонному бомбардуванні на катоді виділяється близько 75 % потужності розряду. Для того, щоб уникнути небажаного підплавлення поверхні, речовину, що розпилюється інтенсивно прохолоджують. Це дозволяє істотно підвищити густину струму і, відповідно, швидкість розпилення.

Параметри режиму розпилення. Ці параметри впливають на показники ефективності процесу і легко регулюються. До них відносяться: рід робочого газу, потужність розряду і її складовий струм і напруга.

Рід робочого газу дуже впливає на процес розпилення. Максимальне розпилення викликають іони елементів із заповненими d -оболонками (*Cu*, *Ti*, *Ag* і ін.) або p -оболонками (*Ar*, *Kr* і ін.). В основному як робочий газ застосовують аргон як найбільш доступний і економічний. Можуть бути використані й інші інертні гази. Чим тяжчий газ, тим ефективніший процес розпилення (рис. 15, *a*).

Найбільш значимим і легко регульованим параметром процесу є

потужність тліючого розряду. Зі збільшенням потужності продуктивність напилювання зростає. У залежності від способу іонного розпилення реалізуються потужності від 2,0 до 50 кВт або, відповідно, густині енергії 10^1 — 10^4 Вт/см².

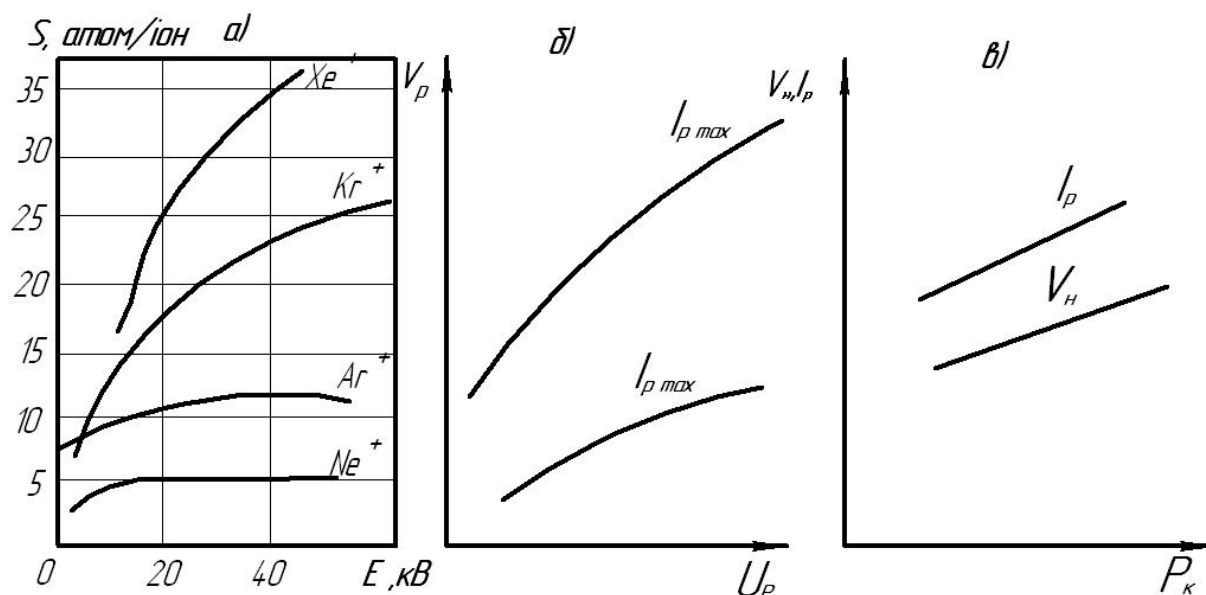


Рисунок 15 — Вплив режиму напилювання на ефективність процесу:

а — вплив роду робочого газу й енергії іонів на процес розпилення; б — залежність швидкості розпилення матеріалу V_p від напруги U_p і струму розряду I_p ; в — залежність швидкості напилювання V_n і струму розряду I_p від тиску робочого газу в камері P_k

Кількість іонів, які бомбардують, пропорційна густині струму. Тому продуктивність процесу визначається величиною струму. Напруга розряду впливає менше (рис. 15, б). При досягненні певних значень енергія іонів мало впливає на коефіцієнт розпилення. Найбільша ефективність напилювання досягається при веденні процесу при низькій напрузі і високій густині струму. Цього можна легко досягти, застосовуючи тріодну або магнетронну схему напилювання. Часто для цих цілей збільшують тиск робочого газу в камері. З ростом тиску збільшується концентрація іонів у розряді, а отже, і густина струму. Якщо збільшення тиску не занадто велике, то залежність близька до лінійного (рис. 15, в). Зростанням тиску в камері до певних значень можна підвищувати продуктивність напилювання без збільшення потужності джерела живлення. При великих тисках спостерігається зворотна дифузія атомів на поверхню розпилення і продуктивність знижується. Наприклад, при $P_k = 13,3$ Па тільки близько

10 % атомів проникає за межі темного катодного простору.

У практиці напилювання використовують струми в межах 100—1500 *mA* ($0,1—50 \text{ mA/cm}^2$) і напруга розряду 500—1500 *V*.

Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання. До них відносяться тиск робочого газу в камері, дистанція напилювання, кут зустрічі потоку з поверхнею, закономірності руху напилюваних виробів і ін.

Тиск робочого газу в камері впливає на стабільність розряду, продуктивність розпилення і напилювання, а також формування покриття. З підвищенням тиску стабільність розряду зростає, збільшується, як це було показано, і продуктивність розпилення. Очевидно, що підвищення тиску не сприяє повному перенесенні частинок на поверхню напилювання. Відбувається втрата енергії частинок і їхнє розсіювання в об'ємі камери. У залежності від способу іонного розпилення процес ведуть при $P_k = 10 - 10^{-2} \text{ Па}$.

Дистанцію напилювання вибирають мінімальною і вона складає 40—150 *mm*. Завдяки цьому коефіцієнт використання маси наближається до 100 %. Із зниженням відстані іонний струм падає і швидкість розпилення знижується.

Параметри потоку. Кутовий розподіл частинок у загальному випадку не підкоряється законові косинуса, як при термічних способах випаровування. Густина потоку розпилюваних частинок знаходиться в широких межах. Невелика густина $10^{14}—10^{16} \text{ частинок/cm}^2 \cdot \text{с}$ характерна для діодної схеми розпилення. Для магнетронної схеми густини досягають $10^{20}—10^{22} \text{ частинок/cm}^2 \cdot \text{с}$ і близькі до густини при електронно-променевому випаровуванні і дуговому вибуховому розпиленні матеріалу катода. Ступінь іонізації розпиленних частинок також залежить від способу. Діодна і тріодна схеми забезпечують ступінь іонізації близьку до 1 %. Звичайно це атоми (молекули) або агрегати з атомів. Магнетронна схема дозволяє різко підвищити іонізацію розпиленних атомів до 20 % і більше. Енергія розпиленних атомів у багато разів вища енергії випаруваних атомів. Так, середня енергія (\bar{E}) атомів міді, випаровуваних при температурі 1500 *K* зі швидкістю $5 \cdot 10^{17} \text{ ат/cm}^2 \cdot \text{с}$ складає 0,26 *eV*. Середня енергія атомів міді розпиленних іонами криптону з енергією 900 *eV* дорівнює 9,25 *eV*. Середня енергія розпиленних атомів залежить від енергії іонів E_i , які бомбардують, властивостей речовини, що розпилюється, кута вильоту, досягаючи значень 200 *eV* і більше. Величина E_i значно перевищує енергію сублімації і досягає максимуму для матеріалів, що мають мінімальний коефіцієнтом розпилення. Зростанню E сприяє збільшення E_i , зменшення маси m_i , зниження кута падіння іонів (збільшенням глибини проникнення в

матеріал, що розпилюється).

Вплив параметрів потоку частинок на якість покрить аналогічний іншим методам вакуумного конденсаційного напилювання.

1.5.5 Переваги і недоліки напилювання покрить іонним розпиленням

До переваг методу варто віднести: одержання покрить з багатьох матеріалів практично без зміни їхнього складу при розпиленні; високий коефіцієнт використання матеріалу (*КВМ*), що наближається до одиниці; висока продуктивність процесу при магнетронній схемі розпилення (1 *мкм/хв* і вище); високий енергетичний рівень розпиленних атомів.

Недоліками методу є: низький *ККД* процесу (~1 %). Велика частина енергії затрачається на нагрівання речовини, що розпилюється; недостатній ступінь іонізації потоку розпиленних частинок, особливо при діодній і тріодній схемах розпилення.

Великі можливості полягають в удосконалюванні магнетронної схеми розпилення. Перспективний спосіб розпилення пучком прискорених іонів, одержуваних в окремих камерах.

1.6 Вакуумне конденсаційне реакційне напилювання покрить

Покриття з деяких карбідів, нітридів, оксидів і інших сполук не можуть бути напилені звичайними вакуумними конденсаційними методами. Відбувається часткове або повне їхнє розкладання. Такі сполуки в покриттях доцільно одержувати за допомогою реакцій між атомами парового потоку металу й атомами спеціально введеними у камеру хімічно активних газів. Молекули сполук утворюються при зіткненні атомів реагуючих елементів. Наприклад, при зіткненні атомів азоту і титану утворюються молекули нітриду титану; кисню і титану — оксиди титану й ін. Синтез сполук, в основному, відбувається на поверхні напилювання. Залежить від швидкості надходження атомів у зону реакції, енергії частинок, що конденсуються, коефіцієнта конденсації, температури напилюваного виробу й ін.

Кількість атомів металу N_{Me} , що надходять на поверхню напилювання, можна виразити через швидкість конденсації, нехтуючи їх розсіюванням газоподібними молекулами.

$$N_{Me} = \frac{N_A \cdot \rho \cdot V_k}{M}, \quad (1.12)$$

де N_A — число Авогадро; ρ — густина металу, $г/см^3$;
 V_k — швидкість конденсації, $см \cdot с^{-1}$;

M — молекулярна маса металу.

Кількість молекул газу (N_g), що зіштовхуються з поверхнею напилювання, можна визначити з виразу:

$$N_g = 2,63 \cdot 10^{20} \cdot (M_g \cdot T_g)^{-\frac{1}{2}} \cdot P_g, \quad (1.13)$$

де M_g — молекулярна маса газу;

T_g, P_g — температура і парціальний тиск газу.

Реакцію між атомами металу і газу стимулюють їхньою активацією або краще іонізацією. Залежність змісту в покритті неметалевого елемента (азоту, кисню, вуглецю) виражається рівнянням:

$$C_x = \frac{j}{\bar{Z}_e} \cdot (\varepsilon_0 + \bar{Z}_e \cdot U) - \frac{W(T)}{Q}, \quad (1.14)$$

де j — густина іонного струму на напилюваному виробі; \bar{Z}_e — середній заряд конденсованих іонів;

U — негативний потенціал на виробі;

$W(T)$ — втрати енергії за рахунок теплопровідності і випромінювання;

Q — потенційний бар'єр реакції, чисельно рівний енергії атомізації вихідних компонентів.

Величину Q можна визначити з формули:

$$Q = \Delta H_x, \quad (1.15)$$

де ΔH_x — енергія дисоціації молекули реактивного газу.

Середню енергію конденсованих іонів ε_i визначають так:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + \bar{Z}_e \cdot U, \quad (1.16)$$

Розрахунки і практика напилювання покриттів показали, що C_x росте лінійно зі збільшенням ε_i до певного тиску робочого газу в камері P_k . При підвищеному тиску, обумовленому родом робочого газу, C_x мало залежить від енергії іонів. Для цих умов рівняння (1.14) спрощується

$$C_x = K_k \cdot P_k, \quad (1.17)$$

де K_k — коефіцієнт конденсації молекул неметалу.

Більш високий тиск газів у камері при реакційному конденсаційному напилюванні в порівнянні з прямим випаровуванням або розпиленням збільшує імовірність зіткнення і дифузійного розсіювання конденсованих атомів і іонів. У результаті покриття осаджується і на «затінених» ділянках напилюваного виробу, наприклад, на зворотній стороні. Цей ефект проявляється тим інтенсивніше, чим вищий тиск у камері. Для аргону розсіювання проявляється при тисках вище $6,6 \cdot 10^{-2}$ Па; для C_2H_4 — вище $6,6 \cdot 10^{-2}$ Па. Відзначена особливість реакційного напилювання дозволяє одержувати рівномірні покриття на відносно складних поверхнях без переміщення невеликих за габаритами виробів.

Реакційне осадження можна проводити з використанням усіх раніше розглянутих методів вакуумного конденсаційного напилювання.

2 УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

2.1 Основні елементи установок і їхня класифікація

Принципові структурно-технологічні схеми установок для вакуумного конденсаційного напилювання покриттів, незважаючи на їх різноманітність, містять у тому або іншому вигляді такі основні системи, пристрої і прилади:

1. Вакуумну систему, що включає робочу камеру, засоби відкачування й ін.
2. Випарні або розпилювальні пристрої — генератори потоку напилюваних частинок.
3. Систему електроживлення.
4. Системи живлення робочим газом, водяного охолодження і підігріву.
5. Транспортувальні пристрої й оснащення.
6. Системи контролю і керування.
7. Інші допоміжні пристрої і прилади. Функціональна блок-схема установки для вакуумного конденсаційного напилювання показана на рис. 16.

У світовій практиці використовується велика кількість установок різних видів і модифікацій. Створилися умови для їхнього промислового виробництва з високим ступенем механізації й автоматизації і достатнім ступенем надійності і довговічності. Основу класифікації складають різні ознаки.

1. За режимом роботи розрізняють установки з періодичною, напівбезперервною і безперервною дією.
2. За конструктивним компонованням установки підрозділяють на установки з вертикальним розташуванням робочої камери (ковпакові) і горизонтальним.
3. За структурною будовою установки розділяють на однопозиційні і багатопозиційні.
4. За характером засобів відкачування — з масляними засобами відкачування і безмасляними. Відповідно низьковакуумні і високовакуумні.
5. За типом розпилювальних пристроїв розрізняють установки термічного випаровування; вибухового дугового випаровування ; іонного розпилення; змішаного типу розпилення.

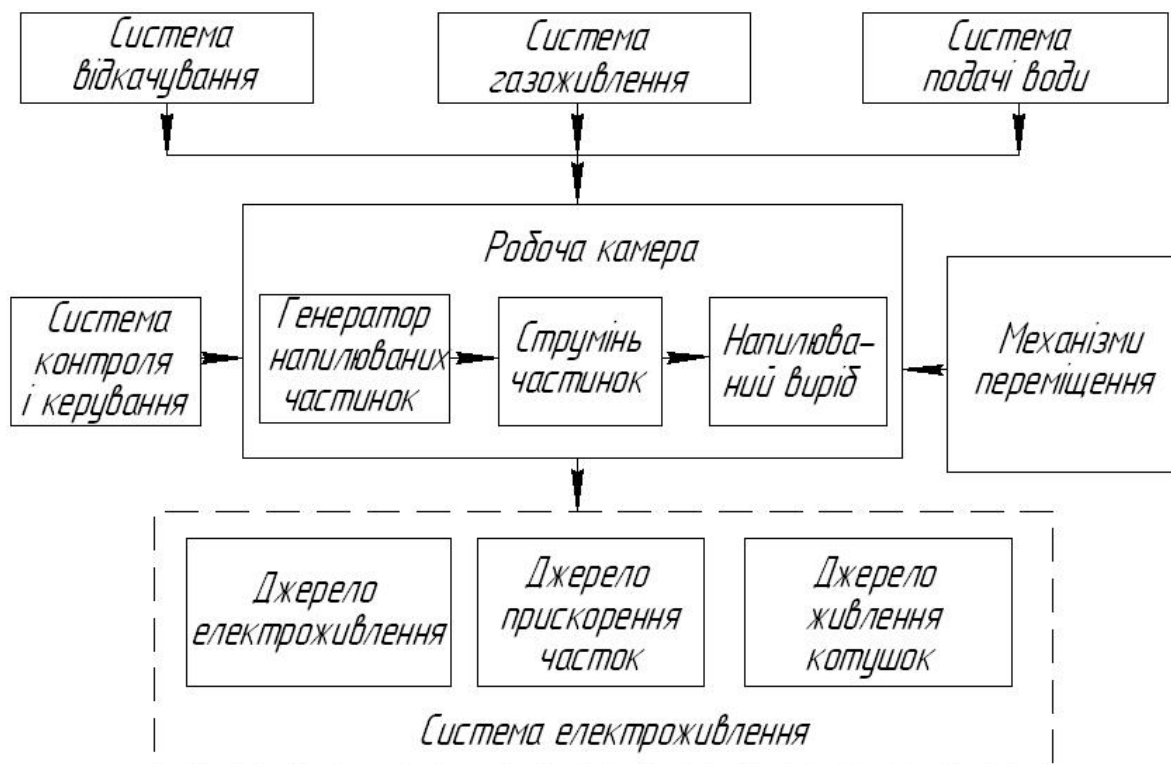


Рисунок 16 — Функціональна блок-схема установки для вакуумного конденсаційного напилювання покриттів

За призначенням установки поділяють на лабораторні; промислові для дрібносерійного виробництва; промислові для крупносерійного виробництва.

2.1.1 Вимоги, що висуваються до установок

Сучасні установки для вакуумного конденсаційного напилювання являють собою складні комплекси. Тому одна з основних вимог полягає в їхній надійності і високих техніко-економічних показниках. Установки повинні бути зручні в експлуатації, легко піддаватися розбиранню для проведення ремонтних робіт і очищення. Важливе значення має швидкість відкачування робочої камери при мінімальному потоці пари масла з відкачувальної системи. Для виготовлення основних елементів установок доцільно використовувати корозійностійкі (неіржавіючі) сталі або інші матеріали. Ряд елементів установок повинні бути оброблені з високим ступенем чистоти.

2.1.2 Компонування установок

Установки випускають як в однокорпусному виконанні, так і в багатоблочному виконанні, де блоки установки зв'язані між собою комунікаційними лініями. Виготовляють установки, у яких виділені в окремі блоки робоча камера з розпилювачем із іншими вузлами: система відкачування; система силового електроживлення; система керування і т.д.

2.2 Вакуумна система установок

2.2.1 Компонування вакуумних систем установок

До вакуумної системи відносять робочу камеру; перекачувальні насоси; комунікаційні трубопроводи; запірнорегулювальну апаратуру; засіб виміру вакууму і парціальних тисків; апаратуру керування процесом відкачування. У найбільш простому вигляді вакуумна система установок показана на рис. 17. Для створення вакууму використані масляні насоси. Первісне відкачування повітря з камери 1 здійснюється форвакуумним насосом 9 через вентиль 7. При досягненні в камері тиску близько 1 Па подальше відкачування проводять дифузійним насосом 5 через вентиль 6. У системі передбачений високовакуумний затвор 3; пастка масляної пари 4; вентилі 2 і 8 для напуску повітря відповідно в камеру і насос.

Вакуумні системи на базі дифузійних насосів забезпечують залишковий граничний тиск $10^{-3} - 10^{-5}$ Па. Вони отримали найбільше поширення завдяки порівняно невисокій вартості, простоті пристрою, надійності і зручності в експлуатації, швидкодії в досить широкому інтервалі тисків. Здатні швидко відновлювати в робочому об'ємі необхідний вакуум при газових навантаженнях, які різко змінюються.

Надвисокі вакуумні системи ($10^{-6} - 10^{-7}$ Па) будують на базі «безмасляних» гетероіонних, турбомолекулярних, а також кріогенних насосів. В установках для вакуумного конденсаційного напилювання ці системи поки що не одержали поширення.

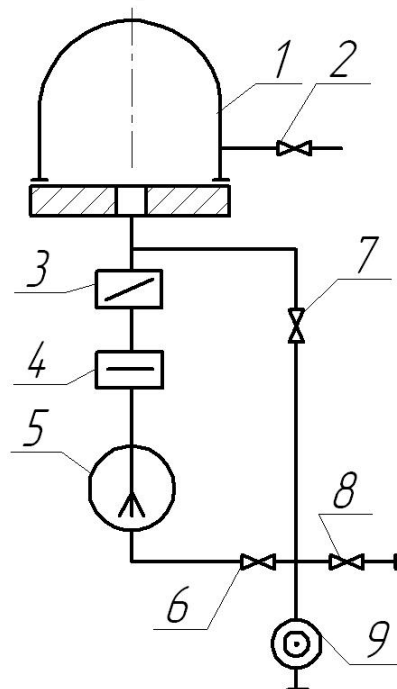


Рисунок 17 — Вакуумна система установок для вакуумного конденсаційного напилювання покриттів

2.2.2 Робоча камера

Камера призначена для безпосереднього ведення процесу напилювання. У залежності від призначення установки в камері повинний підтримуватися вакуум від 1 до 10^{-5} Па. У камеру поміщають розпилювач (випарник), механізми закріплення і переміщення напилюваних виробів, екрани, заслінки, маски, датчики контролю й інші пристрої. Найбільше поширення в серійних установках одержали піднімальні камери ковпакового типу, що розташовуються на базовій плиті; кубічної форми з відкидними люками, циліндричні з висувною або відкидною передньою стінкою й ін. Камери виготовляють, в основному, з корозійностійких сталей з мінімальним газовиділенням з поверхні. На корпусі камери є люки для спостереження за процесом, патрубків із фланцем для приєднання вакуумпроводів різного призначення (для наповнення робочого газу при розгерметизації камери, приводних валів і т.д.). Для ущільнень використовують білу вакуумну гуму, силіконову гуму при температурі понад 60°C , фторопласт, пластинчасті метали. Мідна трубка на зовнішній поверхні, призначена для первісного прогріву камери або її охолодження після закінчення процесу.

2.2.3 Вакуумні насоси

Призначені для відкачування газів з камери, комунікаційних трубопроводів і підтримки вакууму на заданому рівні. Застосовують насоси двох типів: низьковакуумні (форвакуумні) і високовакуумні.

Низьковакуумні насоси. Відносяться до механічного типу з масляним ущільненням. Найбільше поширення отримали насоси пластинчатоторного типу. Насоси серії НВЗ забезпечують швидкість відкачування $100\text{—}500$ л/с і розрідження в камері $10\text{—}10^{-1}$ Па.

Високовакуумні насоси. В основному застосовують високовакуумні паромасляні агрегати типу АПВ зі швидкістю відкачування $100\text{—}700$ л/с, що забезпечують залишковий тиск у камері $10^{-4}\text{—}10^{-6}$ Па.

Робочі рідини, використовувані в дифузійних насосах, повинні задовольняти рядові вимоги, зокрема: мати високу стійкість проти термічного розкладання й окислювання при робочих температурах; мати низький тиск пари при температурах, близьких до кімнатної.

Як робочі рідини в дифузійних насосах широко застосовують спеціальні органічні масла.

Основні труднощі при створенні високого вакууму в камері пов'язані зі зворотним потоком пари робочої рідини. Його необхідно уловлювати спеціальними пастками. Для більшої ефективності конденсації пари пастки прохолоджують, наприклад, рідким азотом.

2.3 Пристрої для випаровування і розпилення матеріалу. Розпилювачі

Генератори потоку розпилюваних частинок (розпилювачі) відносяться до найбільш відповідальних елементів установок для вакуумного конденсаційного напилювання. Конструктивне виконання розпилювачів визначається способами напилювання. У зв'язку з цим в установках зустрічається велика кількість різноманітних пристроїв для одержання потоку розпилених частинок. Для будь-якого розпилювача характерна наявність речовини, що розпилюється, і джерела розпилення. У більш складних схемах розпилювачів є інші елементи: джерела іонізації потоку пари; прискорювачі заряджених іонів; системи керування потоками частинок; сепаратори й ін.

2.3.1 Термічні випарники (розпилювачі)

Ці випарники застосовують в установках для напилювання покриттів термічним випаровуванням. Широка розмаїтість конструкцій випарників обумовлена багатьма факторами, які необхідно враховувати при виборі способу напилювання і режимів процесу. Зокрема, застосування того або іншого випарника визначається: хімічною природою матеріалу, що випаровується; температурою і швидкістю випаровування; сталістю в часі; вихідною формою матеріалу, що випаровується, (моноліт, порошок, дріт і ін.); масовою ємністю завантаження; діаграмою спрямованості парового потоку; тривалістю процесу напилювання і т.д.

Найбільш прості у виготовленні й експлуатації випарники резистивного типу з прямим нагріванням. Їх випускають промисловим способом, і вони мають різноманітні форми і розміри (див. рис. 9. Для цього використовують дріт, фольгу, спечені вироби у вигляді човників. Матеріалами для випарників служать тугоплавкі метали і з'єднання з високою температурою плавлення і низьким тиском пари. Розплавлений матеріал повинний мати в процесі контактування мінімальну взаємодію з матеріалом випарника. Тому для кожного матеріалу, який випаровується, у довідковій літературі рекомендується матеріал випарника (дроту, фольги т.д.). Недоліком резистивних випарників, особливо дротового типу, є мала кількість матеріалу, що випаровується, і наявність контактної взаємодії. Процес спрощується, якщо матеріал, який випаровується, здатний до сублимації. Такі метали, як хром, молібден, паладій, ванадій, залізо й ін., мають високий тиск насиченої пари ($1,0 \text{ Па}$ і вище) до їхнього розплавлення. Це дає можливість безпосереднього випаровування матеріалу резистора. Тим самим виключається проблема контактування.

Широко застосовуються також резистивні випарники з непрямим

нагріванням матеріалу, що розпилюється. У таких пристроях відсутній безпосередній контакт між резистором і матеріалом, що випаровується. Найбільш поширені випарники тигельного типу із зовнішнім резистивним нагріванням. До переваг таких випарників варто віднести високу продуктивність процесу і стабільність температури матеріалу, що випаровується. Як і при прямому нагріванні, не вдається уникнути контактної взаємодії матеріалу, що розпилюється, з матеріалом тигля. На рис. 18, а, б приведена конструктивна схема тигельного випарника із зовнішнім нагрівачем, перфорованого у вигляді змійки. Тиглі виготовляють з тугоплавких металів (молібдену, вольфраму й ін.); тугоплавких оксидів (ZrO_2 , BeO ; Al_2O_3 і ін.); нітриду бора, графіту і ряду інших матеріалів.

Великий інтерес представляють сублімаційні випарники з непрямим нагріванням. Одна з можливих схем показана на рис. 18, б. Стрижень 4 з матеріалу, що випаровується, поміщають у простір циліндричного нагрівача 3. Достоїнством таких випарників є повна відсутність контактування матеріалу, що випаровується. Сублімаційні випарники відрізняються невисокою продуктивністю, придатні тільки для обмеженої кількості матеріалів, що випаровуються.

Випарники з ВЧ-індукційним нагріванням (рис. 19, а), в основному, складаються з тигля і розташованого по зовнішній поверхні індуктора. Тигель з розплавленим матеріалом установлюють на термостійку підставку і центрують в індукторі стрижнем.

Для зменшення теплових витрат за рахунок випромінювання його поміщають у теплову ізоляцію. Витки індуктора покриті високотемпературною електричною ізоляцією. Це запобігає можливості міжвиткових коротких замикань. При створенні тигельних випарників із ВЧ-нагрівом варто враховувати: необхідність обмеження напруги на протяжному індукторі в зв'язку з можливістю іонізації залишкових газів при наявності високочастотного поля; пошук найбільш сприятливої форми тигля і матеріалу для його виготовлення; створення термозахисту; вибір найбільш раціональної геометрії індуктора і його електроізоляції.

Тиглі у випарниках з індукційним нагріванням варто виготовляти з тугоплавких і електропровідних матеріалів, які мають високу термостійкість, хімічну інертність до розплавленого матеріалу і т.д. Для виготовлення тиглів часто застосовують графіт, цирконовий графіт, рідше безкисневі матеріали (бориди, карбідні й ін.). Для теплового захисту придатні графітізовані тканини, повстяні графіти і ряд інших матеріалів.

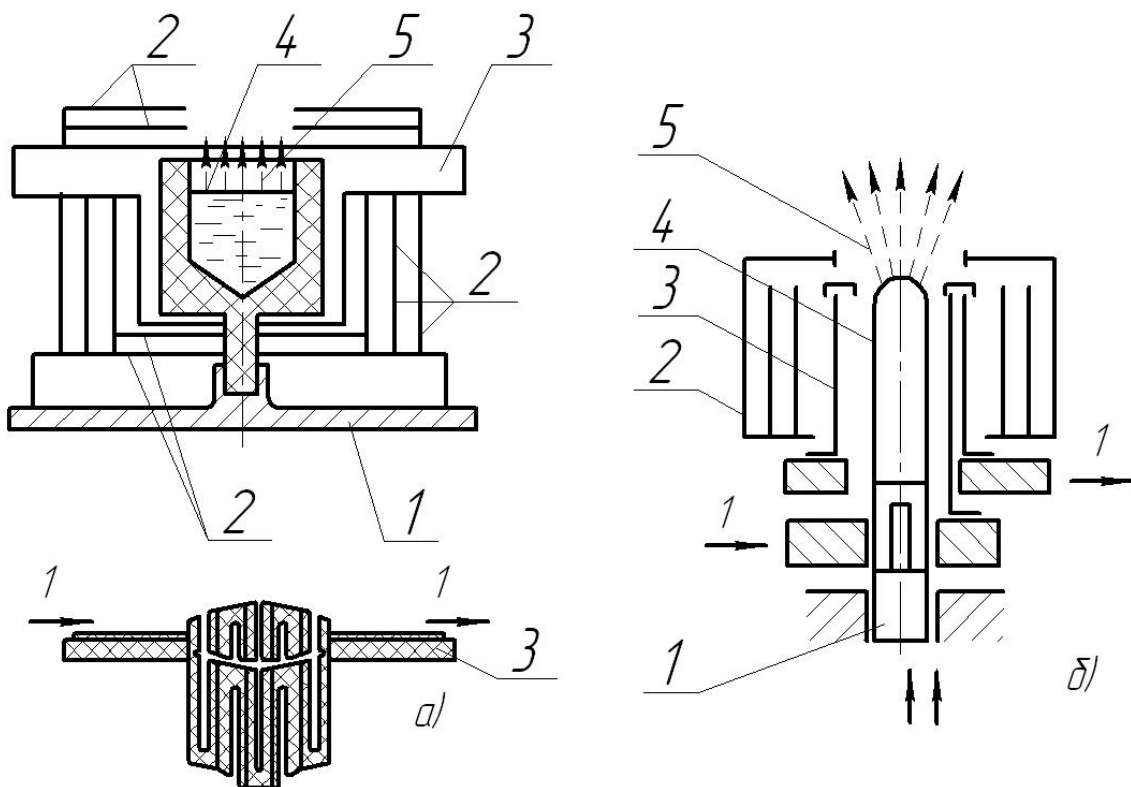


Рисунок 18 — Конструктивні схеми випарників з непрямим нагріванням: а — тигельний; б — сублімаційний; 1 — тримач; 2 — теплові екрани; 3 — нагрівач; 4 — матеріал, що випаровується; 5 — потік пари
а)

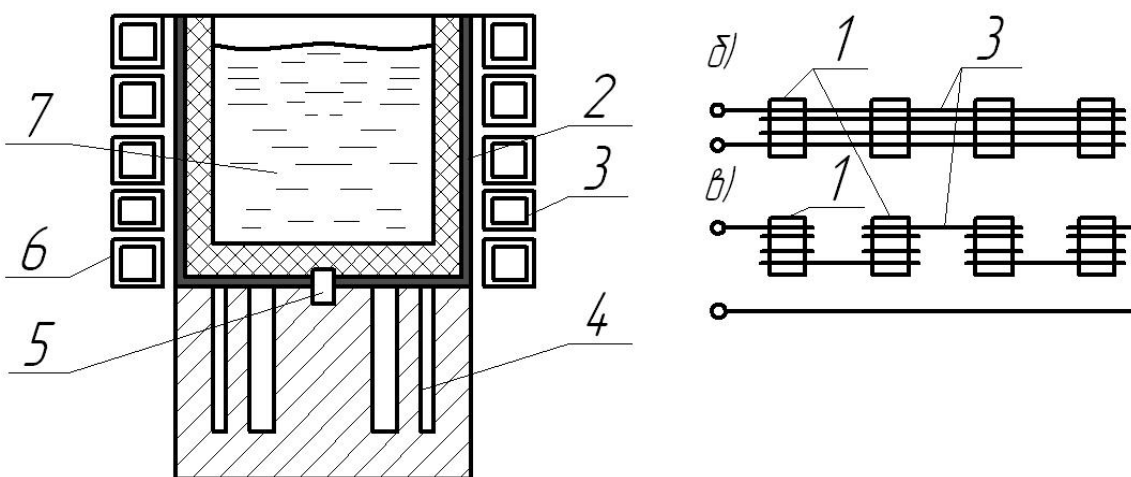


Рисунок 19 — Конструктивна схема випарника з ВЧ-індукційним нагріванням (а), схемами індукторів з обхватом тиглів загальними витками (б) і з послідовним з'єднанням витків індуктора (в):
1 — тигель; 2 — теплоізоляція; 3 — індуктор; 4 — підставка; 5 — центрувальний стрижень; 6 — електроізоляційне покриття; 7 — матеріал, що випаровується

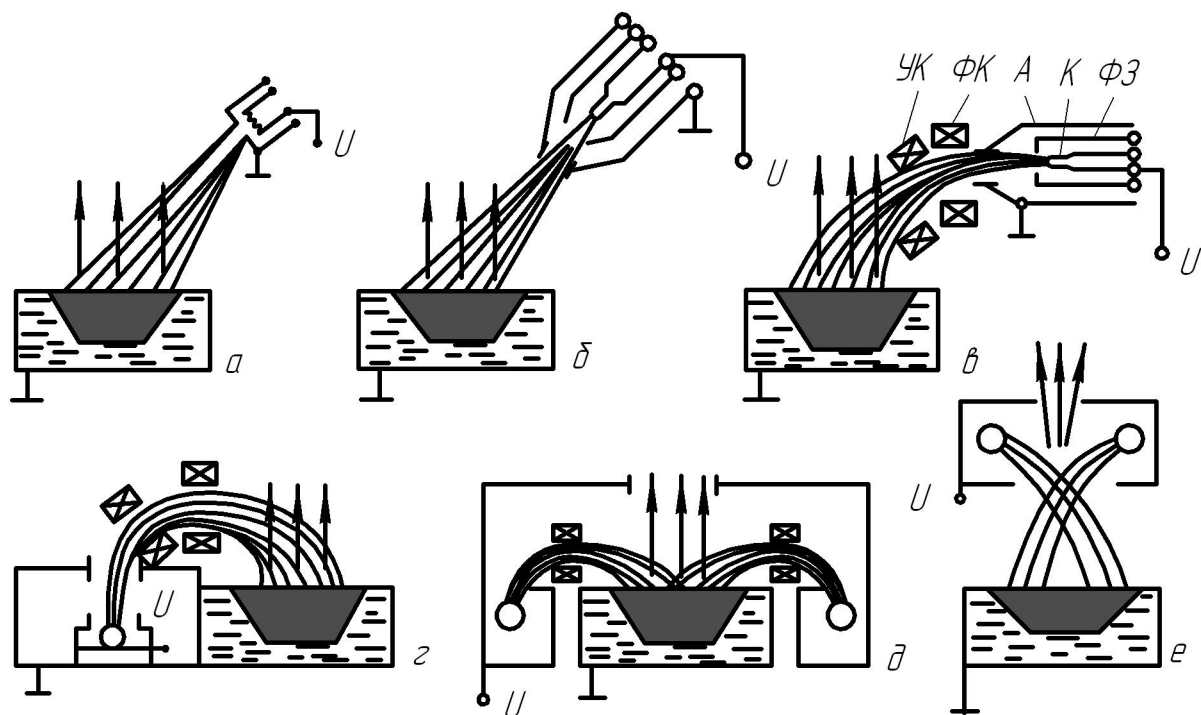


Рисунок 20 — Схеми електронно-променевих випарників:
а – лінійний катод, електростатичне фокусування; *б* – довгофокусна гармата; *в* – аксіальна гармата (магнітне фокусування, магнітний поворот електронного променя на 90°); *г* – магнітний поворот променя на 180° ; *д* – кільцевий катод (поворот променя на 180°); *е* – кільцевий катод без повороту променя (суцільними стрілками позначений потік пари)

При запуску тигельних випарників часто спостерігається інтенсивне газовиділення, що приводить до викиду розплавленого матеріалу. Для усунення цього недоліку необхідна їхня попередня дегазація. Іншим небажаним процесом є міграція розплаву через верхню крайку тигля на його сусідню поверхню. Існує кілька способів приглушення міграції: створення на шляху мігруючого матеріалу бар'єрних покриттів з великими кутами змочування при робочих температурах; застосування кільцевих уставок на торці тигля.

Для розширення можливостей методу поряд з однитигельними випарниками застосовують і багатотигельні. У цих випадках використовують різні схеми індукторів (рис. 19, б, в).

Найбільше поширення в практиці напилювання покриттів одержали електронно-променеві випарники. Їхні схеми і конструктивне виконання досить різноманітні (рис. 20). В наш час у випарниках отримали поширення два типи електронно-променевих гармат: аксіальні, які формують вісесиметричний потік електронів; плоскопроменеві, що

перетворюють первісний плоский пучок електронів у циліндричний. Незважаючи на конструктивні відмінності в гарматах є (рис. 20, в): катод К, який фокусує електрод ФЕ і прискорювальний анод А. Між катодом і анодом прикладена висока напруга, звичайно 15—30 кВ і більше. Потік електронів проходить через канал в аноді і далі рухається по інерції. Безанодні електроннопроменеві гармати, у яких анодом служить матеріал, що випаровується, одержали менше поширення. У заанодному просторі є електромагнітні котушки для фокусування променів ФК і керування УК променем за допомогою його відхилення, розвернення і т. д.

2.3.2 Вибухові розпилювачі (випарники)

В основному застосовують розпилювачі з використанням катодної форми дуги низького тиску. До складу розпилювача (рис. 21) входить катод з матеріалу, що розпилюється, 1, масивний анод 5, електромагнітна котушка стабілізації катодної плями на поверхні матеріалу, що розпилюється, 4, електромагнітна котушка для прискорення розпилюваних частинок і їхнього фокусування 5, пристрій для запалювання дуги 2. Катодний і анодний вузли розпилювача охолоджуються водою. Дуговий розряд збуджується різними способами. На наведеній схемі запалювання дуги здійснюється випаровуванням плівки між катодом 1 і допоміжним електродом 2. Надалі розряд з допоміжного електрода переходить в основний дуговий розряд між анодом і катодом, що розпилюється.

2.3.3 Іонні розпилювачі

Конструкція іонних розпилювачів залежить від способу напилювання. Схематично іонні розпилювачі показані на рис. 13.

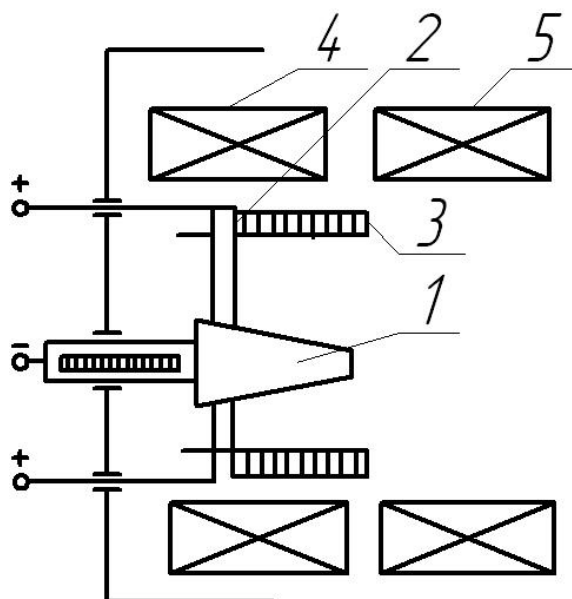


Рисунок 21 — Схема вибухового дугового розпилювача — випарника

2.4 Системи електроживлення в установках для вакуумного конденсаційного напилювання

Установки для вакуумного конденсаційного напилювання покрить мають досить різноманітні схеми електроживлення. Складовими елементами схем є: силові джерела електроживлення; високовольтні джерела для прискорення іонізованих частинок і очищення поверхні напилювання (джерела негативного зсуву); джерела живлення електромагнітних котушок; допоміжні джерела різного призначення (підігріву напилюваних виробів і ін.).

2.4.1 Силові джерела електроживлення

Вимоги до силового джерела живлення визначаються споживачем електричної енергії: резистором, різними типами електричних розрядів, індуктором, електронною гарматою й ін. джерелами енергії у випарниках і розпилювачах установок.

Джерела живлення резистивних нагрівачів. Відносяться до найпростіших джерел (рис. 22). Звичайно, це низьковольтні силові однофазні трансформатори з підвищеним внутрішнім опором і, отже, спадною вольт-амперною характеристикою. Вторинна обмотка таких трансформаторів секційована на кілька ступенів регулювання. Наприклад, в установці УВН—2М передбачені чотири ступеня з напругою холостого ходу 4, 8, 16, 32 В.

Первинна обмотка живиться від регулятора напруги (індукційного або тиристорного типу). Це дозволяє плавно регулювати величину струму, що протікає по резистору в широкому діапазоні. Для установки УВН—2М діапазон настроювання джерела за струмом складає 60—500 А.

Високочастотні джерела для індукційного нагрівання. Споживачем електричної енергії є індуктор, що складається з декількох водоохолоджуваних витків (див. рис. 22). Для нагрівання матеріалу, що випаровується, потрібна висока потужність, яка досягає 20—100 кВт. Напругу, що подається на індуктор, обмежують 200 В.

У практиці напилювання використовують загальнопромислові перетворювачі частоти, наприклад, ВПЧ—500/8000; ВПЧ—100—800 і ін. Джерела живлення електронно-променевої гармати. Електронна гармата відноситься до складних споживачів електричної енергії. Для живлення прожектора гармати потрібна висока напруга (2—60 кВ) і висока потужність (до 150 кВт). Поряд з високовольтним джерелом для живлення гармати використовують кілька малопотужних джерел: для розжарення катода; живлення прикатодного (керуючого) електрода; живлення фокусувальної і відхилювальної котушок. До кожного з цих джерел

висувають специфічні вимоги, обумовлені технологічним процесом напилювання.

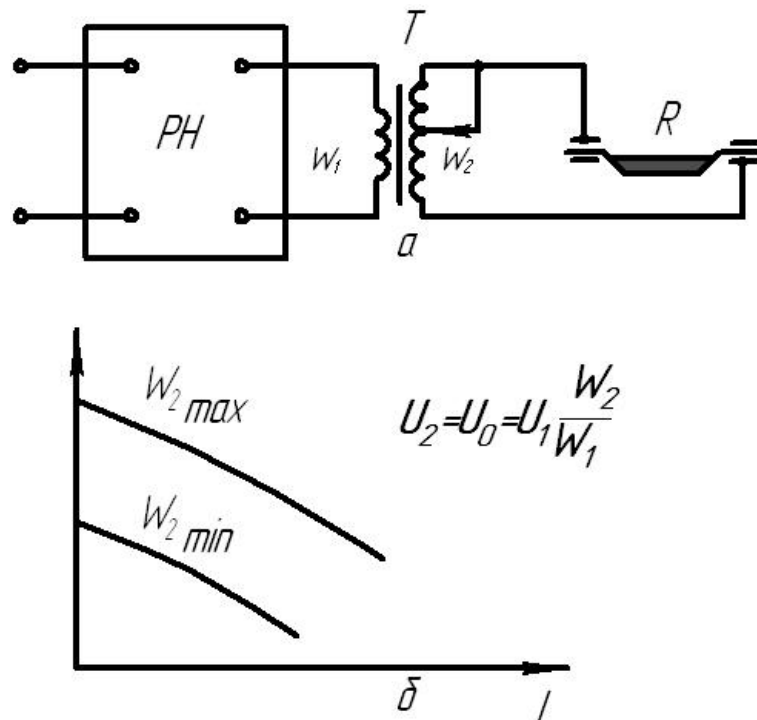


Рисунок 22 — Схема електроживлення, резистивних нагрівачів (а) і вольт-амперна характеристика (б): PH — регулятор напруги; R — резистивний нагрівач; W_1 , W_2 — кількість витків у первинній обмотці трансформатора

На рис. 23, а наведена принципова електрична схема джерела живлення електронної гармати. У схемі виділені окремі блоки живлення.

Блок високовольтний (БВВ) призначений для живлення прожектора гармати. Прискорювальна напруга підводиться до катода K і анода A прожектора. Регулятор напруги PH забезпечує настроювання режиму роботи гармати на необхідну потужність. Одночасно з цим для настроювання може бути використаний блок розжарення катода $БР$ і блок живлення керуючого електрода $БКЕ$.

Блок живлення керуючого електрода звичайно називають модулятором. Змінюючи негативний зсув на керуючому електроді, регулюють величину струму електронного променя I_{el} . Основні вимоги до джерел живлення (блоки БФК і БОК) електромагнітних котушок фокусувальної ФК і відхилювальної ОК полягають у високій стабілізації вихідної напруги з мінімальною пульсацією; можливому регулюванню струму в широких межах.

Для електронно-променевого нагрівання застосовують різні блоки живлення, що випускаються промисловістю.

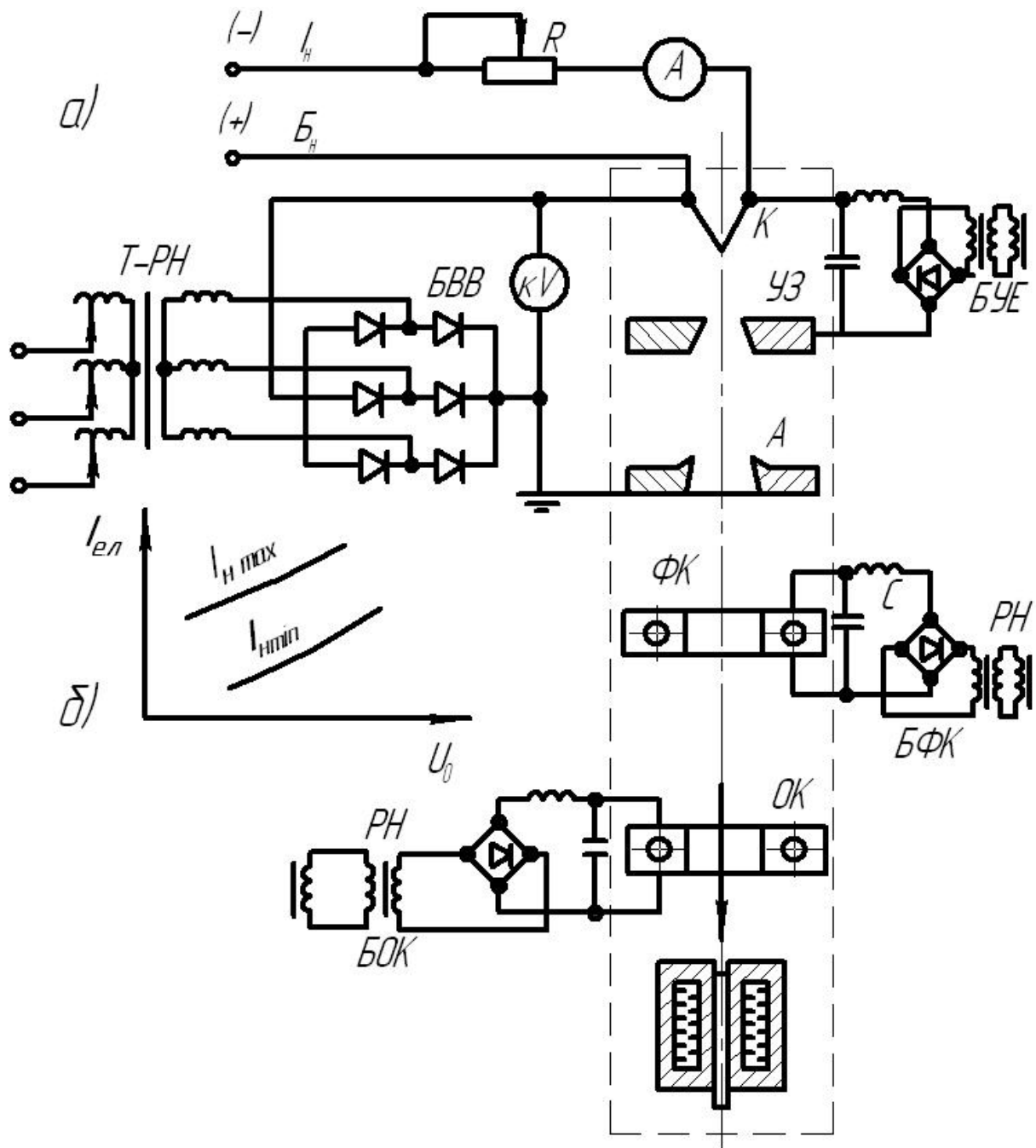


Рисунок 23 — Принципова електрична схема джерела живлення електронної гармати (а) і регульовальні залежності (б)

2.4.2 Джерела живлення дуги в дугових випарниках (розпилувачах)

Споживачем енергії є дуговий розряд при зниженому тиску. Вакуумною дугою називають потужноструминний розряд, що горить у парах матеріалу електрода. Розрізняють дуговий розряд катодної й анодної форми. Катодна форма вакуумної дуги з розрядом, що розвивається в парах матеріалу катода, одержала найбільше поширення як джерело

енергії для розпилення. Розряд стійко існує в струмовому діапазоні від десятків—сотень амперів до одиниць кілоампер. Напруга горіння дуги складає $10\text{—}30\text{ В}$ і практично не залежить від розрядного струму. Основна частина в напрузі дуги приходить на катодний спад потенціалу, обумовлений, в основному, матеріалом катода. Середовище, необхідне для існування дугового розряду, утвориться в результаті випаровування матеріалу катода з області катодних мікроплям із густиною потоку енергії $10^6\text{—}10^7\text{ Вт/см}^2$. Спад напруги на масивному аноді невеликий і складає одиниці вольтів. Зміна довжини дуги в широкому діапазоні мало впливає на величину струму і напруги. З розглянутого випливає, що вакуумна дуга катодної форми при струмах, що не перевищують 1 кА , має малоспадну з переходом у тверду статичну вольт-амперну характеристику. Форма вольт-амперної характеристики вакуумної дуги мало залежить від її довжини.

Анодну форму вакуумної дуги також часто використовують для розпилення матеріалу при конденсаційному напилюванні покриттів. Вид статичної вольт-амперної характеристики аналогічній катодній формі дуги. Доцільніше застосовувати джерела постійного струму із спадною (крутоспадною) зовнішньою вольт-амперною характеристикою; з напругою холостого ходу $40\text{—}60\text{ В}$ і номінальним струмом до 1 кА . У першому наближенні для цих цілей можуть бути використані зварювальні генератори серії ПСО, зварювальні випрямлячі типу ВСВУ або інші джерела аналогічного типу.

2.4.3 Джерела живлення тліючого розряду в установках іонного розпилення

Споживачем енергії є нормальний тліючий електричний розряд у газовому середовищі при зниженому тиску ($13\text{—}0,13\text{ Па}$). Вимоги до джерела живлення багато в чому визначаються вольт-амперною характеристикою розряду. Вид характеристики розряду між електродами залежить від ряду факторів: тиску газів у камері; прикладеної напруги джерела живлення; конфігурації електродів; густині розрядного струму й ін. На рис. 24, *a* наведена вольт-амперна характеристика електричного розряду між двома плоскими електродами в газі при тиску від $13,3$ до $0,133\text{ Па}$. При досягненні певного значення напруги, названої пробивною або напругою запалювання U_3 , настає різкий пробій газового проміжку між електродами.

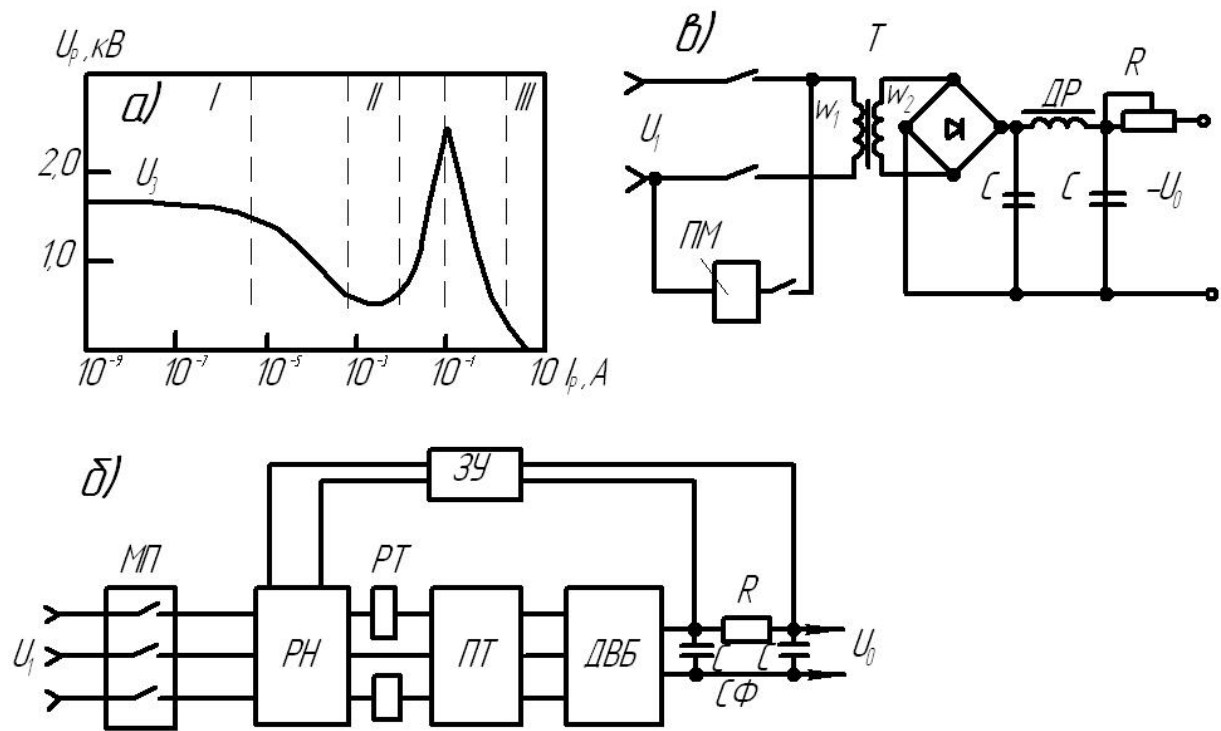


Рисунок 24 – Вольт-амперна характеристика електричного розряду при зниженому тиску (а); блок-схема джерела живлення (б) і джерела негативного зсуву (в)

Звичайно ця напруга складає 1—2 кВ. При малих струмах 10^{-9} — 10^{-4} А реалізується таунсендовський розряд, що не має значення в практиці іонного розпилення (область I). Підвищення струму розряду до 10^{-2} — 10^{-8} А приводить до появи нормального тліючого розряду з напругою 300—500 В (область II). Подальше збільшення струму обумовлює виникнення аномального тліючого розряду, а потім дугового (область III). Аналіз умов горіння тліючого розряду дозволяє визначити вимоги до джерел його живлення. Це, насамперед, регулятори напруг (рис. 24, б) потужністю 5—50 кВт. Напруга повинна регулюватися в межах 0,3—2,0 кВ; величина струму 0,01—1,5 А. Як регулятор напруги використовується, зокрема, трифазний тиристорний регулятор РН, що має багато переваг перед іншими регуляторами. Напруга з регулятора подається на підвищувальний трансформатор ПТ і далі на трифазний діодний випрямний блок (ДВБ). Для згладжування пульсацій випрямленого струму передбачений П-подібний фільтр СФ. З обмежувального опору R знімається напруга зворотного зв'язку для захисту джерела живлення від коротких замикань і дугових розрядів. При збільшенні струму в ланцюзі понад припустимі значення сигнал зворотного зв'язку надходить на захисний пристрій ЗУ, який закриває тиристорний регулятор. Для цієї ж мети призначені і реле

струму РТ у первинному ланцюзі підвищувального трансформатора. Робота джерела здійснюється в такому режимі. Джерело підключають до мережі за допомогою магнітного пускача МП. Напругу на виході джерела U_0 за допомогою регулятора напруги доводять до величини запалювання тліючого розряду (1—2 кВ). Після збудження цим же регулятором знижують напругу до робочої, необхідної для існування тліючого розряду (0,3—0,5 кВ). Розглянутий тип джерела має ряд недоліків. При зриві тліючого розряду або довільному вимиканні джерела в обмотках трансформатора за рахунок самоіндукції виникають великі стрибки напруг і високочастотні коливання. Захисні пристрої не мають високої швидкодії для погашення стрибків напруги. У результаті цього часто пробиваються діоди в блоці випрямлення. Інший недолік пов'язаний з перекручуванням кривої напруги при проходженні через тиристорний регулятор.

Останнім часом намітилися тенденції в застосуванні розділених джерел живлення: високовольтного — для збудження розряду і низьковольтного — для силового робочого режиму. У блоці живлення звичайно передбачають і інші джерела, наприклад, для очищення напилюваної поверхні і прискорення розпилюваних частинок.

Поряд з розглянутими схемами електроживлення розробляються й інші, більш досконалі джерела. У них передбачається стабілізація параметрів із введенням зворотних зв'язків.

2.4.4 Високовольтні джерела електроживлення

Призначаються для іонного очищення поверхні напилюваних виробів і прискорення іонізованих частинок у потоці при конденсації покриття. Такі джерела входять у блок електроживлення установки. Це малопотужні високовольтні джерела випрямленого струму (див. рис. 24, в). Первинна обмотка трансформатора Т включається в мережу магнітним пускачем ПМ. Вторинна обмотка приєднана до однофазного випрямного блока. Для згладжування пульсацій передбачений R—C фільтр. Регулювання напруги здійснюється трансформатором за допомогою зміни кількості витків у первинній обмотці. У цьому випадку трансформатор виконує роль регулятора напруги. Застосовують також окремі від трансформатора регулятори напруги індукційного і тиристорного типів. Величина струму розряду при обраній нарузі регулюється резистивним опором R. Джерело має плавнospадну зовнішню вольт-амперну характеристику; напруга холостого ходу 0,5—3,0 кВ і навантажувальні струми в межах 0,1—0,5 А і вище.

2.5 Установки для вакуумного конденсаційного напилювання покрить

2.5.1 Установки періодичної дії

Застосування установок з періодичною дією доцільне в одиничному і дрібносерійному виробництві, а також при проведенні великої групової обробки дрібних за розмірами однотипних виробів (інтегральних схем, різального інструмента й ін.). Цей тип установок незамінний при проведенні експериментів і відпрацюванню технологічних режимів процесу. Компонування установок різне. Багато з них виконані в однокорпусному виконанні. Часто зустрічаються установки, що складаються з декількох корпусних елементів: робочої камери, блока електроживлення, блока контролю і керування й ін. Промисловість випускає велику кількість установок періодичної дії. Деякі вітчизняні установки методів вакуумного конденсаційного напилювання розглянуті нижче.

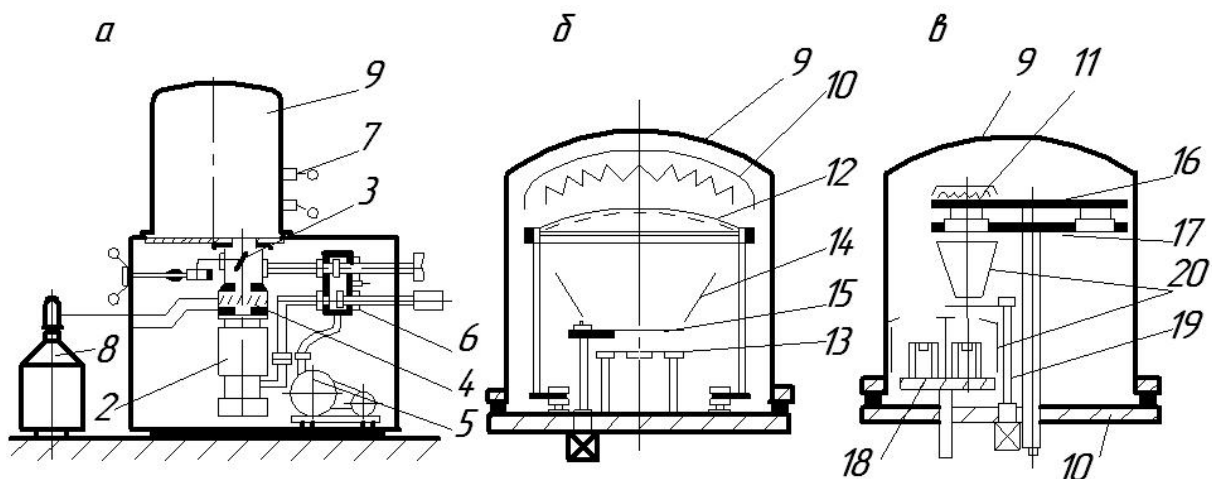


Рисунок 25 — Схеми базової установки УВН—2М (а) і технологічне оснащення в камерах одноопераційного (б) і багатоопераційного типів (в): 1 — камера; 2 — дифузійний насос; 3 — високовакуумний затвор; 4 — азотна пастка; 5 — механічний вакуумний насос; 6 — коробки клапанів керування відкачуванням; 7 — наповнювач робочого газу; 8 — посудина Дьюара; 9 — камера; 10 — базова плита; 11 — нагрівач напилюваних виробів; 12 — карусель з виробами; 13 — випарник; 14 — екран; 15 — заслінка; 16 — карусель напилюваних виробів; 17 — карусель масок; 18 — карусель випарників; 19 — заслінка; 20 — екран

2.5.2 Установки для вакуумного напилювання покрить термічним випаровуванням

Застосовують кілька типів установок, що розрізняються між собою способом нагрівання матеріалу, що випаровується. Це установки з резистивними, електронопроменевими, ВЧ-індукційними і дуговими випарниками.

Установки з резистивним нагріванням. Одержали досить широке застосування в практиці напилювання покрить різного призначення. На рис. 25 показана базова модель установки УВН—2М. Вона призначена для відпрацьовування технології роздільного напилювання і серійного виробництва плівкових елементів і схем. В установці застосована камера колпакового типу (Ø500 x 640 мм) з об'ємом 0,12 м³, що розташовується на базовій плиті. Вертикальний підйом камери здійснюється гідравлічним механізмом. У просторі камери розміщені випарники, напилювані вироби, каруселі, екрани й інше оснащення. Для напилювання покрить у багатоопераційному варіанті передбачена карусель випарників на п'ять позицій. Максимальна температура матеріалу, що випаровується, 1500 °С. Потужність джерел живлення резистивних нагрівачів складає до 20 кВт.

Установки електронно-променевого напилювання покриття. Являють собою досить складні й енергоємні агрегати, розраховані на безперервну роботу протягом 10—15 годин і більше. У колишньому СРСР розроблено ряд промислових і експериментальних установок з електронно-променевими випарниками. З них найбільше поширення одержали установки УЭ—137 і УЭ—175, розроблені в інституті електрозварювання для напилювання захисних покриттів на лопатки ГТД (рис. 26). Багатотигельний випарник складається з двох циліндричних тиглів 12 для випаровування металевих сплавів і трьох прямокутних тиглів 11 для випаровування хімічних сполук (карбідів, нітридів, оксидів). Із випаровуванням сплавів передбачена погоджена подача стрижнів спеціальним механізмом 13. Контроль рівня металу, що випаровується, здійснюється телевізійним слідкувальним пристроєм (на схемі не показаний). Багатотигельний випарник з лінійним розташуванням джерел дозволяє напилювати композиційні жаростійкі, теплозахисні й інші покриття.

Установка має три камери: робочу 1, допоміжну 6 і камеру для електронних гармат 2. До допоміжної (шлюзової) камери кріпиться привід 7 для подачі, переміщення й обертання напилюваних виробів 5. Використано стандартизовані електронні гармати для випаровування 3 і нагрівання виробів 4. Відкачування камер проводять диференційовано за допомогою високовакуумних насосів 15. В установці передбачена система

безконтактного контролю температури напилюваних виробів. Для цього використаний фотоелектричний пірометр випромінювання.

Значно більш досконала установка УЭ—175. Попереднє електронне нагрівання виробів здійснюється в допоміжних камерах, розташованих з обох сторін від робочої камери. Передбачено автоматичну систему контролю і керування технологічним процесом випаровування на базі персонального комп'ютера.

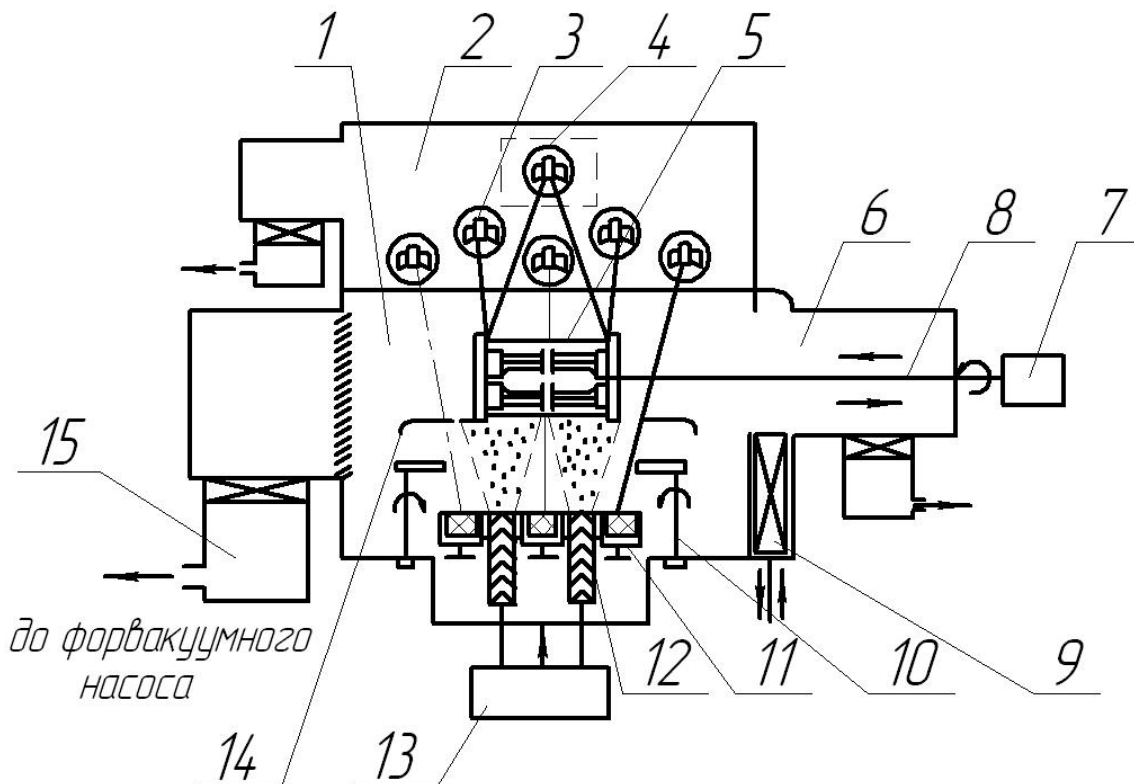


Рисунок 26 — Схема установки УЭ—137 для вакуумного конденсаційного напилювання електронно-променевим випаровуванням:

1 — камера випаровування; 2 — камера електронних гармат; 3 — п'ять гармат випарування; 4 — гармати нагрівання виробу; 5 — маніпулятор (напилювані деталі); 6 — камера нагрівання; 7 — привід; 8 — подавальний шток; 9 — вакуумний затвор; 10 — заслінка; 11, 12 — привід злитків; 13 — камера зливання; 14 — екран; 15 — відкачувальні насоси

Для напилювання покриттів електронно-променевим випаровуванням великогабаритних тіл обертання діаметром до 2,5 м, висотою до 2 м створені установки типу УТН.

Намітилися тенденції до оснащення електронно-променевих випарників пристроями для іонізації потоку пари.

Установки з електронно-променевими випарниками одержали велике поширення для напилювання конструкційних покриттів на різні вироби електронної техніки. Зокрема, широко відомі установки УВН—26П—5; УВН—83—1; «Лада—5» і ін. У них використані циліндричні горизонтальні камери з тримачами напилюваних виробів барабанного типу і вертикальні колпакові камери з транспортуючими пристроями карусельного типу.

2.5.3 Установки для вакуумного напилювання покриттів вибуховим дуговим розпиленням

Створено кілька типів установок високошвидкісного розпилення дугою низького тиску. Найбільше поширення одержали установки типу «Булат». На рис. 27 наведена схема такої установки з одним випарником. Базовим елементом установки є камера 1 з водяним змієвиковим охолодженням. Відкачувальні насоси 5 забезпечують у камері вакуум до 10^{-2} — 10^{-3} Па.

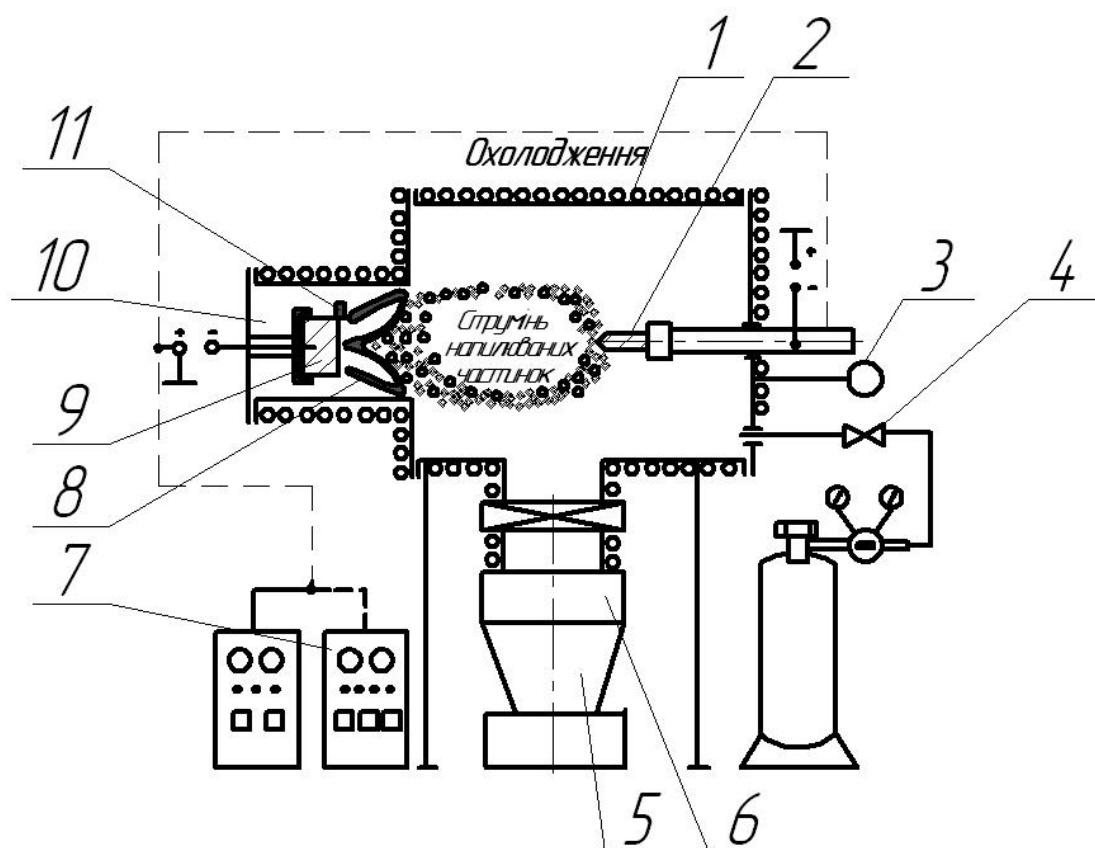


Рисунок 27 — Принципова схема установки типу «Булат»

Для виморожування пари масла передбачена азотна пастка 6. Дуговий розряд збуджується між водоохолоджувальним анодом 8 і матеріалом, що розпилюється — катодом 9. Для первісного збудження дуги служить допоміжний електрод 11. Електродуговий прискорювач

плазми 10 працює від силового спеціалізованого джерела постійної напруги. Для екстракції іонів із плазмового потоку і їхнього прискорення в напрямку напилюваного виробу використовується високовольтне джерело живлення 7, аналогічне показаному на рис. 24, в. Від нього на напилюваний виріб 2 подається негативний зсув від десятків вольтів до 2—3 кВт. У більш сучасних установках типу «Булат» передбачені кілька випарників (до шести). Електромагнітні котушки виконують роль стабілізації катодної плями на заданій поверхні матеріалу, що розпилюється; фокусування і прискорення потоку розпилюваних частинок; відхилення заряджених частинок з метою сепарації потоку.

Установки забезпечені пристроєм для автоматичного напуску газу у вигляді голчастого наповнення 4. Атмосфера камери контролюється мас-спектрометром 3. Завдяки цьому з'являється можливість створення плазмових пучків з регульованим вмістом іонів різних елементів. Випускаються й інші установки аналогічного призначення («Пуск» і «Юніон» і ін.). Основне застосування цих установок сконцентроване на зміцненні різного виду інструмента з використанням реакційної форми процесу напилювання. Розроблені і широко застосовуються інші установки з дуговим розпиленням.

2.5.4 Установки для вакуумного напилювання покрить іонним розпиленням

Отримали особливо велике поширення при напилюванні тонкоплівкових покриттів конструктивного призначення: резисторів, інтегральних схем і ін. На рис. 28 наведена схема внутрішньокамерного пристрою установки.

Аналогічне конструктивне виконання має установка УВН—Р. Вольфрамову нитку гарячого катода розташовують у заглибленні масивного корпусу. Це трохи запобігає попаданню атомів вольфраму у потік розпилюваних частинок. Анод з корозійностійкої сталі розташований напроти катода. Для запобігання перегріву анодний і катодний вузли охолоджуються водою. Матеріал, що розпилюється (мішень) має вигляд ізольованої оболонки коробчатого типу зі щілиною, яка закривається магнітною заслінкою. До мішені від силового джерела подається високовольтна напруга, регульована плавно від 0 до 2 кВ.

2.5.5 Установки для вакуумного напилювання покриттів термічним випаровуванням і іонним розпиленням

Для напилювання покриттів часто застосовуються установки, у яких процес ведеться з використанням двох методів. На рис. 28 показана схема усередині камерного пристрою установки УВН—75Р—2.

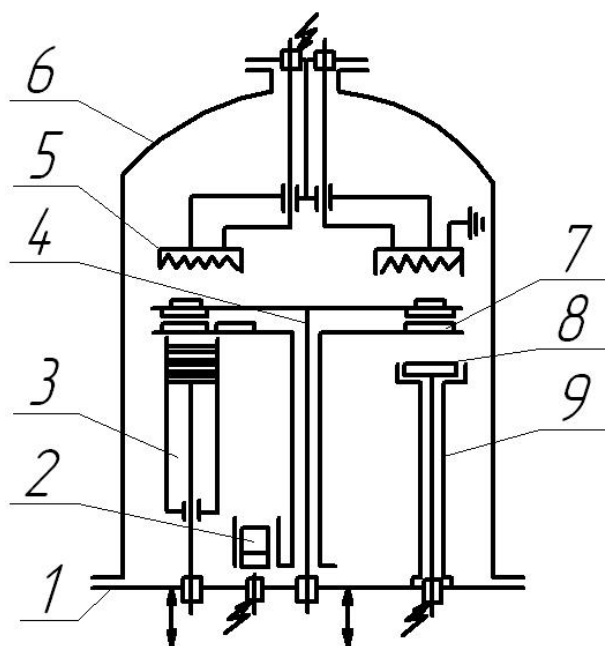


Рисунок 28 — Схема внутрішньокамерного пристрою установки УВН—75Р—2

Ця універсальна установка колпакового типу з автоматичною системою відкачування призначена для напилювання плівок методом катодного розпилення і електроннопроменевого випаровування. Установка комплектується з трьох окремих блоків: робочої камери, змонтованої на звареному корпусі; блока електроживлення; шафи живлення і керування. Усередині корпуса є гідропривід для підйому камери і вакуумна система. Внутрішньокамерний пристрій змонтований під ковпаком 6 на базовій плиті 1. Восьмипозиційна карусель 4 забезпечує транспортування напилюваних виробів 7 з бункера 3. Розпилення матеріалу здійснюється в електроннопроменевому випарнику 2 і катодним розпиленням 8 з екраном 9. Для підігріву напилюваних виробів застосовують нагрівач 5. Вакуумнощільні підведення високої і низької напруги, а також система обертання здійснюються через базову плиту. Електрична схема установки забезпечує живлення і керування: тліючим розрядом при максимальному струмі 200 мА і напрузі 5 кВ; електроннопроменевим випарником при максимальному струмі променя 200 мА і напрузі 10 кВ. Великі можливості має інша модифікація установок розглянутого типу — УВН—75П—1. Вона забезпечує іонне розпилення як на постійному, так і на змінному струмі. При розпиленні металів, сплавів, з'єднань металевих типу на матеріал, що розпилюється, подається постійна напруга до 5 кВ. При розпиленні діелектриків використовують змінну напругу до 3 кВ частотою 1,76 МГц. Крім того, установка оснащена двопробним електронним випарником, що працює на напрузі 6—10 кВ і струмі до 200 мА.

2.5.6 Установки для вакуумного напилювання покриттів напівбезперервної дії

Час конденсації покриттів, як правило, складає незначну частку загального часу циклу напилювання виробу. Велика його частина витрачається на відкачування камери й інші допоміжні операції. В установках цього типу виникають складнощі відтворення ідентичних за якістю покриттів. Прагнення усунути відзначені недоліки обумовило появу установок напівбезперервної дії. Іноді такі установки називають установками із закритими кінцями. Робочий об'єм установок напівбезперервної дії не стикається з атмосферою при завантаженні і вивантаженні напилюваних виробів. Це досягається застосуванням шлюзових камер. Звичайно такі установки складаються з однієї або декількох робочих камер і однієї або декількох допоміжних шлюзових камер, відокремлених від атмосфери і робочих камер з вакуумними затворами.

Для прикладу розглянемо найбільш просту схему установки напівбезперервної дії з однією завантажувально — вивантажувальною шлюзовою камерою (рис. 29, а). Установка оснащена груповим тримачем напилюваних виробів 1, що обертається на робочому столі 2. У робочій камері 3 періодично здійснюється процес напилювання покриттів при постійних режимах роботи випарника 4 і закритому затворі 6. Шлюзова камера 5 періодично контактує з атмосферою при закритому затворі 7. У цей час відбувається завантаження і вивантаження готових виробів. Внутрішній механізм транспортування 8 із приводом 9 забезпечує зворотно-поступальне переміщення тримача виробів.

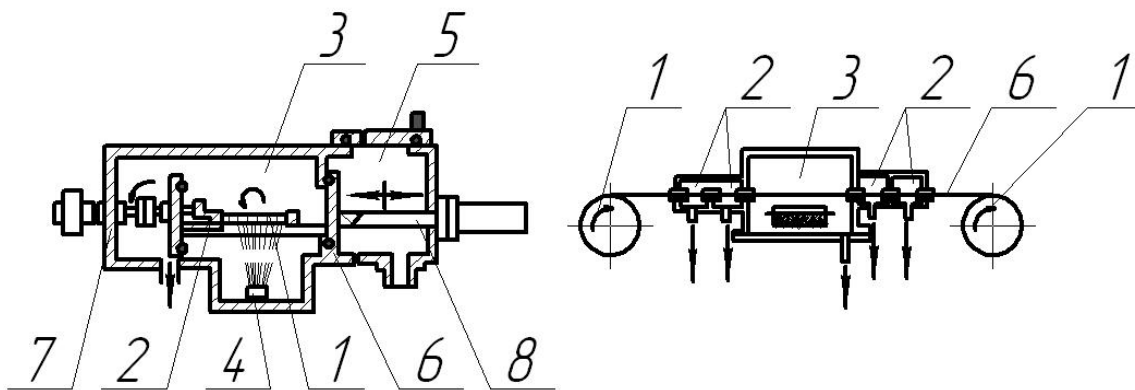


Рисунок 29 — Схема внутрішньокамерного пристрою в установках напівбезперервної дії (а) і безперервної дії для вакуумного напилювання покриття на стрічку (б)

Більш продуктивний процес реалізується при наявності двох шлюзових камер.

2.5.7 Установки для вакуумного напилювання покрить безперервної дії

Реалізація максимальної продуктивності при напилюванні вакуумних конденсаційних покрить можлива при використанні установок безперервної дії. Одночасно з цим вирішується проблема ведення процесу в ідентичних умовах. Безперервна подача напилюваних виробів у робочу камеру усуває необхідність у зупинці випарника, вакуумної системи і контактування робочої камери з атмосферою. Установки безперервної дії відносяться до підвищеного рівня складності і трудомісткості у виготовленні. У зв'язку з цим значний економічний ефект може бути отриманий лише в умовах крупносерійного або масового виробництва.

Номенклатура виробів для вакуумного напилювання в установках безперервної дії може бути найрізноманітнішою. На рис. 29, б наведена схема установки для напилювання покрить на стрічку. Вона складається з механізму протягання стрічкового матеріалу 1, декількох шлюзових камер 2 з диференціальним відкачуванням на вході і виході робочої камери 3. Для зменшення наповнення повітря в шлюзові камери на вході і виході передбачені герметичні пристрої.

В установках безперервної дії найбільш відповідальним вузлом є шлюзові камери. Вибір певного типу шлюзового пристрою залежить від багатьох факторів: виду виробів, що завантажуються; ступеня вакууму в робочій камері, довговічності пристрою і т.д.

3 ТЕХНОЛОГІЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО І ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

3.1 Вибір типу покриття

Тип покриття вибирають з умов експлуатації напилюваного виробу й інших специфічних вимог. Раніше був показаний поділ покриття на такі групи: захисні, конструкційні, технологічні і декоративні. Особливо велику групу складають захисні покриття. Тут можна виділити такі типи покриття: зносостійкі; корозійностійкі і жаростійкі; теплозахисні, електроізоляційні й ін.

При виборі зносостійких покриття необхідно враховувати характер взаємодії тертьових пар. В усіх з'єднаннях необхідно прагнути до вибору покриття з мінімальним коефіцієнтом тертя. На знос досить добре працюють покриття, що містять тверді частинки і пластичне зв'язуюче. Покриття повинні мати високу адгезійну і когезійну міцність, у ряді випадків на рівні 100 — 250 МПа. Вимоги, які висуваються до пористості покриття не однозначні. Покриття, що працюють на стирання в умовах змащення (поршневі кільця, гільзи циліндрів і ін.) можуть мати значну пористість, яка досягає 10 — 15 %. Покриття на інструменті, особливо різальному, доцільно напилювати з мінімальною пористістю.

Корозійностійкі і жаростійкі покриття вибирають з урахуванням мінімальної взаємодії з агресивним середовищем. Покриття повинні мати невисоку пористість, особливо відкритого типу. Для жаростійких покриття часто висувають підвищені вимоги до теплостійкості (теплостійкості).

Теплозахисні покриття напиляють матеріалами з низьким коефіцієнтом теплопровідності. У багатьох сполученнях до них висувають високі вимоги щодо теплостійкості. Наявність розвитої пористості в теплозахисних покриттях підвищує їх ефективність.

Конструкційні покриття виконують у виробі роль конструктивного елемента, типовим прикладом конструкційних покриття може служити тонкоплівковий шар, що наноситься на багато виробів, які відносяться до мікро- і радіоелектроніки, наприклад, інтегральні схеми, напівпровідникові елементи і т.д. Вимоги, що висуваються до таких покриття, винятково високі, особливо до сталості хімічного складу, мікроструктури, напруженого стану. В електротехнічній промисловості часто використовують напилювання для створення резисторів із широким діапазоном опорів. При виробництві газотурбінних двигунів, на статорні поверхні компресора і турбіни напилюють конструкційні покриття у вигляді спрацьованих ущільнень. При високій адгезії і теплостійкості когезійна міцність таких покриття повинна бути невисокою.

Як конструктивний елемент можуть виступати і цілі вироби, які отримані методами напилювання. У практиці їх часто називають «корковими» виробами.

Технологічні напилені покриття призначені для спрощення іншого основного технологічного процесу, наприклад, зварювання або паяння. Нерідкі випадки, коли матеріали погано зварюються між собою. Для цих цілей з успіхом можуть бути використані напилені проміжні шари, між якими легко здійснюється міжатомний зв'язок при зварюванні. Істотно спрощується процес паяння при напилюванні шару припою на елементи, що з'єднуються. Особливо це відноситься до тих випадків, коли неможливо ввести припій традиційними способами.

Відповідно до типу покриття й умов експлуатації вибирають його склад, товщину, метод і спосіб напилювання й інші технологічні особливості.

3.2 Вибір складу покриття і його товщини

Для напилювання покриттів різних типів можуть бути використані багато груп неорганічних матеріалів як в однокомпонентному варіанті, так і в суміші з іншими компонентами. В останньому випадку покриття відносять до композиційного. При виборі складу покриття необхідно поряд з експлуатаційними вимогами враховувати і їх сумісність до матеріалу напилюваного виробу.

Під сумісністю варто розуміти принципову можливість адгезійної взаємодії матеріалів покриття і напилюваного виробу. Крім того, у сумісних покриттях фізико-хімічні процеси на границі розділу в процесі експлуатації не приводять до порушення стабільності вихідного стану композиції. Наприклад, виключається утворення гальванічних пар, крихких фаз і т.д.

Для зручності аналізу фізико-хімічних процесів при напилюванні склад матеріалів покриттів доцільно розбити на групи. Приймаючи за основу близькість властивостей матеріалів, їх можна розбити на такі групи: чисті метали; металеві сплави; металеві з'єднання і сплави на їхній основі; металоїдні з'єднання і сплави на їхній основі; оксиди; складні композиції, що складаються з різних груп матеріалів.

Для напилювання різних типів покриттів можуть бути використані матеріали однієї або декількох груп. Так, наприклад, для напилювання зносостійких покриттів придатні матеріали усіх перерахованих груп. У групі чистих металів часто для напилювання зносостійких покриттів використовують молібден і хром; у групі металевих сплавів — прості і складні системи. У якості простих напилюють сплави системи $Fe-C$; у

якості складних напиляють сплави системи $Ni-Cr-B-Si-C$ і ін. З матеріалів усіх груп формують корозійностійкі і жаростійкі покриття. Для теплозахисних покриттів найбільш доцільна оксидна група матеріалів або композиційних з обов'язковим включенням оксидного компонента.

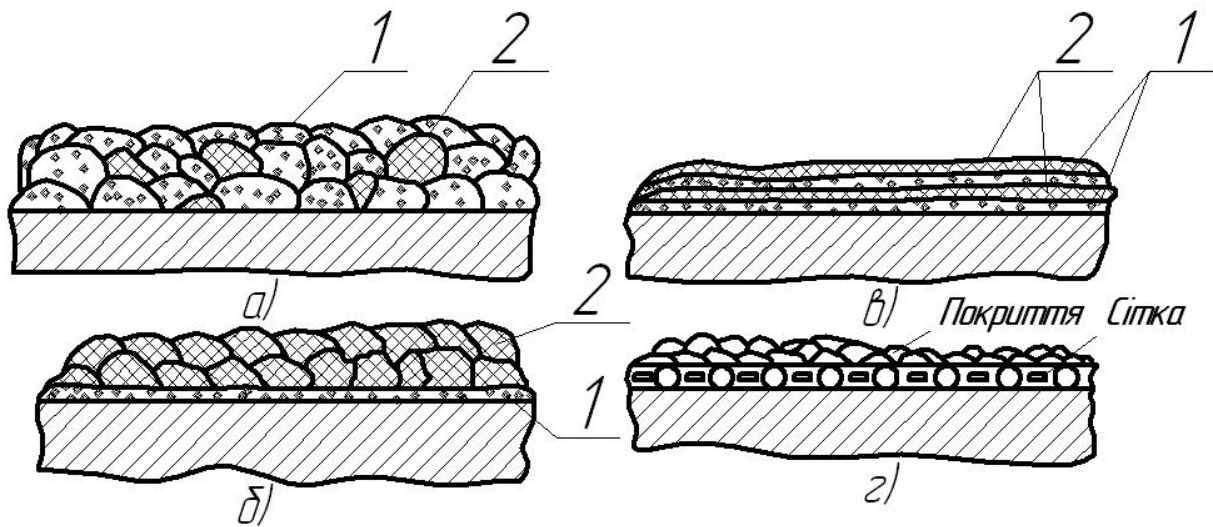


Рисунок 30 — Будова деяких композиційних покриттів:

а — покриття, напилене одночасно двома компонентами;
 б — покриття з проміжним шаром; в — багатшарове покриття; г — покриття, напилене на закріплену сітку;
 1 — метал; 2 — оксид

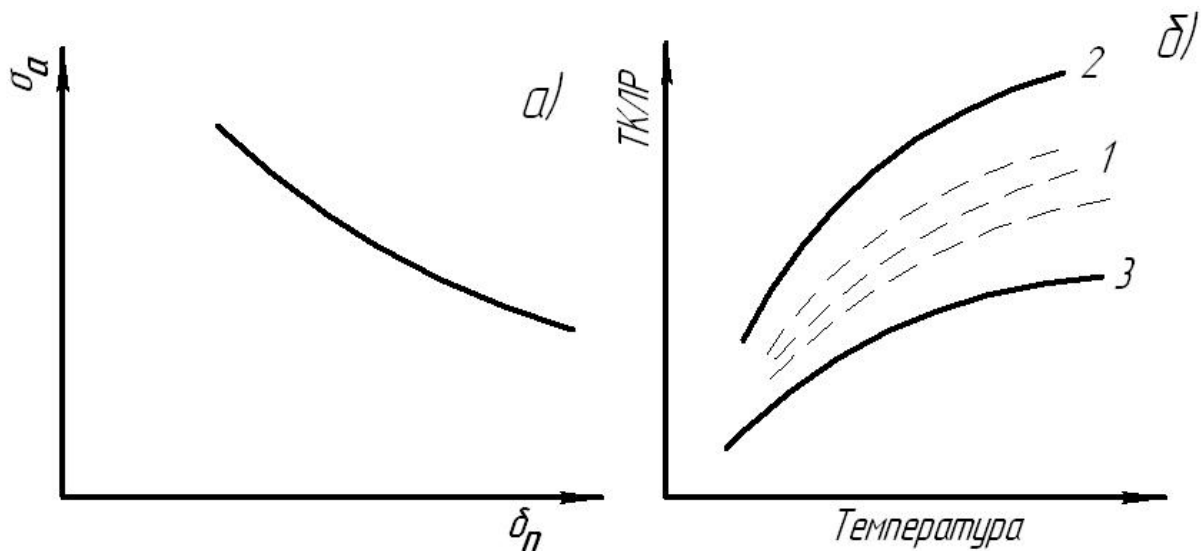


Рисунок 31 — Залежність адгезійної міцності покриття σ_a від його товщини δ_n (а) і вибір температурного коефіцієнта лінійного розширення (б) матеріалу проміжного шару:

1 — проміжний шар; 2 — матеріал покриття; 3 — напилюваний виріб

Роль композиційних матеріалів у ряді типів покриттів особливо велика. Так, наприклад, до складу покриття часто вводять твердий і пластичний компоненти. Завдяки цьому підвищується пластичність напиленого матеріалу, а отже, і його експлуатаційні властивості. Будова деяких композиційних покриттів показана на рис. 30. Для всіх типів покриттів важливе значення має його товщина. Вибір товщини в основному визначається умовами експлуатації напилюваного виробу. При відновленні зношених виробів методами напилювання часто товщина покриття визначається величиною зносу. Теоретичні дослідження, практика напилювання і наступна експлуатація напилених виробів показують, що зі збільшенням товщини покриття зростає імовірність його відшарування. На границі розділу формується напружений стан, що сприяє руйнуванню покриття. Адгезійна міцність σ_a зі збільшенням товщини покриття δ_n падає (рис. 31, а). Тому у всіх випадках при виборі товщини покриття варто прагнути до мінімально можливих його значень.

3.2.1 Вимоги, пропоновані до покриттів

Вимоги, у загальному випадку, визначаються призначенням покриття й іноді суперечливі. Однак завжди потрібна достатня адгезійна міцність, рівномірність по товщині, відсутність здуттів, спучувань. Не допускаються тріщини, відколи, відшарування, розшарування й інші. поверхневі дефекти. Поряд з перерахованим контролюється пористість покриття, а в ряді випадків, і інші показники якості.

Спеціальні властивості покриттів (зносостійкість, корозійна стійкість і т.д.) повинні відповідати вимогам конструкторської документації.

3.2.2 Правила приймання

Вироби з напиленими покриттями пред'являються до задачі партіями. За партію приймають будь-яку кількість виробів одного типорозміру, напилених за одним технологічним режимом й оформлених одним документом про якість. Вироби з покриттями піддають приймально-здавальним типовим іспитам. Типові іспити проводять при відпрацьовуванні і зміні технології напилювання покриттів і при перевірних іспитах. Для цих цілей звичайно використовують стандартні методики і зразки. Приймально-здавальні іспити передбачають 100 % - вий контроль стану поверхні напиленого покриття і його товщини.

3.3 Застосування проміжних шарів

Для підвищення якості покриттів іноді удаються до напилювання підшарів. Необхідність у цьому виникає при незадовільній сумісності матеріалу покриття з напилюваним виробом. Особливо часто несумісність

проявляється: в низкій адгезійній міцності; в утворенні на границі розділу проміжних фаз, що знижують експлуатаційні властивості напилених виробів; виявляється у великому розходженні температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу покриття і виробів і т.д. Виходячи з цього і вибирають матеріал проміжного шару і способи його створення.

В усіх випадках при виборі матеріалу проміжного шару необхідно прагнути, щоб його температурний коефіцієнт лінійного розширення займав проміжне значення в композиції покриття — виріб (рис. 31, б). Завдяки цьому знижується напружений стан на границі їх розділу. Правильно вибраний матеріал проміжного шару значно підвищує теплостійкість напилених покриттів.

Іншим важливим показником для матеріалу підшару є ентальпія розпилюваних частинок. Зі збільшенням ентальпії, як відомо, підвищується контактна температура, і, відповідно, адгезійна міцність. Практика показала гарні результати при використанні для проміжних шарів тугоплавких металів (у розплавленому стані ентальпія молібдену складає 105 Дж/моль, а вольфраму 130 Дж/моль), а також композиційних терморегулюючих порошків. Наприклад, плакованих або конгломерованих частинок нікелю й алюмінію. Температура частинок досягає 3460 К і більше.

Принципова схема вибору матеріалу проміжного шару полягає в згладжуванні різниці в температурному коефіцієнті лінійного розширення покриття і напиленого виробу; напилюванні підшару частинками з максимальною ентальпією; зниженні рівня дифузійної взаємодії на границях розділу виріб - проміжний шар — покриття з утворенням небажаних фаз.

Дотримання розглянутої схеми при виборі матеріалу проміжного шару звичайно є серйозно ускладненим. Часто вдається виконати одну або дві умови. Наприклад, тільки узгодження температурних коефіцієнтів лінійного розширення або підвищення адгезійної міцності за рахунок високої ентальпії розпилюваних частинок. Застосовують для напилювання проміжних шарів терморегулюючі порошки системи $Al-Ni$, молібден, вольфрам і т.д.

Поряд з напилюванням проміжних шарів використовують і інші способи їхнього створення. Наприклад, на поверхню напилювання укладають і закріплюють тонку сітку з відповідного матеріалу (див. рис. 30, з).

Проміжні шари використовують не тільки при газотермічному напилюванні. Широко відома технологія вакуумного конденсаційного напилювання із змінним складом по товщині покриття. Вакуумні

конденсаційні методи дозволяють легко керувати складом покриття. Так, наприклад, при напилюванні нітриду титану на інструментальні вироби перший шар складається практично з чистого титану, проміжний — з титану і нітридів і завершальний — цілком з нітриду титану.

3.4 Вибір методів і способів напилювання покриття

Правильний вибір методу і способу напилювання визначає, у першу чергу, якість покриття і продуктивність. Вибір доцільно проводити: виходячи з вимог, пропонованих до якості покриття; з огляду на властивості матеріалу покриття; у залежності від товщини покриття; з урахуванням реалізації максимальної продуктивності й інших особливостей. Високу якість покриття легше всього отримати при вакуумних конденсаційних методах напилювання. Особливо при способах, де потік розпилюваних частинок (пари) стимульований плазмою. При газотермічних методах найбільш висока якість покриття забезпечується детонаційно-газовим напилюванням. Аналогічні результати можуть бути досягнуті при плазмових способах напилювання, наприклад, із загальним захистом у низькому вакуумі. Вакуумні конденсаційні методи напилювання дозволяють отримувати покриття практично будь-якого складу. При газотермічних методах виникають складності, пов'язані з напилюванням термічно нестабільних сполук. У процесі нагрівання спостерігається дисоціація цих сполук або їхня сублимація. Так поведуться багато нітридів (TNi , ZrN , AlN і ін.), деякі оксиди (заліза, міді й ін.) і ряд інших сполук. Склад напилюваного матеріалу може істотно змінюватися в результаті вибіркового випаровування окремих елементів з високою пружністю пари. Газотермічне напилювання на повітрі завжди пов'язано з окислюванням напилюваного матеріалу. При цьому склад покриття може істотно відрізнятись від складу напилюваного матеріалу по елементах, що найбільш легко окислюються. Збереження вихідного складу напилюваного матеріалу можливо при детонаційно-газових способах напилювання.

Товщина покриття впливає на вибір методу напилювання. Тонкі (плівкові) покриття досяжні тільки методами вакуумного конденсаційного напилювання. Мінімальна їхня товщина може складати близько 10^{-8} нм. Газотермічні методи забезпечують мінімальну товщину покриття, близьку до діаметра напилюваних ($d_n = d_u$), частинок, рівну 10—100 мкм.

Найбільше впливає на вибір методу продуктивність процесу. У цьому відношенні газотермічні методи значно кращі в порівнянні з вакуумними конденсаційними методами.

При виборі методу і способу напилювання необхідно також враховувати енергоємність процесу, коефіцієнт використання матеріалу й

інші фактори.

3.5 Порошки для газотермічного напилювання і способи їхньої підготовки

Для газотермічного напилювання застосовують велику кількість порошків з різних матеріалів з розміром частинок від 5 до 200 *мкм*. Для напилювання покрить використовують порошки загальпромислового призначення і спеціалізовані. Спеціалізовані порошки часто випускають трьох класів: OM — особливо дрібні; M — дрібні; C — середні. Фракційний склад частинок у межах класу не однаковий для різних груп матеріалів. Звичайно клас OM містить частинки фракцій 40—100 *мкм*, M — 100—280, C — 280—630.

Для напилювання застосовують порошки двох типів: однокомпонентні й порошки з двох або більше компонентів. Останні називають композиційними порошками.

3.5.1 Однокомпонентні порошки

Однокомпонентні порошки являють собою частинки з одного елемента (алюмінію, титану, молібдену й ін.) або сплавів з різних елементів. Наприклад, *Fe—C*; *Ni—Al*; *W—C*; *Ni—Cr*; *Ni—Cr—B—Si* і ін. Структура частинок може бути як гомогенною, так і гетерогенною. Звичайно однокомпонентні порошки одержують розпиленням розплавів або відновленням. Відповідно розрізняють порошки розпилені і відновлені. У практиці газотермічного напилювання, головним чином, застосовують однокомпонентні порошки. Основна перевага їх полягає в одержанні покрить з однорідним хімічним складом і структурою.

3.5.2 Композиційні порошки

Складаються з двох або більше різних за властивостями компонентів, розділених між собою чіткою границею розділу. Будова композиційних порошкових частинок, найбільше поширена, показана на рис. 32, а.

При газотермічному напилюванні композиційними порошками забезпечується: одержання гетерогенних дрібнодисперсних структур з рівномірним розподілом компонентів (*Co—WC—Ti*; *Ni—Ni₃Al—Al*; *Ni—Al₂O₃* і ін.) протікання екзотермічних реакцій між компонентами порошку (*Ni—Al*; *Ni—Ti*; *Co—Al*; *Ni—Cr—Al* і ін.); захист ядра розпилюваної частинки плакуванням від взаємодії її з газовою фазою й ін.

Композиційні порошки за характером їхнього поведіння при газотермічному напилюванні розділяються на дві групи: екзотермічно

реагуючі і термонеітральні.

В екзотермічно реагуючих порошках розрізняються такі типи композицій: металопоібні $Ni-Al$; $Ni-Ti$; $Co-Al$; $Co-Si$; $Mo-Ni$; металооксидні $Al-Ni$; $Al-Fe$; $Cr-Cu$; $Ti-Ni$ і металоідни $Al-WC$; $Ti-Si$; $Ti-B_4C$; $Ti-Si_3N_4$ і ін.

При напилюванні покритть композиційними екзотермічними реагуючими порошками важливо поіднання нагрівання частинок від основного джерела теплоти з теплом, що виділяється при протіканні реакції.

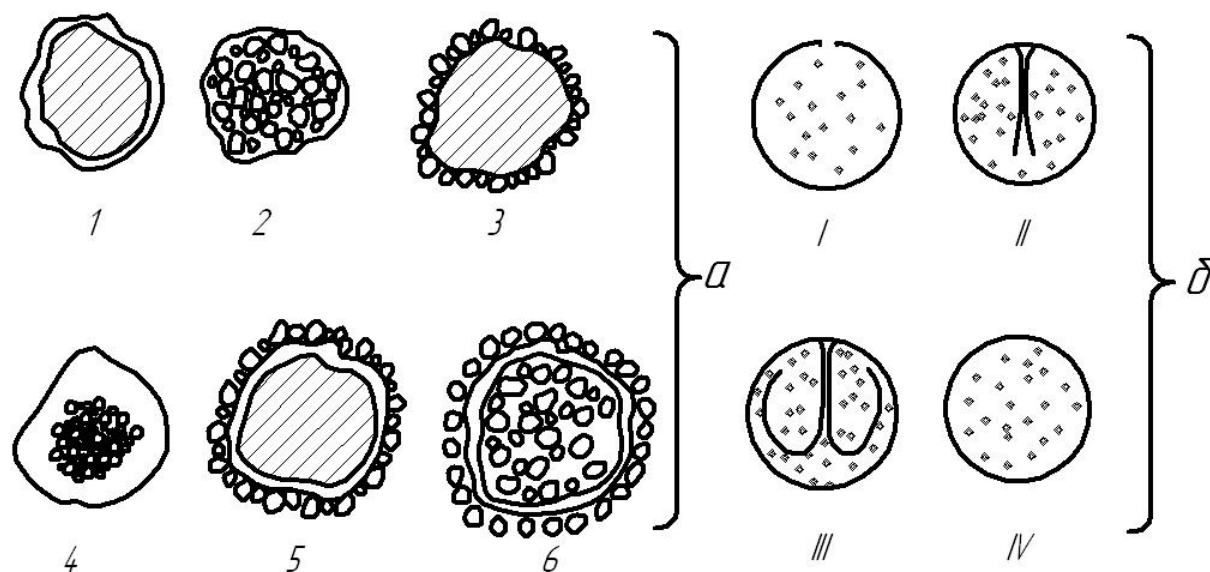


Рисунок 32 — Будова порошкових композиційних частинок (а) і порошкових дротів (б):

1, 3, 5 — плаковані; 2 — конгломеровані; 4, 6 — змішаного типу; I — II — III — з металевою оболонкою; IV — органічна оболонка

Адіабатичне зростання температури розпилюваних частинок за рахунок реакції синтезу сполук, що утворюються, можна оцінити за виразом:

$$\Delta T_{ad} = Q_e / C_p, \quad (3.1)$$

де Q_e — тепловий ефект взаємодії;

C_p — теплоємність.

Теплові ефекти можливих реакцій у композиційних порошках наведені на рис. 33.

Найбільш значні теплові ефекти в металооксидних композиціях. Для більшості оксидів ΔT_{ad} перевищує $2000^\circ C$. У металевих системах тепловий ефект реакції істотно нижчий. Приріст температури розпилюваних

частинок досягає 300—1000 К.

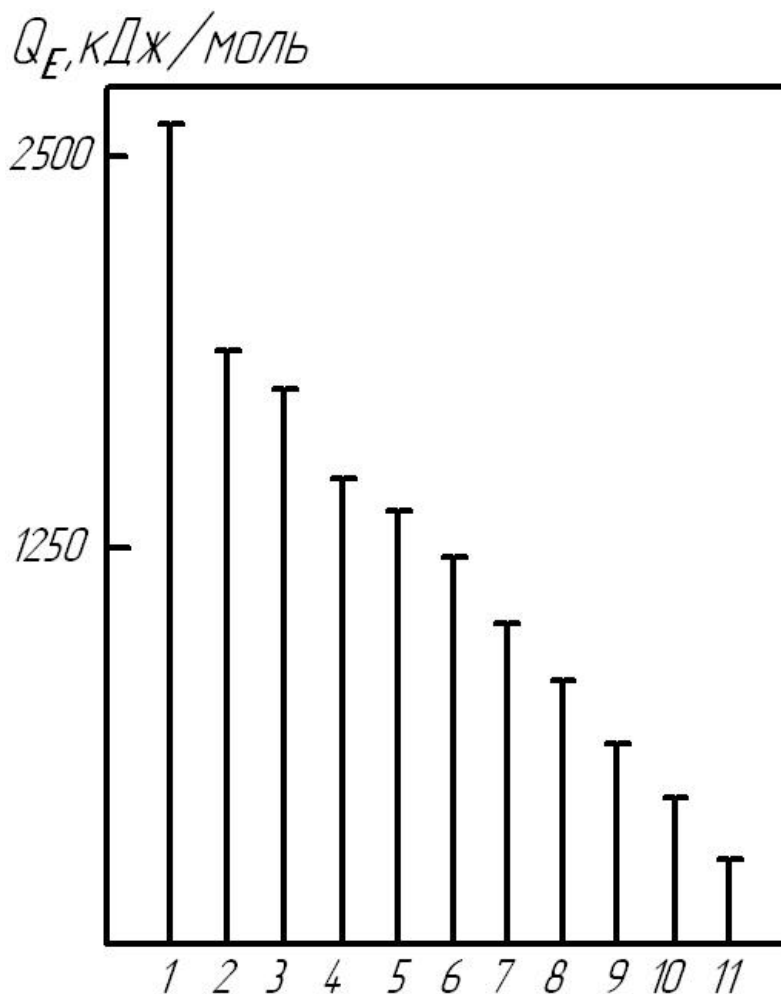


Рисунок 33 — Тепловий ефект реакцій: 1 — $V_2O_5 + O_2$; 2 — $NiAl + O_2$; 3 — $Al + O_2$; 4 — $CuO + Al$; 5 — $CoO + Al$; 6 — $NiO + Al$; 7 — $WO_3 + Al$; 8 — $Cr_2O_3 + Al$; 9 — $3 Ni + Al = Ni_3Al$; 10 — $Ni + Al = NiAl$; 11 — $ZrO_2 + Al$

Для протікання екзотермічної реакції необхідно частинку нагріти до певної температури. У залежності від реагуючих систем ця температура складає 600—1300 °С.

У термонеітральних порошках є різні типи композицій. Розглянемо їх. Метал (сплав) — тугоплавка металоїдна сполука: $Cr-WC$; $Ni-WC$; $Ni-Cr_3C_2$; $Ni-Ti-B$; $Cu-SiC$; $Mo-Cr_3C_8$; $(Ni-Cr)-WC$; $(Ni-Cr-B-Si)-WC$ і ін.

Метал (сплав) — металоїдна сполука $(Ni-Cr)-NiAl$; $(Ni-Cr-B-Si)-NiAl$ і ін.

Метал (сплав) — тверде змащення $Al-BN$; $Ni-BN$; нікель—графіт; $(Ni-Cr)-Ca_2F$; $Mo-Mo-S$ і ін.;

Метал (сплав) — оксид: $Ni-Al_2O_3$; $Ni-Zr_2O$; $Cu-Zr_2O$; $Ni-MgO$;

Mo—Al₂O₃ і ін.;

Оксид—оксид: SiO₂—Cr₂O₃; TiO₂—Al₂O₃; Al₂O₃—TiO₂—MgO і ін.

При газотермічному напилюванні термонеїтральних композиційних порошків екзотермічна реакція не протікає або тепловий ефект дуже малий.

3.5.3 Одержання композиційних порошків

В основному використовують: плакування і конгломерацію (див. рис. 32).

Плакування порошкових частинок здійснюють такими методами: хімічним відновленням плакувального елемента із солей; електролітичними способами; карбонільним розкладанням сполук; вакуумним конденсаційним напилюванням; дифузійним насиченням.

В даний час для плакування порошків в основному використовують відновлення металів (нікелю, кобальту, міді й ін.) з їхніх солей воднем, гіпофосфітом натрію, гідразином і іншими відновниками. Електролітичний метод малопродуктивний. Перспективні карбонільний і вакуумно-конденсаційний методи плакування.

Товщина плакування δ_n у межах фракції порошку змінюється незначно і звичайно складає 2—5 мкм і більше. При розрахунках об'ємної і масової частинки осадженого металу необхідно враховувати проникнення його в поверхневі дефекти порошкових частинок. Кінетика поводження плакування на частинках в умовах газотермічного напилювання вивчена недостатньо. При виборі способу і режиму напилювання необхідно враховувати велику імовірність згортання плакування на частинках аж до повного його відділення. У процесі нагрівання і перенесення частинки можливе захоплення плакування, особливо при малих значеннях δ_n/d_n .

Конгломерацію композиційних порошків здійснюють із застосуванням сполучних речовин. Завдяки цьому можливі будь-які композиції, реалізується нескладна технологія, досягається висока економічність. Видалення розчинника здійснюється в процесі сушіння порошків. Високотемпературне спікання дозволяє підвищити міцність гранул і частково видалити сполуки. Конгломеровані частинки з недостатньою механічною міцністю розпадаються в процесі нагрівання і перенесення при напилюванні. Ефективність композиції три цьому знижується.

Для отримання однорідних конгломерованих частинок використовують тонкодисперсні порошки з розміром 1—10 мкм. Для стимулювання екзотермічних реакцій важливо мати мінімальний ступінь окислювання вихідних компонентів. Це особливо стосується алюмінію,

який утворює на поверхні порошкових частинок міцну оксидну плівку. Наявність оксидів на порошкових частинках у композиції роз'єднує реагуючі компоненти і гальмує протікання реакції.

У ряді випадків доцільно вводити в конгломерат речовини, що відновлюють оксиди, наприклад, деякі галогеніди.

В Україні і інших країнах розроблена велика кількість марок порошоків для газотермічного напилювання покриттів. Багато з них освоєні в промисловому виробництві.

Підготовка порошоків. Більшість порошоків для газотермічного напилювання поставляють у спеціальній тарі. Для визначення розміру частинок використовують ситовий аналіз (ГОСТ 3584—73). Набір сит з розміром комірок на світло 0,05; 0,063; 0,1; 0,125 мм дозволяє простим способом оцінити гранулометричний склад порошку. Є й інші способи визначення гранулометричного складу порошоків, особливо дрібнодисперсних з розміром частинок менше 40 мкм.

Обов'язковою операцією при підготовці порошоків є їхнє сушіння або прожарювання. При цьому поліпшується сипкість порошку, знижується кількість зв'язувальної й адсорбованої вологи, органічних забруднень. Для сушіння металевих порошоків температура складає 120—150 °С. При більш високих температурах спостерігається інтенсивне окислювання порошку. Оксидні порошки прожарюють при температурі 600—700 °С. Для сушіння і прожарювання використовують металеві листи з товщиною засипання 5—10 мм. Час обробки вибирають у межах 2—5 год. Сушіння і прокалювання порошоків здійснюють у печах або шафах.

Готуючи порошки для напилювання, корисно перевірити їх сипкість. Для цих цілей використовують методики, прийняті в порошковій металургії.

При підготовці для напилювання нестандартних порошоків велику увагу приділяють розсівові. При цьому використовують як ситовий розсів, так і інші способи поділу. Для деяких порошоків доцільна операція знежирення.

3.6 Дріт і стрижні для газотермічного напилювання покриттів.

Способи їх підготовки

Застосовують різні типи дротових матеріалів і стрижнів. Дротові матеріали не лімітовані по довжині, діаметром 0,5—5,0 мм поділяють на такі групи: 1) дроти суцільного перерізу; 2) порошоків дроти з металевою оболонкою; 3) порошоків дроти з органічною оболонкою (рис. 32, б).

Порошкові дроти суцільного перерізу, звичайно з чистих металів або сплавів на їхній основі роблять методами волочіння. Цей вид дротових

матеріалів набув найбільшого застосування для газотермічного напилювання. Спеціалізовані марки дротів для напилювання поки що випускають в обмеженій кількості. В основному використовують дроти загальнопромислового призначення або спеціалізовані, наприклад, зварювальні, електротехнічні й інші. Марку дроту вибирають, виходячи з вимог до властивостей покриття. При цьому задирки, вм'ятини, розшарування, сліди корозії й інші дефекти не допускаються.

Підготовка дроту перед напилюванням найчастіше полягає в знежиренні і травленні. Знежиренням видаляють органічні забруднення; травленням — оксидні плівки. Інградієнти ванн і режими обробки визначаються маркою дроту. У багатьох випадках ефективно абразивно-струминне очищення дроту, електрополірування й інші способи.

Порошкові дроти з металевою оболонкою перспективні для газотермічного напилювання композиційних покриттів. Порошкові дроти роблять вальцюванням стрічки в трубку з одночасним засипанням дисперсною масою. При наступному волочінні заповненої трубки одержують дріт різних діаметрів. При цьому легко регулюється відношення між масою порошку й оболонки. Можливі різноманітні сполучення в розташуванні оболонки і порошку (див. рис. 32, б).

Підготовку порошкових дротів перед напилюванням здійснюють за допомогою їхнього знежирення протиранням сильними розчинниками (бензином, ацетоном і ін.) або абразивно-струминним очищенням.

Порошкові дроти з органічною оболонкою застосовують в основному для газополуменевого напилювання і рідше для плазмового. Промислове виробництво таких дротів — шнурів знаходиться в стадії удосконалювання.

Стрижні суцільного перерізу виготовляють виливком. Порошкові стрижні формують зі здрібнених матеріалів, наприклад, оксидів, а потім піддають спіканню. Звичайно їхній діаметр складає 3—6 мм, а довжина 500—600 мм.

3.7 Матеріали, що розпилюються, для вакуумного конденсаційного напилювання покриттів

Для вакуумного конденсаційного напилювання покриттів використовують широкий клас різних матеріалів, у тому числі і композиційних. Поряд з матеріалами загальнопромислового призначення часто використовують спеціальні матеріали, підготовлені для напилювання покриттів із заданими властивостями. Наприклад, сплави $Ni-Cr$; $Co-Cr$; $Ni-Co-Cr$; $Ni-Cr-Al-Y$ і ін.

Для розпилення застосовують матеріали у вигляді порошку, дроту,

стрижнів, таблеток, дисків і інших форм. Загальною вимогою до матеріалів є чітка відповідність хімічному складові по основних легуючих елементах; високий ступінь чистоти по домішках і сторонніх включеннях; мінімальна загазованість.

3.8 Підготовка поверхні напилюваних виробів

Якісна обробка поверхні виробів перед напилюванням багато в чому гарантує високу адгезійну міцність покриття. Поверхня виробів, що надходять на напилювання, звичайно містить різні види забруднення.

1. Фізичні або механічні забруднення. До них відносяться пил, ворсинки, абразивні частинки тощо. Забруднення хімічно не пов'язані з поверхнею або мають дуже слабку адгезійну взаємодію.

2. Органічне забруднення у вигляді адсорбованих тонких і товстих плівок. До них варто віднести різні змащення, віск, парафін тощо.

3. Забруднення, розчинні у воді: солі, кислоти, луки й ін.

4. Хімічно пов'язані забруднення. До них відносять: оксидні, нітридні, сульфідні тощо, а також більш складні з'єднання (гідрооксидні, оксинітридні тощо.).

5. Газоподібні забруднення, адсорбовані поверхнею. Поверхня виробів, що надходять на напилювання, знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Вільні зв'язки поверхневих атомів насичені хімічними зв'язками забруднень.

Кількісні оцінювання забруднень на поверхні напилювання ускладнені. Попередні оцінювання показують наявність на поверхні близько 3—5 $\text{мкг}/\text{мм}^2$ органічних забруднень. Товщина оксидної плівки складає 3—30 нм (і більш).

Особливо несприятливі органічні забруднення. Істотний їхній вплив виявляється вже при вмісті 1 $\text{мкг}/\text{мм}^2$.

Оксидні плівки впливають на адгезійну міцність покриття. Стійкі оксидні плівки товщиною менше 0,5 мкм істотно не впливають на контактну температуру. Разом з тим енергія активації оксидних плівок вища енергії активації відповідних металів. На адгезійну міцність покриття впливають плівки товщиною понад 10—15 нм . Очевидно менший вплив буде виявлятися при наявності на напилюваній поверхні оксидних плівок, які можуть легко сублімувати. У контакті такі плівки руйнуються, сприяючи утворенню міцних зв'язків. Це можна віднести до таких металів як молібден, вольфрам і т.д.

Підготовка поверхні перед напилюванням переслідує такі цілі: видалення жирових і інших видів забруднень; видалення оксидних і більш складних плівок при підготовці металевих, металідних або металоїдних

поверхонь.

Поряд з цим необхідно активувати напилювану поверхню, тобто вивести її зі стану термодинамічної рівноваги. Для цього необхідно розірвати зв'язок між поверхневими атомами твердого тіла і сторонніми поверхневими атомами, підвищити енергію поверхневих атомів до рівня забезпечення їхньої хімічної взаємодії з напилюваними частинками. При напилюванні покриття на активовану поверхню необхідно враховувати можливість швидкої втрати придбаних властивостей. Хімічна адсорбція газів відновлює вивільнені міжатомні зв'язки.

Активація напилюваної поверхні значно підсилюється при утворенні в поверхневому шарі структурних дефектів. При цьому не тільки зростає енергія атомів, але і збільшується швидкість їхньої дифузії в процесі хімічної взаємодії.

Підготовку напилюваної поверхні варто проводити з таким розрахунком, щоб поряд з очищенням здійснювався і процес її активації. Вибір способу підготовки залежить від матеріалу напилюваного виробу і його конструкції. Необхідно враховувати у виробі наявність тонкостінних елементів. У цих випадках активні зсувні деформації в поверхневих шарах призведуть до перекручування геометрії виробу.

При виборі способу підготовки поверхні необхідно враховувати і методи напилювання. При газотермічних методах необхідна шорсткість на напилюваній поверхні в межах $Ra = 5—20$. Менші значення для детонаційного напилювання; великі — для інших методів. Наявність на поверхні напилювання гребінців (виступів) збільшує контактну температуру на виступах. При цьому зростає сумарна поверхня взаємодії покриття. Збільшується роль механічного зчеплення при закріпленні напиленого матеріалу.

Шорсткість при вакуумних конденсаційних методах напилювання повинна бути порівнянна з товщиною покриття. Часто шорсткість поверхні не повинна перевищувати клас чистого обробленого виробу.

3.8.1 Знежирення напилюваних виробів

Має на меті видалення різного роду жирових забруднень. Разом з попереднім і наступним промиванням віддаляється більшість інших забруднень, хімічно не пов'язаних з поверхнею напилюваного виробу. Знежиренню піддають практично всі напилювані вироби. Обробку ведуть у ваннах або застосовують місцеве знежирення, за допомогою протирання ганчір'ям або бавовняними серветками.

Рекомендуються багато складів ванн і режимів обробки. Зокрема:
1) 35—40 г/л тринатрійфосфату; 2) 40—45 г/л кальцинованої соди.

Температура ванни 75—85 °С; час знежирення 20— 25 хв. Потім необхідне промивання гарячою і холодною проточною водою із наступним сушінням стисненим повітрям, підігрітим до температури 50 °С.

Найпоширеніше є знежирення у ваннах з органічними розчинниками, наприклад, «Ломбид — 315» і ін.

Для місцевого знежирення застосовують більш сильні розчинники: бензин, уайт-спірит, ацетон і ін.

3.8.2 Очищення напилюваних поверхонь від хімічно зв'язаних з'єднань

Застосовують різні способи очищення: абразивнострумну; травлення; вплив ультразвуку; тліючими і дуговими розрядами; СВЧ полем і ін.

Абразивнострумне очищення. Відноситься до найбільш розповсюдженого методу підготовки поверхні при газотермічному напилюванні. Обробку поверхні проводять струменем стиснутого повітря з абразивними частинками в захисних камерах. Двофазний, спрямований швидкісний потік створюється пістолетом ежекційного типу. Процес ведуть як вручну, так і з застосуванням механізації. Як абразивні частинки використовують електрокорунд, карбід кремнію, дріб чавуну (ДЧК) і сталевий (ДСК) і ін. Стиснене повітря повинне бути добре очищеним і відповідати встановленому стандарту. Розмір абразивних частинок складає 0,3—1,5 мм. Тиск повітря вибирають у межах 0,4—0,7 МПа; дистанцію обробки — у межах 0,08—0,15 м; кут зустрічі 60—90°; витрата абразивних частинок 300—500 кг/год. Контроль поверхні проводять по еталонних зразках. Параметри режиму обробки істотно впливають на адгезійну міцність покриття і їх потрібно знаходити оптимальними для різних сполучень. Як приклад можна розглянути плазмове напилювання порошкового заліза на зразки зі сталі 45. На адгезійну міцність особливо дуже впливає марка дробу і розмір частинок. Залежності σ_a , Ra і $\Delta B/B_{220}$ (відношення величини приросту мікронапруг обробленої поверхні до величини мікронапруг вихідної поверхні) від дистанції обробки, часу очищення і наступного вилежування наведені на рис. 34. З графіків випливає, що оптимальна дистанція обробки складає 100—150 мм, час очищення 25—30 с. Вилежування оброблених виробів тривалістю не більше 1 доби не впливає на $\Delta B/B_{220}$ і σ_a .

Вилежування після обробки повинне бути мінімальним. Час релаксації для кожного матеріалу різний. Тому в ряді виробничих інструкцій термін вилежування складає не більш 2—5 годин.

Абразивнострумна обробка вносить істотні зміни в поверхневі шари напилюваної поверхні. Відбувається насичення їх дефектами.

Поверхня набуває аномальних фізико-хімічних властивостей. При цьому різко зростає швидкість дифузії поверхневих атомів і їхня енергія. Так, у нікелі і нікельхромових сплавах у результаті абразивноструминної обробки швидкість самодифузії зростає приблизно в 30 разів.

Травлення, хімічне й електричне полірування. При цих способах підготовки напилюваних виробів розкриваються енергетично стабільні елементи поверхні у вигляді терас, граней і ін. Додаткові порушення кристалічних ґрат незначні або узагалі відсутні. Усе це не сприяє активації поверхні при її очищенні.

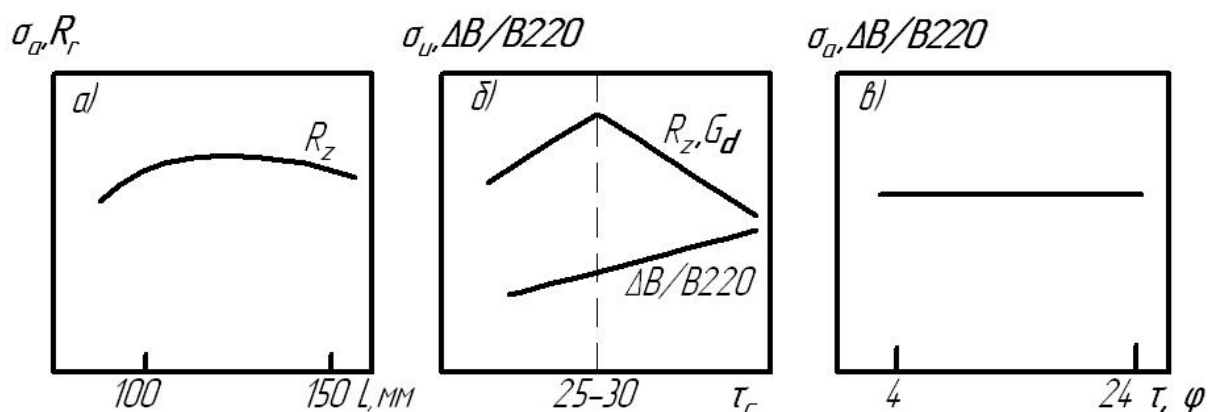


Рисунок 34 — Вплив на $\sigma_a, R_z, \Delta B/B_{220}$ дистанції обробки (а), часу очищення (б) і часу вилежування після обробки (в)

Інгредієнти ванн і режими вибирають, виходячи з властивостей матеріалу напилюваного виробу. Неправильно вибраний склад може дати негативні результати через пасивації поверхні. На відміну від абразивноструминного очищення ці способи підготовки мало вивчені. Їх, в основному, застосовують при підготовці виробів малого розміру, при наявності тонкостінних елементів. Для вакуумного конденсаційного напилювання хімічне травлення і полірування використовують досить широко.

3.8.3 Очищення поверхні електричними газовими розрядами

Особливо широко таке очищення застосовують при вакуумних конденсаційних методах напилювання. У більшості установок цього типу передбачені пристрої для попереднього очищення поверхні напилювання тліючим високовольтним розрядом. Після проведеного очищення з мінімальною перервою починається процес нанесення покриття.

Останнім часом отримали велике поширення способи плазмового напилювання в герметичних камерах при нормальному і зниженому тиску плазмоутворювального газу. Завдяки цьому з'являється можливість

остаточного очищення поверхні виробів газовими електричними розрядами. При подальшому розвитку рівня техніки з'явилась можливість використовувати таке очищення і при інших методах газотермічного напилювання. Очищення тліючим розрядом проводять при невисокому розрідженні ($100\text{—}0,1 \text{ Па}$) із застосуванням важких іонів аргону, які бомбардують напилювану поверхню. Прискорені іони здатні зміщати атоми в кристалічних ґратах або вибивати їх. Для цього потрібна енергія іонів, що перевищує граничні значення. Величина її залежить від теплофізичних властивостей матеріалу виробу, що очищається:

$$E_n \alpha \geq H, \quad (3.2)$$

де E_n — гранична енергія бомбардувальних іонів;

α — коефіцієнт акомодатії, що визначає максимальну енергію, яку іон може передати атомові;

H — теплота сублімації матеріалу.

Для більшості матеріалів $H = 1,4\text{—}1,8 \text{ eV/атом}$.

Якщо прийняти $\alpha = 0,9$, то гранична енергія визначиться в таких межах:

$$E_n = 1,5\text{—}90 \text{ eV}. \quad (3.3)$$

При $E_n = E_i$ інтенсивність очищення мала. Для видалення одного атома при очищенні поверхні потрібно кілька тисяч бомбардуючи іонів. На практиці застосовують $E_i \gg E_n$ або $E_i = 100\text{—}200 \text{ eV}$.

Рідше для очищення поверхні застосовують прискорені електрони через їх нездатність ефективно передавати енергію атомам твердого тіла.

Частинка енергії, переданої електронами ядру (ΔE), визначається з виразу

$$\Delta E = \frac{4E \cdot m}{M}, \quad (3.4)$$

де E — кінетична енергія електронів; m , M — маси електронів і атомного ядра.

Для очищення матеріалів з атомною вагою 10 і 200 кінетична енергія електронів повинна складати $0,1 \cdot 10^6$ і $1,1 \cdot 10^6 \text{ eV}$, відповідно. Такі значення кінетичної енергії реалізуються тільки в рентгенівських трубках і СВЧ-приладах.

Обробка поверхні прискореними іонами не тільки очищає поверхню, але й у значній мірі її активує. Експериментально виявляються дислокації на глибині до $0,05 \text{ мм}$. У поверхневих шарах з'являються вакансії і дислокації. Для очищення тліючими розрядами використовують режими процесу: $I_p = 30\text{—}60 \text{ mA}$; $U_p = 1,5\text{—}3,0 \text{ kV}$; час очищення $5\text{—}25 \text{ с}$.

Поряд із тліючими для очищення напилюваної поверхні можуть бути використані і дугові розряди. І в цьому випадку на поверхні

спостерігаються ерозійні процеси. Однак характер руйнування інший. Сліди руйнувань від впливу дугового розряду мають вигляд прилеглих одна до одної лунок з нерівномірним їх розташуванням. У центрі лунки і біля неї виявляється розплавлений матеріал. У зоні термічного впливу спостерігається дроблення зерен на субзерна, що містять велику кількість дислокацій. Це викликано особливою формою існування дуги, що горить при низькому тиску. Дослідження і практика показують, що для очищення поверхні найбільш доцільно використовувати дуговий розряд в імпульсному режимі горіння. Цим значною мірою підтримується перегрів оброблюваного виробу і поліпшується якість підготовки. Орієнтовно режим дугового очищення імпульсними розрядами складає $I_0 = 10\text{—}30\text{ A}$; $U_0 = 15\text{—}20\text{ B}$; $\tau = 10\text{—}15\text{ c}$.

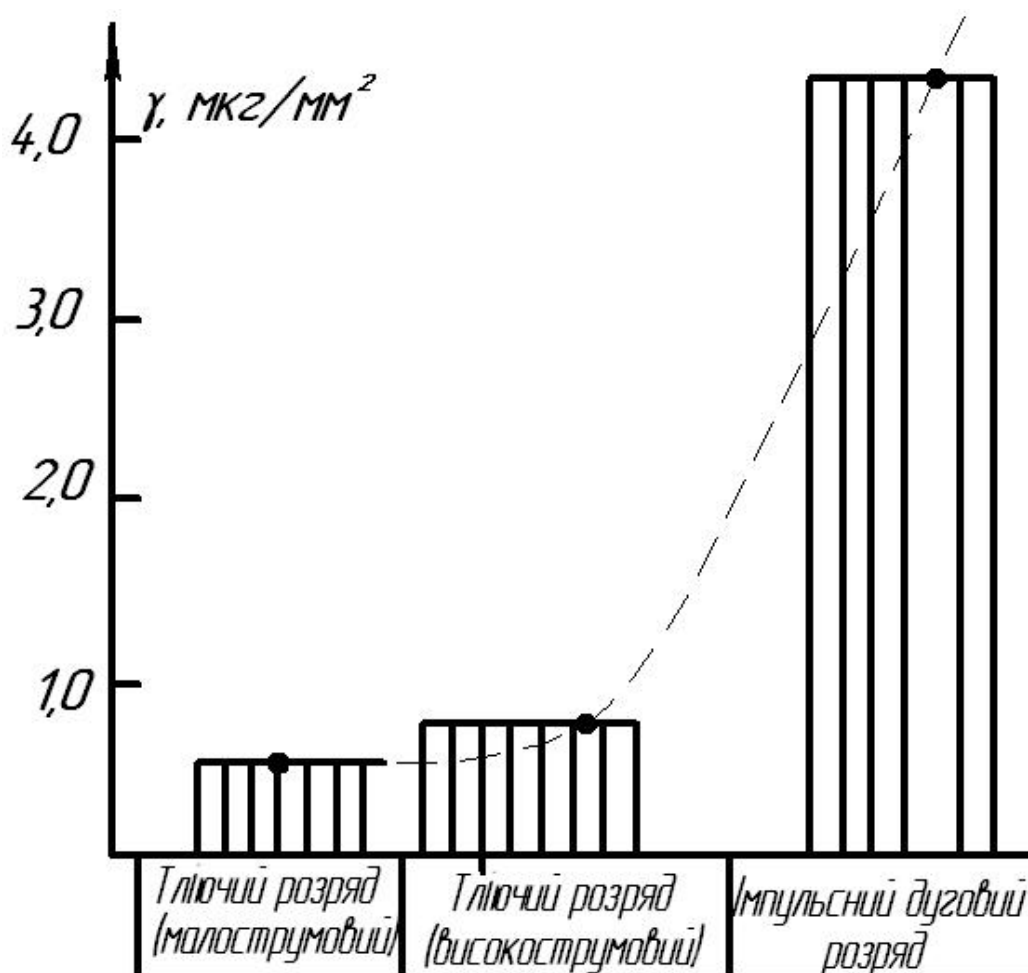


Рисунок 35 — Вплив виду електричного розряду в газах на ступінь очищення поверхонь, забруднених жиром

На рис. 35 показані в першому наближенні можливості електричного розряду в газах для очищення поверхонь з жировими забрудненнями.

З наведених експериментальних даних видно, що тліючий розряд

здатний видаляти тільки невелику кількість жирових забруднень ($0,3 \text{ мкг/мм}^2$) і порівняно тонкі оксидні плівки (10—30 нм). Можливості обробки дуговим розрядом значно вищі.

3.8.4 Очищення поверхні розпилюваними частинками

Дослідження й розрахунки показують, що очищення поверхні напилювання можливе самими частинками при надані їм відповідної енергії.

При вакуумних конденсаційних методах напилювання, при досить високій концентрації іонів у потоці розпилюваних частинок (потоки стимульовані плазмою) можуть бути створені умови попереднього очищення поверхні напилювання іонами. При високих значеннях енергії іонів відбувається руйнування напилюваної поверхні за віднесенням до маси. При цьому відбувається очищення поверхні. Менші енергії іонів сприяють їхньому закріпленню на напилюваній поверхні.

Високі швидкості частинок при газотермічних методах також сприяють очищенню поверхні напилювання. Сферичні частинки в момент удару мають високі швидкості розтікання, найбільша швидкість самої частинки (V_q) у момент зіткнення. Швидкість розтікання (V_p) у початковий період може бути оцінена з виразу:

$$V_p = c \left[1 + \sqrt{1 - (V_q/c)^2} \right], \quad (3.5)$$

де c — швидкість звуку в матеріалі частинки.

Напруги на напилюваній поверхні, викликані розтіканням частинки, можуть бути оцінені, як напруження в приграничному шарі рідкого потоку σ

$$\sigma = \mu \frac{V_l}{\delta_l}, \quad (3.6)$$

де μ — коефіцієнт динамічної в'язкості розплавленого матеріалу;

V_l — швидкість розтікання ламінарного шару;

δ_l — товщина ламінарного шару.

Можна думати, що тонкий шар матеріалу, який розтікається, частково буде захоплювати поверхневі забруднення і нести їх у периферійні зони. Так, при $V_l = 20\text{—}30 \text{ м/с}$ і відповідно $V_p = 100 \text{ м/с}$ напруження в приграничному шарі складе $2,3 \text{ МПа}$. Це не приведе до істотного руйнування поверхні під частинкою. При $V_p = 100 \text{ м/с}$ і наявності шорсткості напруження складає близько 80 МПа . Це вже близько до напруження зсуву для металів ($\sim 100 \text{ МПа}$).

3.9 Наступна обробка напилених покриттів

Розрізняють такі види обробки напилених покриттів: зміцнювальна обробка; зняття залишкових напружень; механічна обробка.

3.9.1 Зміцнювальна обробка

Застосовують для збільшення міцності покриттів, зниження кількості несплошностей (пористості й ін.); вирівнювання мікро- та макроструктури. У практиці відомі кілька методів високотемпературного зміцнення напилених покриттів: спікання, просочення, оплавлення, пластичне деформування.

3.9.2 Спікання

Процес ведуть при загальному нагріванні напиленого виробу. Отримало поширення спікання у твердій фазі при температурі $(0,8—0,9)T_{пл}$ і в присутності рідкої фази. В останньому випадку температура спікання може знаходитися в широких межах. Часто для активації твердофазного спікання використовують попередній наклеп напиленого покриття (рис. 36, а).

Наприклад, для зміцнення деяких вакуумних конденсаційних покриттів перед спіканням (відпалом) роблять наклеп поверхні металевими кульками. Твердорідке спікання, в основному, застосовують для зміцнення композиційних покриттів. У цьому випадку при нагріванні розплавляється або один з компонентів покриття (рис. 36, б), або відбувається контактне плавлення при взаємодії компонентів покриття (рис. 36, в). Рідка фаза, що утвориться при розплавлюванні, проникає в нещільності покриття, сприяючи його зміцненню.

3.9.3 Просочення

Для зміцнення газотермічних покриттів застосовують просочення неорганічними матеріалами. Для цього на напилену поверхню різними способами наносять просочувальний матеріал. При розплавлюванні за рахунок капілярних сил матеріал проникає в нещільності покриття (рис. 36, г). Правильно обраний склад просочувального матеріалу і режим процесу забезпечує заповнення більшості сполучених відкритих нещільностей. Так, наприклад, поводяться мідь і більшість припоїв при просоченні покриттів з карбідів вольфраму.

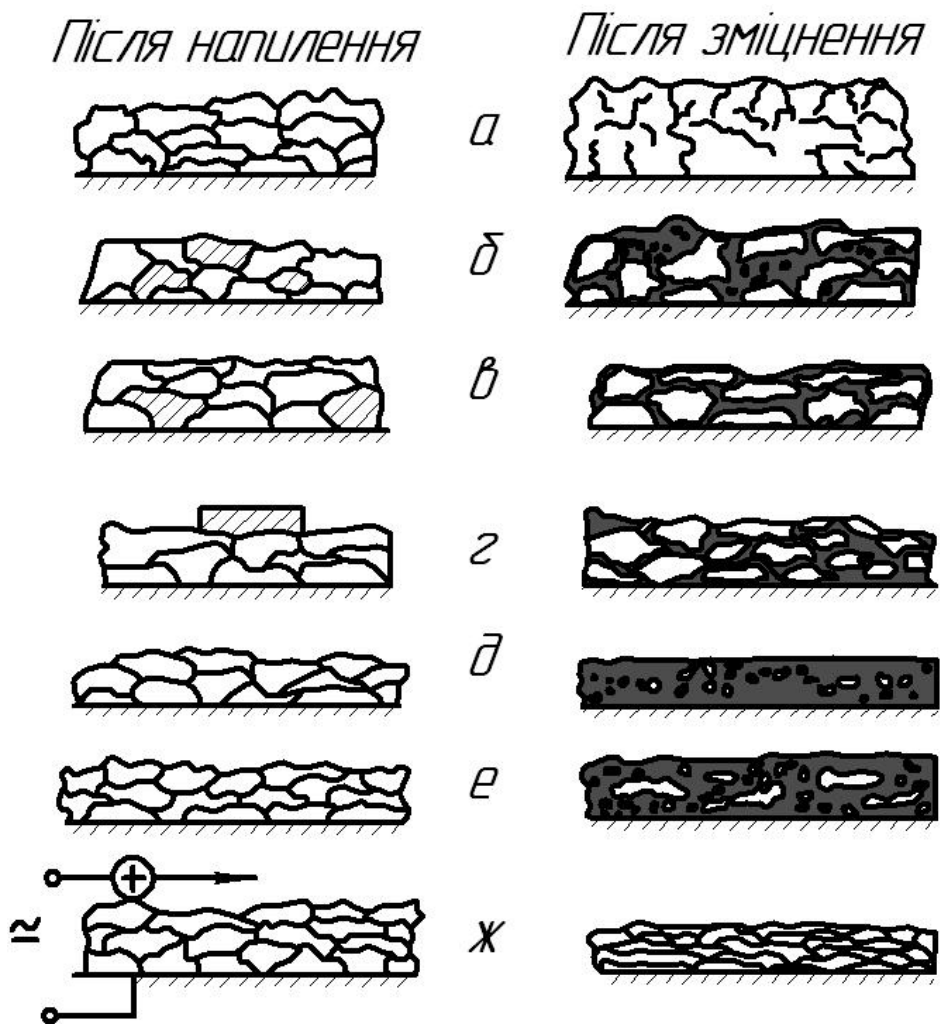


Рисунок 36 — Будова газотермічних покриттів після зміцнювальної обробки

3.9.4 Оплавлення

Найбільш розповсюджений спосіб зміцнення покриттів. Процес ведуть з місцевим або загальним нагріванням напиленого виробу до температури плавлення матеріалу покриття (рис. 36, д). Для збереження тонкої структури процес оплавлення необхідно вести таким чином, щоб виключити зливання розплавлених частинок між собою. На практиці це викликає серйозні ускладнення. Задача істотно полегшується, якщо матеріал покриття має високу різницю в температурах ліквідусу і солідусу. Оплавлення покриттів при температурах, близьких до солідусу, зберігає значну частину вихідної структури напиленого матеріалу (рис. 36, е). Найлегше процес оплавлення реалізується в покриттях, напилених із самофлюсівних матеріалів. Під самофлюсованням розуміють мимовільне видалення оксидів з поверхні частинок покриття при їхньому оплавленні. Для цього необхідно, щоб оксиди мали невисоку температуру плавлення,

малу щільність і гарну рідкотекучість. Такі оксидні системи легко відшлаковуються при оплавленні і спливають на поверхню покриття. Самофлюсівні матеріали мають у своєму складі елементи, які легко окислюються. Оксиди цих елементів утворюють між собою легкоплавкі жужільні системи. Типовими представниками самофлюсівних матеріалів, призначених для напилювання покриттів, є сплави на залізній, нікелевій або кобальтовій основі з домішками кремнію і бора. Найбільш розповсюджені сплави системи $Ni - Cr - B - Si$. Оксиди $B_2O_3 - Cr_2O_3 - SiO_2$ утворюють між собою досить легкоплавкий шлак, що легко віддаляється при оплавленні покриття.

3.9.5 Пластичне деформування

Процес проводять за різними схемами нагрівання і деформування. Поширення одержала схема електроконтактного нагрівання при прокатуванні покриттів мідним роликом (рис. 36, ж).

Зняття залишкових напруг. У напилених покриттях практично завжди присутні залишкові напруження розтягу або стиску. При їхній критичній величині покриття відшаровується. Для підвищення надійності покриттів доцільна операція зняття напруження. Зазвичай обробку проводять при загальному нагріванні виробу до температури 600—700 °С. При менших температурах процес релаксації протікає не досить активно.

3.9.6 Механічна обробка напилених покриттів

Більшість виробів з напиленими покриттями піддають кінцевій механічній обробці. При цьому переслідуються дві мети: додання виробові остаточних розмірів і доведення поверхні покриття до необхідного класу чистоти. Механічна обробка напилених покриттів — винятково відповідальна і важка в здійсненні операцій. Неправильно проведена механічна обробка приводить у непридатність покриття навіть найвищої якості. При виборі методу напилювання, матеріалу покриття і технології необхідно враховувати характер наступної механічної обробки. Насамперед, правильно призначити допуски на обробку з врахуванням їхніх мінімальних значень. Основними видами механічної обробки напилених покриттів є різання, шліфування і полірування. Обробку варто проводити з мінімальним зняттям шару за один прохід.

Швидкість різання вибирають експериментально для різних покриттів, і вона складає 15—100 м/хв при подачі 0,05—0,15 мм/об. При шліфуванні покриттів краще охолодження, якщо це не приведе до погіршення його властивостей унаслідок проникнення рідини в нещільності напиленого

матеріалу. Для того, щоб виключити утворення тріщин і викришувань, необхідно правильно вибрати круг і режим шліфування. Звичайно вибирають круг з порівняно грубою структурою і неміцною зв'язкою. Для шліфування покриттів з підвищеною твердістю, наприклад, напилених із самофлюсівних матеріалів, використовують круги зі зв'язкою середньої міцності й абразивних частинок із зеленого карборунду або карбїду кремнію. Швидкість шліфувального круга вибирають у межах 15—40 м/с при глибині 0,015—0,030 мм. Напилені покриття з високою твердістю часто обробляють алмазним шліфуванням і поліруванням. Режим обробки повинний виключати викрашування твердих компонентів покриття. Іноді, особливо для доведення крихких оксидних покриттів, поверхню шліфують абразивними стрічками.

3.10 Контроль напилених покриттів

При виробництві напилених виробів проводять контроль параметрів процесу й остаточний контроль покриттів.

Правильно вибрані параметри процесу і підтримка їх стабільними при повному циклі напилювання виробу, значною мірою гарантують одержання заданих властивостей. У зв'язку з цим головна увага при напилюванні виробів повинна приділятися контролю параметрів режиму напилювання. Практика показала, що найбільш висока і стабільна якість покриттів досягається при запрограмованих основних параметрах режиму.

Остаточний контроль напилених виробів складається з таких операцій: визначення товщини покриття; зовнішній огляд напиленого виробу; виявлення прихованих дефектів; оцінювання адгезійної міцності.

3.10.1 Визначення товщини покриття

Товщину покриття визначають вимірювальними інструментами, ваговими способами, спеціальними товщиномірами й іншими пристосуваннями. При вимірюванні товщини покриття вимірювальними інструментами необхідне знання вихідних розмірів напилюваного виробу. При визначенні товщини покриттів на складних поверхнях невеликих виробів, наприклад, газотурбінних лопатей, використовують вагові способи. Для цього повинна бути відома вихідна маса виробу і розміри напилюваної поверхні. Ваговий спосіб дозволяє визначати середню товщину покриття. Найбільш простим є визначення товщини покриттів спеціальними приладами — товщиномірами. Як правило, такі прилади налаштовують на один або кілька матеріалів покриттів.

3.10.2 Зовнішній огляд покриття

При зовнішньому огляді покриття контролюється загальний стан поверхні напилювання, порівнюється з еталоном наявність зовнішніх дефектів: тріщин, відколів, спучувань і т.д. Для більш ретельного огляду застосовують лупи зі збільшенням до 10 і більше.

3.10.3 Виявлення прихованих дефектів

Мікротріщини, локальні відшарування, макро- і мікронещільностей з великими труднощами або зовсім не піддаються контролю. У ряді випадків деякі дефекти вдається виявити, застосовуючи ультразвукові способи контролю.

3.10.4 Оцінювання адгезійної міцності

Оцінити адгезійну міцність безпосередньо на напиленому виробі дуже складно. Зазвичай її визначають на дослідних зразках або вибірково на напилених виробах. В останньому випадку застосовують як непрямі, так і прямі визначення. До непрямого відносять різні способи: дряпання, вигини і т.д. До прямих визначень відносять відрив або зрушення частини покриття на напиленому виробі.

3.11 Технологічна схема газотермічного й вакуумного конденсаційного напилювання покриттів

У технічній літературі, технологічних і виробничих інструкціях приводяться схеми типових методів і способів газотермічного і вакуумного конденсаційного напилювання, у ряді випадків стосовно до конкретних матеріалів або виробів. Типовий технологічний процес устанавлює перелік і можливий діапазон параметрів основних операцій.

На рис. 37 наведена технологічна схема в загальному вигляді. Технологічний процес починається з ретельного вивчення експлуатаційних властивостей напилюваного виробу, вибору матеріалу, покриття; методу напилювання й інших особливостей; складання технологічної документації. На початковій стадії проглядаються два самостійні напрямки. Один з них пов'язаний з підготовкою матеріалу, що розпилюється; інший — напилюваного виробу.

Важливими операціями в технологічному процесі є підготовка устаткування і попереднє відпрацювання режиму напилювання. В автоматизованих установках з мікропроцесорною технікою керування вимоги до підготовки істотно зростають. Попереднє відпрацювання режиму напилювання відбувається на дослідних зразках, виготовлених з

того ж матеріалу, що і напилюваний виріб. Оптимальні параметри закладаються або безпосередньо в установку, або через комп'ютерну систему. В операцію напилювання входить, у разі потреби, і напилювання проміжного шару (підшару, шару зчеплення).

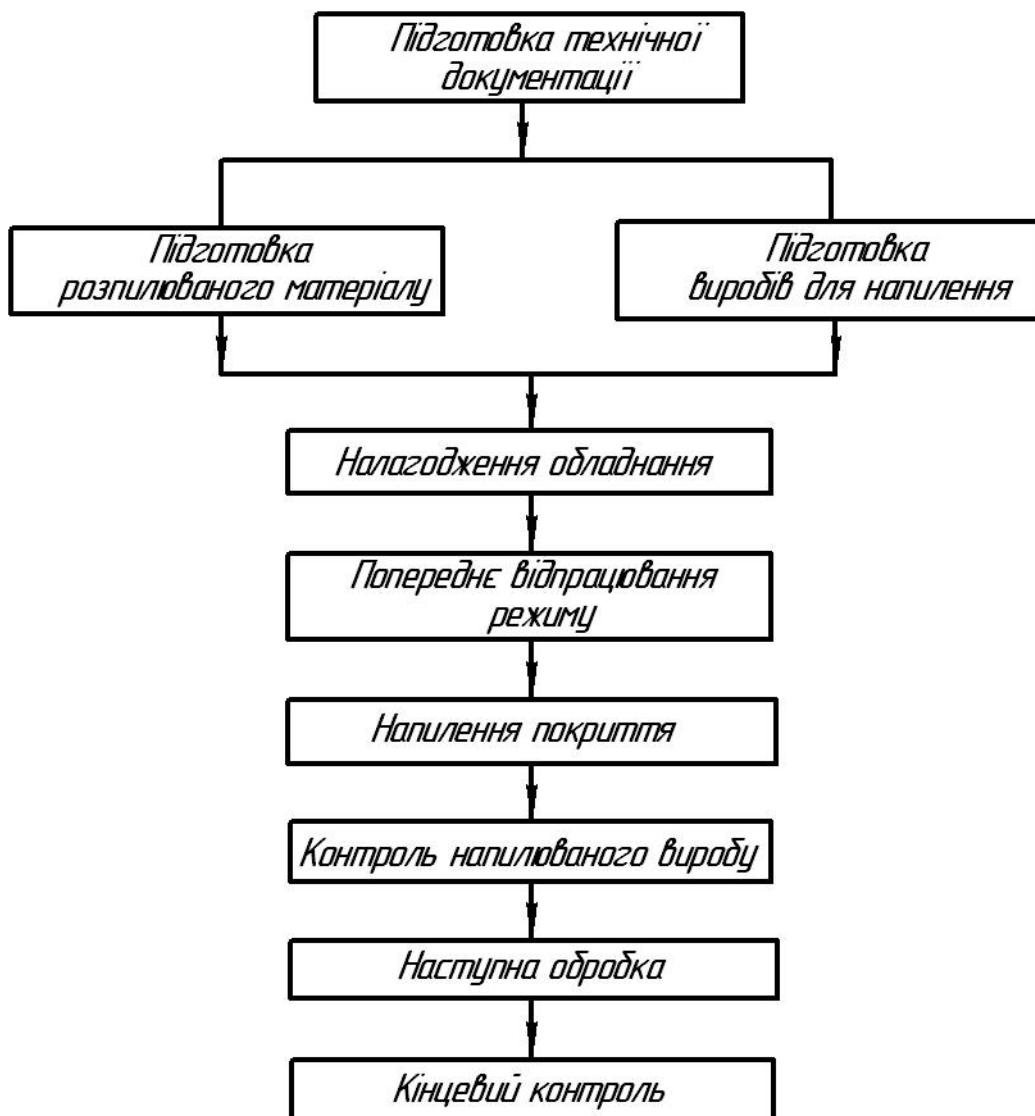


Рисунок 37 — Технологічна схема газотермічного і вакуумного конденсаційного напилювання покрить

ЛІТЕРАТУРА

1. Владимирский Т. А., Жарков А. Ф., Лопинский В. Н., Мельников О. Е. Газопламенная обработка материалов на железнодорожном транспорте. — М.: Транспорт, 1977. — 200 с.
2. Витязь П. А., Ивашко В. С., Манойло Е. Д. Теория и практика газопламенного напыления. — Мн.: Наука і техника, 1993. — 295 с.
3. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико—химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М: Наука, 1978. — 227 с.
4. Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия в машиностроении. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. — 215 с.
5. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. В. С. Митина. — М.: Металлургия, 1987. — 792 с.
6. Кудинов В. В., Пекшев П. Ю., Белашенко В. Е. и др. Нанесение покрытий плазмой — М.: Наука, 1990. — 408 с.
7. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. — М.: Наука, 1977. — 184 с.
8. Кулик А. Я., Борисов Ю. С., Мнухин А. С., Никитин М. Д. Газотермическое напыление композиционных порошков Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. — 199 с.
9. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. — К: Техніка, 1986.—223с.
10. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — К.: Наук, думка, 1983. — 230 с.
11. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. — Л.: Химия, 1976. — 296 с.
12. Макаров З.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
13. Антропов Л. И., Лебединский Ю. Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. —К.: Техника, 1986, — 200 с.
14. Осаждение из газовой фазы / Под ред. К. Пауэлла, Дж. Оксли, Дж. Блочера: — М.: Атомиздат, 1970. — 427 с.
15. Шатинский В. Ф., Нестеренко А. И. Защитные диффузионные покрытия. — К.: Наук: думка, 1988. — 272 с.
16. Самсонов Г. В., Верхотуров А. Д., Бовкун Г. А., Сычев В. В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. — К.: Наук. думка, 1976. — 220 с.
17. Повышение качества поверхности и плакирование металлов: Справочное издание. Пер. с нем. / Под ред. Кнаушнера А.— М.:

- Металлургия, 1984.— 368 с.
18. Анциферов В. Н., Бобров Г. В., Дружинин Л. К. и др. Порошковые покрытия и напыленные покрытия. Учебник для вузов. — М.: Metallurgy, 1987. — 792с.
 19. Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А. Нанесення покриття: Навчальний посібник / За редакцією академіка НАН України К. А. Ющенка. — К.: Арістей, 2005. — 204 с.
 20. Кузнецов В. Д., Пащенко В. М., Ющенко К. А., Борисов Ю. С. Фізико-хімічні основи інженерії поверхні: навч. посібник. — К.: ВІПОЛ, 2005. — 372 с.

Навчальне видання

Олена Павлівна Шиліна
Валерій Іванович Савуляк
Андрій Юрійович Осадчук

ВАКУУМНО - КОНДЕНСАЦІЙНЕ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Осадчуком А. Ю.

Редактор В. О.Дружиніна

Коректор З. В.Поліщук

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку

Формат 29,7x42 $\frac{1}{4}$

Друк різнографічний

Тираж прим.

Зам. №

Гарнітура Times New Roman

Папір офсетний

Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ