

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



О.Д. РОЖКОВ

ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Частина II

Дніпропетровськ НМетАУ 2008

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

О.Д. РОЖКОВ

**ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ
ПОКРИТТІВ**

Частина II

Затверджено на засіданні Вченої ради академії
як навчальний посібник

Дніпропетровськ НМетАУ 2008

Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 38 с.

З пропозиції сучасних наукових поглядів викладені технологічні особливості методів вакуумного напилення покриттів. Також розглянуті питання діагностики якості напилених покриттів, їх фінішної обробки і застосування в техніці.

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

Іл. 17. Табл. 1. Бібліогр.: 5 найм.

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

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

© Національна металургійна
академія України, 2008

© Рожков О.Д., 2008

ЗМІСТ

3	ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВАКУУМНИХ МЕТОДІВ	
	НАПИЛЕННЯ (ВН) ПОКРИТТІВ.....	5
3.1	Узагальнена схема вакуумного напилення.....	5
3.2	Способи і технологічні особливості вакуумного напилення покриттів	
	термічним випаровуванням (ТВН).....	6
3.2.1	Загальна характеристика термовакуумного напилення	
	покриттів (ТВН).....	6
3.2.2	Резистивний нагрів при напиленні покриттів.....	6
3.2.3	Високочастотний індукційний нагрів при напиленні покриттів	
	термічним випаровуванням.....	8
3.2.4	Лазерний нагрів при напиленні покриттів.....	9
3.2.5	Електронно-променевий нагрів при вакуумному	
	напиленні покриттів.....	9
3.2.6	Іонне осадження.....	12
3.2.7	Випаровування матеріалів за допомогою електричної	
	дуги анодної форми.....	14
3.3	Технологічні особливості напилення покриттів вибуховим	
	випаровуванням-розпиленням.....	15
3.4	Способи і технологічні особливості вакуумного напилення покриттів	
	іонним розпиленням (ІР).....	16
3.4.1	Способи і технологічні особливості іонно-плазмового	
	розпилення.....	16
3.4.1.1	Діодна схема іонно-плазмового розпилення.....	17
3.4.1.2	Тріодна схема іонно-плазмового розпилення.....	17
3.4.1.3	Магнетронна схема іонно-плазмового розпилення.....	18
3.4.2	Технологічні особливості іонно-променевого розпилення.....	19
4	ФІНІШНА ОБРОБКА ПОКРИТТІВ І ДІАГНОСТИКА ЇХ ЯКОСТІ.....	20
4.1	Фінішна обробка покриттів.....	20
4.1.1	Зниження пористості напилених покриттів і підвищення їх	
	міцностних характеристик.....	20
4.1.2	Додання виробу остаточних розмірів.....	22
4.2	Властивості напилених покриттів і методи їх випробувань.....	22

4.2.1	Випробування на міцність зчеплення з основою.....	23
4.2.1.1	Випробування на міцність зчеплення методом випрягання штифта.....	23
4.2.1.2	Випробування на міцність зчеплення на відрив з використанням клею.....	24
4.2.1.3	Випробування на міцність зчеплення при зсуві.....	25
4.2.1.4	Випробування на вигин.....	26
4.2.1.5	Випробування циклічним ударним навантаженням.....	27
4.2.1.6	Випробування вдавлюванням кульки.....	27
4.2.1.7	Нанесення сітки подряпин.....	27
4.2.2	Визначення когезійної міцності покриттів.....	27
4.2.3	Визначення пористості покриттів.....	29
4.2.3.1	Визначення загальної пористості методом гідростатичного зважування.....	29
4.2.3.2	Вимірювання відкритої пористості на просочених зразках.....	29
4.2.3.3	Визначення пористості методом прямого зважування.....	30
4.2.4	Газопроникність покриттів.....	30
4.2.5	Твердість покриттів.....	30
5	ВИКОРИСТАННЯ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ.....	31
5.1	Чорна металургія.....	31
5.1.1	Агломераційне виробництво.....	31
5.1.2	Доменне виробництво.....	31
5.1.3	Сталеплавильне виробництво.....	32
5.1.4	Прокатне і волочильне виробництво.....	33
5.2	Машинобудування.....	34
5.2.1	Інструментальне господарство, металообробка.....	34
5.2.2	Текстильне машинобудування.....	35
5.2.3	Хімічне машинобудування.....	35
5.3	Інші області вживання напилених покриттів.....	36
	ЛІТЕРАТУРА.....	37

3 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВАКУУМНИХ МЕТОДІВ НАПИЛЕННЯ (ВН) ПОКРИТТІВ

3.1 Узагальнена схема вакуумного напилення

У методах і технології вакуумного напилення покриттів є багато загального, що дозволяє представити їх у вигляді узагальненої схеми, яка наведена на рисунку 3.1.

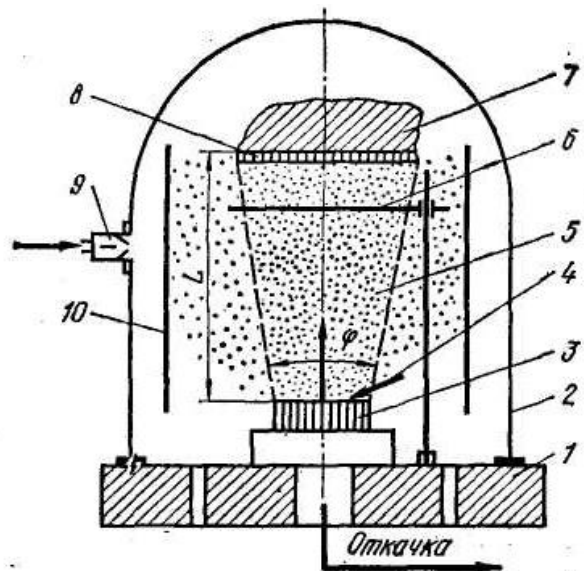


Рисунок 3.1 - Узагальнена схема вакуумного нанесення покриттів: 1 - базова плита; 2 - робоча камера; 3 – матеріал, що розпилюється (випаровується); 4 - підведення енергії; 5 - потік розпилених частинок; 6 - заслінка; 7 – виріб, що напилюється; 8 - покриття; 9 - натікач; 10 - екрани

При ВН покриття формуються з потоку частинок (атоми, молекули, іони), одержаних термічним випаровуванням (ТВН), іонним розпиленням (ІР) або вибуховим випаровуванням - розпиленням (ВВР). Процес ведуть в жорстких камерах при тиску $13,3-133 \cdot 10^{-3}$ Па. Рушійною силою перенесення частинок до поверхні напилення є різниця парціального тиску парової фази.

Процес вакуумного напилення доцільно розглядати таким, що складається з трьох стадій: 1 - утворення випарованих або розпилених частинок, 2 - формування потоку і перенесення напилених частинок до поверхні напилення, 3 - конденсація пари і формування покриття на поверхні основи. Для отримання якісних покриттів необхідне забезпечення оптимальних умов їх протікання.

3.2 Способи і технологічні особливості вакуумного напилення покриттів термічним випаровуванням (ТВН)

3.2.1 Загальна характеристика термовакуумного напилення покриттів (ТВН)

Найвища ефективність випаровування досягається при нагріві матеріалу, вище за температуру його плавлення. Проте можливе утворення потоку з достатньою для напилення концентрацією частинок і при випаровуванні твердого матеріалу (хром і ін.). Для нагріву матеріалу, що розплюється, застосовують різні джерела теплоти: електронний і світловий промені, резистивний, індукційний і дуговий нагрів. Відповідно цьому розрізняють і способи напилення покриттів термічним випаровуванням. Для будь-якого способу напилення необхідний випарник. Його призначення - утримувати розплавлений матеріал при температурі, достатній для отримання необхідного тиску пари (1-100 Па). Для більшості матеріалів, що представляють практичний інтерес, ці температури перевершують 1000-2000 °С.

Найчистіший потік пари забезпечується при локальних способах нагріву і утримання розплавленого матеріалу. При інших способах нагріву уникнути контакту матеріалу, що випаровується, з матеріалом тигля або матеріалом нагрівача неможливо.

3.2.2 Резистивний нагрів при напиленні покриттів

Нагрів обумовлений виділенням тепла в провіднику при проходженні через нього електричного струму. Резистивні випарники бувають з прямим і непрямим нагрівом.

У випарниках прямого нагріву струм в декілька десятків (сотень) ампер безпосередньо проходить через матеріал, що випаровується. Основними їх перевагами є: висока чистота пари (не забруднені парами інших матеріалів) і простота конструкції.

До основних недоліків відносяться:

- випаровування можливе тільки з твердого стану. Тому прямий нагрів може бути застосовний тільки для матеріалів з високою пружністю пари (Сг, Мп і ін.);
- матеріал, що випаровується, повинен бути електропровідним і мати форму дроту або пластини постійного перетину;
- низька продуктивність випаровування.

В практиці ТВН з резистивним нагрівом основне поширення набули випарники з непрямим нагрівом. До матеріалів для їх виготовлення пред'являються наступні основні вимоги:

- а) тиск пари матеріалу випарника при температурі випаровування речовини, що напилюється, повинен бути зневажливо малим;
- б) матеріал випарника повинен добре змочуватися розплавленою речовиною, що необхідно для забезпечення гарного теплового контакту між ними;
- в) між матеріалом випарника і тим, що випаровується, не повинно протікати ніяких реакцій, не повинні утворюватися легколетучі сплави, оскільки інакше відбувається забруднення покриттів, що утворюються;
- г) висока робоча температура.

Розрізняють за конструктивними ознаками дротяні, стрічкові, човникові і тигельні випарники.

Дротяні випарники виготовляють з дроту діаметром 0,5-1,5мм з тугоплавких матеріалів. Стрічкові - з фольги з високотемпературних матеріалів. У них виконують поглиблення у вигляді жолобків, чашок, човників і ін. Вони є більш потужними в порівнянні з дротяними і забезпечують більш велику продуктивність напилення.

Тигельні застосовують тільки для матеріалів, що не взаємодіють з їх матеріалом при робочій температурі. Вони виготовляються з високотемпературних металів (W, Ta, Mo), оксидів (Al_2O_3 , BeO, ZrO_2) і інших сполук.

До основних переваг резистивних випарників відносяться:

- простота конструкції;
- нескладність електроживлення;
- зручність контролю і регулювання режиму роботи.

До основних недоліків можна віднести:

- низьку робочу температуру (до 1800 К);
- високу енергоємність;
- низьку продуктивність.

3.2.3 Високочастотний індукційний нагрів при напиленні покриттів термічним випаровуванням

Принципова схема випарника з індукційним нагрівом наведена на рисунку 3.2.

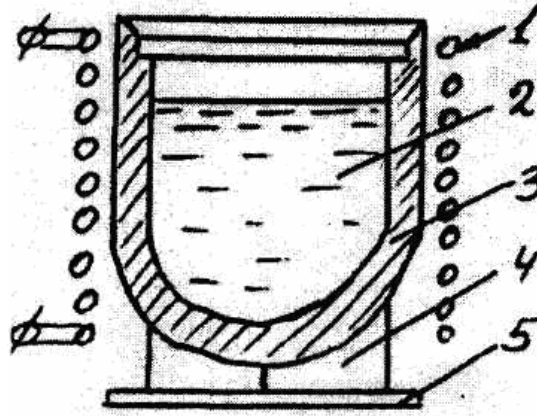


Рисунок 3.2 - Схема випарника з індукційним нагрівом: 1 – водоохолоджувальний індуктор; 2 - матеріал, що випаровується; 3 - тигель; 4- підставка з електроізоляційного матеріалу; 5 - основа

Змінне електромагнітне поле викликає коливальний рух полярних молекул і заряджених частинок - іонів. Ці частинки одержують енергію від електромагнітного поля і передають її решті молекул при зіткненнях. Завдяки цьому відбувається безпосередній нагрів матеріалу, що випаровується. Час нагріву - декілька секунд.

Основні переваги:

1. Тепло передається безпосередньо матеріалу, що випаровується.
2. Використання енергії, що живить випарник, більш ефективне, ніж для резистивного нагріву - немає необхідності перегріву тигля.

Основні недоліки:

1. Більш висока вартість випарників в порівнянні з такими для резистивного нагріву.
2. Необхідні додаткові площі для розміщення ВЧ- генератора.
3. Складність і відносно висока вартість устаткування.

3.2.4 Лазерний нагрів при напиленні покриттів

Принципова схема установки для нанесення покриттів з лазерним нагрівом матеріалу наведена на рисунку 3.3.

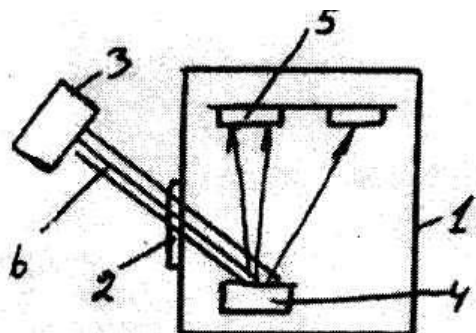


Рисунок 3.3 - Принципова схема установки лазерного напилення покриттів:

1 - робоча вакуумна камера; 2 - кварцеве скло; 3 - оптичний квантовий генератор (лазер); 4 – матеріал, що випаровується; 5 - підложкоутримувач, що обертається; 6 - світловод

Основними перевагами цього способу є: безпосереднє підведення енергії до матеріалу, що випаровується, і висока питома потужність лазерного променя 10^7 - 10^9 Вт/см².

Основний недолік - можливість утворення в потоці пари краплинної фази.

3.2.5 Електронно-променевиий нагрів при вакуумному напиленні покриттів

Електронно-променеви джерела нагріву в поєднанні з високим вакуумом забезпечили створення нового напрямку в області отримання і обробки матеріалів – електронно-променевої технології. До неї відноситься і напилення матеріалів у вакуумі. На рисунку 3.4 наведена принципова схема установки електронно-променевого напилення покриттів.

Потік електронів, емітованих катодом, прискорюється в електричному полі між катодом і анодом. Електрони набувають енергію $E=eU$, де e - заряд електрона, U - напруга на аноді. Залежно від типу електронної гармати воно складає 5-60 кВ. За допомогою фокуруючої і відхиляючої магнітних систем потік електронів фокусується і спрямовується на поверхню матеріалу, що випаровується. Таким чином, має місце безпосереднє підведення енергії до нього.

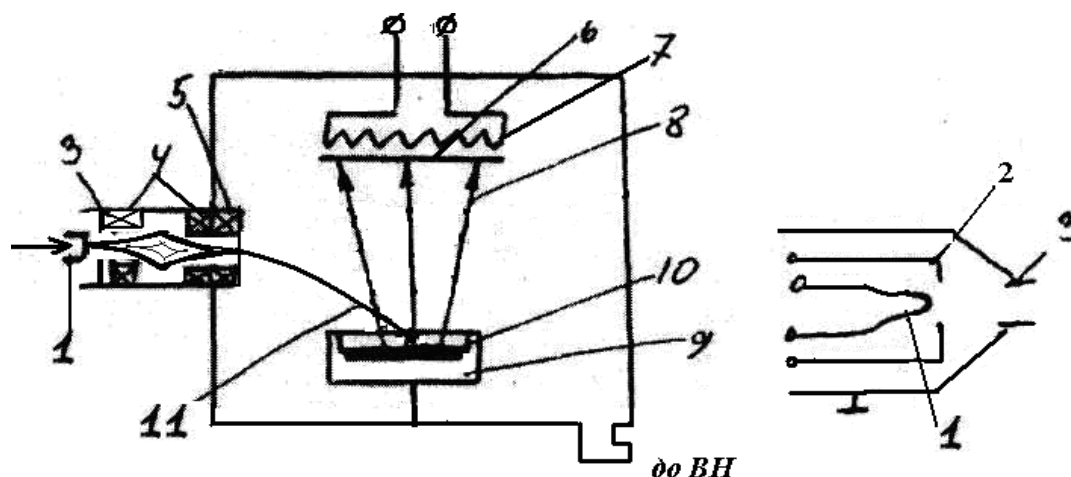


Рисунок 3.4 - Принципова схема установки електронно-променевого напилення покриттів з аксіальною гарматою: 1- термоелектронний катод; 2 - фокусуєчий електрод; 3 - порожнистий анод, що знаходиться під потенціалом землі; 4 - фокусуєча магнітна система; 5 - відхиляєча магнітна система; 6 - підложкоутримувач; 7- підігрів виробів; 8 - потік пари речовини, що випаровується; 9 - тигель; 10 – матеріал, що випаровується; 11 - потік електронів

Фокусуєчі системи, що застосовуються, дозволяють одержувати густину енергії до 10^8 Вт/см² і більш. ККД електронно-променевого нагріву досягає 80%.

Для порівняння, ККД плазмового нагріву - до 20%; лазерного 10-20%. При електронно-променевому нагріві 15-30% енергії, що підводиться, втрачається на утворення вторинних електронів, до 0,1% - рентгенівського випромінювання. Електрони гальмуються в тонкому шарі 1-2 мкм ($U_0=15-20$ кВ). Основне гальмування електронів відбувається в кінці пробігу. Теплота виділяється в об'ємі тонкого поверхневого шару. Це обумовлює високу ефективність електронно-променевих випарників, особливо при максимальних ступенях фокусування електронного променя.

Енергія атомів в потоці пари невелика і складає 0,2-0,3 еВ, ступінь іонізації частинок - 0,05-0,1%. Для цього способу напилення характерна висока густина пари.

На сьогодні у випарниках набули поширення два типи електронно-променевих гармат: аксіальні, що формують осесиметричний потік електронів, і плоскопроменеві, що перетворюють первинний плоский потік електронів в циліндровий. В останньому випадку пушка і тигель знаходяться в одному блоці (рис. 3.5).

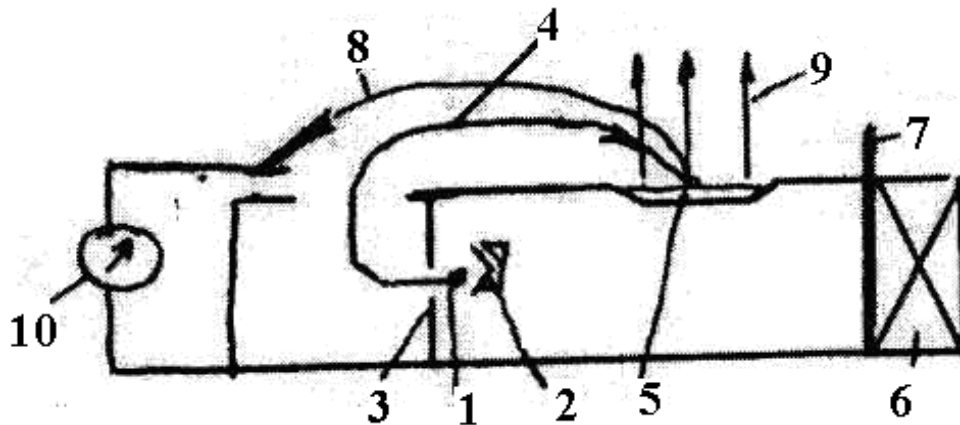


Рисунок 3.5 - Принципова схема електронно-променевого випарника з плоскопроменевою гарматою: 1 - катод; 2 - система електростатичного фокусування; 3 – прискорюючий анод; 4-потік електронів; 5 - водоохолоджувальний мідний тигель; 6 - магнітна відхиляюча система; 7 - екран - відбивач електронів; 8 - потік іонів; 9- потік пари; 10 - датчик іонного струму

Електронно-променеві випарники можливо використовувати в безперервних процесах напилення (напилення на стрічку, дріт і т.д.).

Основними перевагами електронно-променевого випаровування матеріалів є:

- безпосереднє підведення енергії до матеріалу, що випаровується; це обумовлює високий ККД нагріву;
- малий час нагріву матеріалу, що випаровується, до робочої температури випаровування;
- висока густина пари матеріалу, що випаровується;
- висока якість покриттів;
- можливість використання в безперервних процесах.

Основні недоліки:

- складність устаткування;
- необхідність використання спеціалізованих джерел живлення;
- низька енергія частинок;
- наявність рентгенівського випромінювання.

3.2.6. Іонне осадження

Одним з шляхів підвищення якості покриттів і, в першу чергу, адгезійної і когезійної їх міцності є обробка поверхні прискореними частинками (табл.3.1). Для розгону частинок їх іонізують і прискорюють у напрямі поверхні електричним полем.

Таблиця 3.1 - Вплив обробки поверхні виробів прискореними частинками на якість покриттів

Вид обробки	Процеси, що протікають при обробці поверхні, зміна властивостей і структури покриттів
1. Поверхнєве очищення розпиленням і іонне травлення	Руйнування і видалення з поверхні оксидів і ін. забруднень. Поліпшення адгезії
2. Нагрів приповерхневого шару	Десорбція фізично адсорбованих атомів. Зростання σ_a , зміна структури
3. Глибоке травлення	Зміна оптичних характеристик поверхні, поліпшення адгезії
4. Взаємодія матеріалу основи, що розпилюється, з осідаючими атомами, які випаровуються	Утворення проміжних шарів, збільшення σ_a
5. Іонне впровадження (імплантація)	Впровадження іонів в приповерхневий шар (на декілька атомних шарів). Формування проміжного шару
6. Виникнення активних центрів зародження	Посилення росту зародків, підвищення міцності зчеплення. Формування дрібнокристалічної структури покриттів

Іонне осадження (рис. 3.6) - це метод ТВН, при якому випаровування і конденсація пари протікають у тліючому розряді. При цьому основа (катод) знаходиться під напругою 1 -5 кВ.

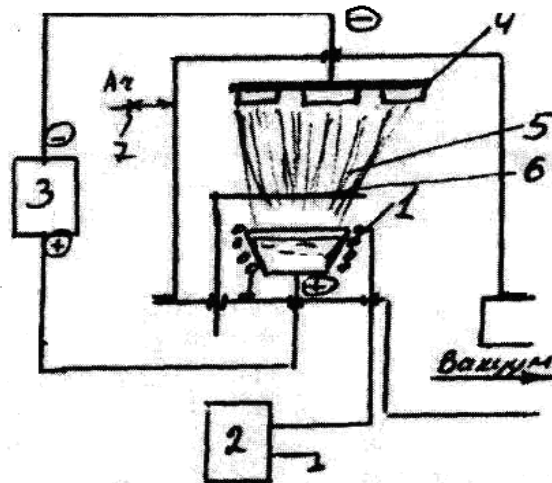


Рисунок 3.6 - Схема процесу напилення покриттів іонним осадженням: 1 - випарник; 2 - джерело живлення випарника; 3 - високовольтний випрямляч; 4 - ізолюваний підложкоутримувач; 5 - потік пари в тліючому розряді; 6 - заслінка - служить для відсікання першої, зазвичай забрудненої порції пари; 7 - натікач

Заздалегідь робоча камера вакуумується до $P=10^{-2}-10^{-3}$ Па. Проводиться розплавлення і дегазація матеріалу, що напилюється. Після цього через натікач в камеру напускається інертний газ (Ar) до $P \approx 1-10^{-1}$ Па і на основу подається негативний потенціал. В процесі протікання тліючого розряду основа бомбардується прискореними іонами. Відбувається її очищення і підігрів.

Після відкриття заслінки тліючий розряд горить в парах металу і в аргоні. Ступінь іонізації атомів пари невеликий і звичайно не перевищує 10%. Поєднання на ранніх стадіях процесів розпилення і осадження покриття забезпечує міцне зчеплення його з поверхнею основи. Після утворення перших шарів покриття потенціал зменшується до $U \approx 200$ В. Можливе його відключення. Далі протікає звичайне ТВН.

Для іонного осадження характерне отримання покриттів, рівномірних по товщині на поверхнях з складною конфігурацією. Це пояснюється розсіюванням атомів металу, який осаджується - зіткнення з молекулами аргону сприяє формуванню дифузійного потоку.

Основні недоліки:

- утруднено використання в безперервних процесах;
- низький ступінь іонізації пари;

- можливість забруднення матеріалу покриття.

3.2.7 Випаровування матеріалів за допомогою електричної дуги анодної форми

Схема процесу напилення покриттів випаровуванням матеріалів дугою анодної форми наведена на рисунку 3.7. Позитивний потенціал джерела живлення підведений до матеріалу, що випаровується (дуга анодної форми).

Камера вакуумується до $P=10^{-3}-10^{-4}$ Па. В зону між катодом і тиглем подають аргон ($P\sim 10^{-1}$ Па). Потім вмикають розжарювання катода. Збуджується дуговий розряд в середовищі аргону. Після розплавлення матеріалу, що наноситься, подача аргону припиняється, і дуга горить в парах цього металу. Ступінь іонізації атомів, що випаровується, може досягати 80%. Даний спосіб створення потоку пари виключає утворення в ньому краплинної фази.

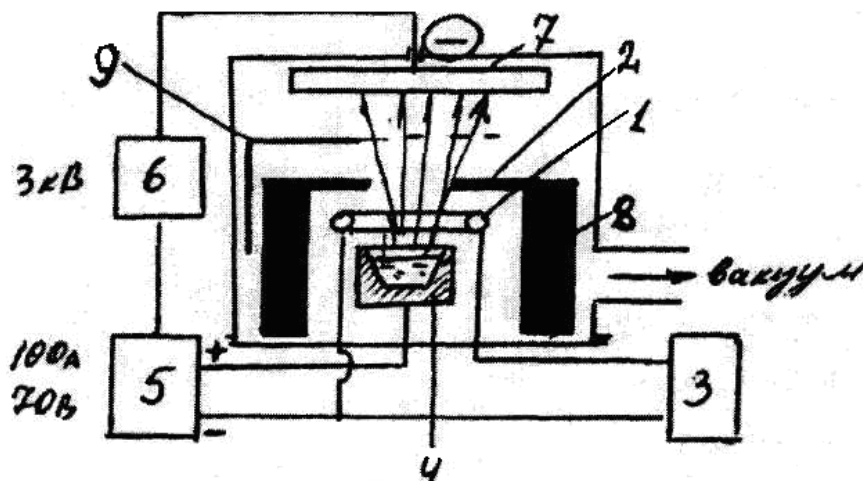


Рисунок 3.7 - Схема процесу напилення покриттів випаровуванням матеріалів електричною дугою анодної форми: 1 - кільцевий термоелектронний катод (W ; $T=1700-2100^{\circ}C$); 2 - система електромагнітного фокусування; 3 - джерело живлення катода; 4 - тигель з матеріалом, що випаровується; 5 - джерело живлення дуги; 6 - високовольтний випрямляч; 7- підложкоутримувач; 8 - магнітна система стабілізації дугового розряду; 9 – заслінка

Подається напруга на основу (3 кВ) і відбувається очищення її поверхні за рахунок бомбардування іонами. Відкривається заслінка і проводиться напилення покриття. Практично повністю іонізований потік осідаючих атомів виключає додатковий нагрів поверхні виробу, який необхідний в інших способах для забезпечення міцного зчеплення покриття з поверхнею

деталі, що напилюється. Активація поверхні і процесів, що протікають при зародженні і зростанні покриття, досягаються за допомогою бомбардування іонами, прискореними електричним полем у напрямі основи.

Процес застосовується при нанесенні корозієстійких і жаростійких покриттів.

3.3 Технологічні особливості напилення покриттів вибуховим випаровуванням-розпиленням

Розглянемо технологічні особливості напилення вибуховим випаровуванням-розпиленням на прикладі випаровування у вакуумі матеріалів дугою катодної форми (рис. 3.8). В цьому процесі негативний потенціал джерела живлення електричної дуги підведений до матеріалу, що випаровується. Метод розроблений ХФТІ НАН України (метод КІВ).

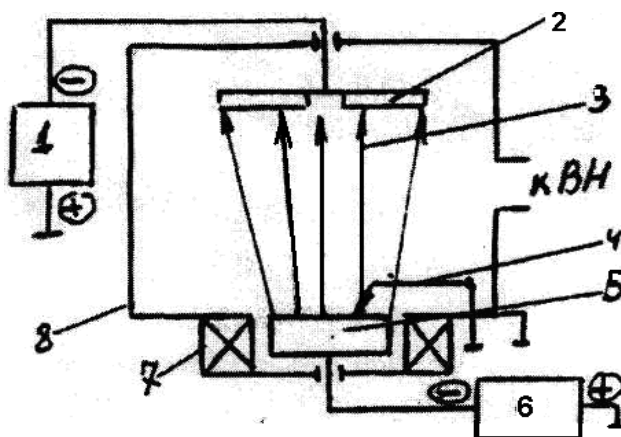


Рисунок 3.8 - Схема процесу напилення покриттів випаровуванням матеріалів дугою катодної форми: 1- високовольтне ДЖ ($U=2,2\text{кВ}$); 2- підложкоутримувач; 3 - потік пари; 4 - підпалювальний електрод; 5- матеріал, що випаровується (знаходиться під потенціалом катода); 6 - ДЖ дуги (70В; 300А); 7 - система стабілізації горіння дуги; 8 - робоча камера

Вакуумну камеру відкачують до $P=10^{-2}\text{Па}$, проводять іонне очищення і підігрів поверхні виробів. Видалення забруднень з поверхні виробів відбувається за рахунок бомбардування її іонами, прискореними в електричному полі, що створюється високовольтним ДЖ.

За допомогою підпалювального електрода збуджують дуговий розряд. Для стабілізації опорної плями дуги в межах площі катода служить система стабілізації горіння дуги (електромагнітна катушка). Густина струму в катодній

плямі 10^5-10^7 А/см². Пари металу, що розпилюється, проходять через дуговий розряд і іонізуються. Ступінь іонізації 20 - 80%. Завдяки цьому з'являється можливість формувати його потік у напрямі основи. В процесі конденсації на деталі подається негативний потенціал 25-100 В. Процес ведуть при тиску в робочій камері $P \approx 10^{-2}-10^{-3}$ Па. Для отримання хімічних з'єднань (нітриди, карбіди, оксиди) в камеру подаються відповідні активні гази. Метод випаровування матеріалів дугою катодної форми покладений в основу створення установок типу «Булат», «Пуск» і ін. Цим методом частіше за все наносять високотверді покриття на інструмент.

3.4 Способи і технологічні особливості вакуумного напилення покриттів іонним розпиленням (ІР)

3.4.1 Способи і технологічні особливості іонно-плазмового розпилення

На практиці набули поширення наступні схеми іонно-плазмового (катодного) розпилення, які відрізняються умовами утворення плазми тліючого розряду: діодна, тріодна і магнетронна (рис. 3.9).

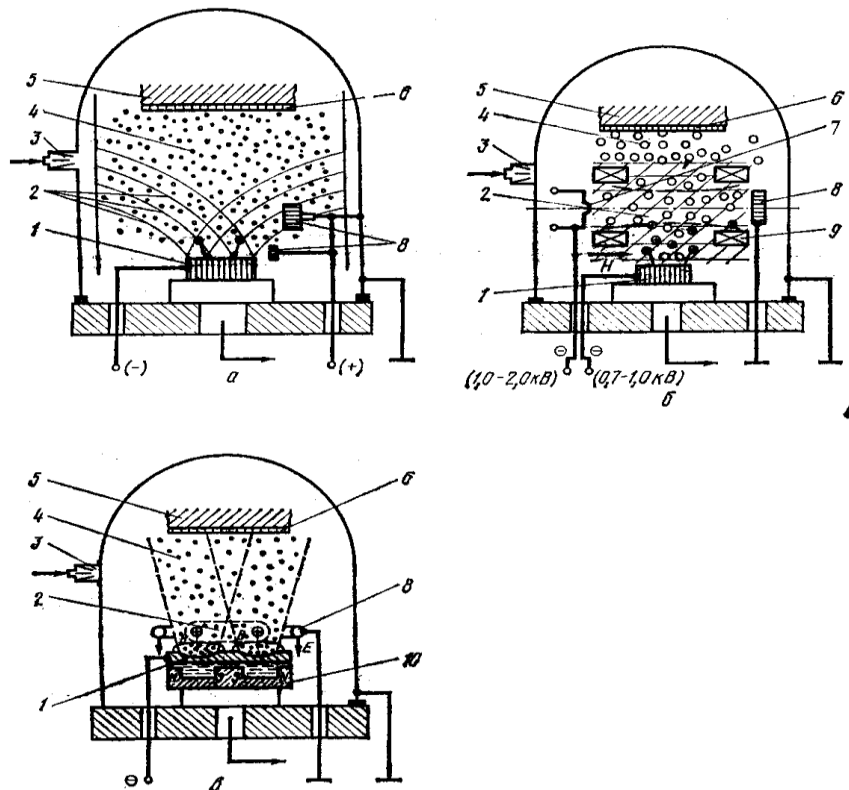


Рисунок 3.9 - Схеми напилення покриттів іонно-плазмовим розпиленням: а – діодна схема; б – тріодна схема; в – магнетронна схема; 1 – матеріал, що розпилюється (катод); 2 - тліючий розряд; 3 - натікач; 4 - потік розпилених

частинок; 5 – деталь, що напилюється; 6 - покриття; 7 - гарячий катод; 8 - анод; 9 - магнітна катушка; 10 - постійні магніти

3.4.1.1 Діодна схема іонно-плазмового розпилення

Найпростіша схема цього способу - діодна, складається з двох електродів (катод і анод), розташованих на відстані декількох сантиметрів один від одного і розміщених у вакуумній камері (див. рис. 3.9а). Катод ізольований і з'єднаний з негативним полюсом джерела живлення високої напруги. Анод разом з камерою знаходиться під потенціалом землі. Напруга джерела живлення 5-10 кВ. Між електродами в газі (зазвичай аргон) при тиску $P=1,0-10$ Па підпалюється тліючий розряд. Безперервний потік електронів, що рухаються до анода, бомбардує і іонізує молекули газу. Створені при цьому позитивно заряджені іони прискорюються у напрямі катода і розпиляють його поверхню. Розпилені частинки осідають усередині системи, у тому числі і на основу. Густина іонного струму низька і не перевищує $0,1-5$ mA/cm^2 .

Швидкість розпилення залежить від кількості бомбардуючих іонів. Діодна схема, що заснована на використанні тліючого розряду, внаслідок малої ефективності іонізації характеризується низькою швидкістю розпилення. Вторинні електрони бомбардують поверхню виробу і сприяють її перегріву.

Способи підвищення ефективності іонізації засновані на збільшенні часу знаходження електронів в міжелектродному проміжку і за рахунок використання низьковольтних електричних розрядів.

3.4.1.2 Тріодна схема іонно-плазмового розпилення

Прагнення підвищити ступінь іонізації робочого газу в тліючому розряді і тим самим збільшити кількість іонів, які бомбардують поверхню мішені, привело до створення триелектродної схеми процесу (див. рис. 3.9 б). Гарячий катод 7 є додатковим джерелом електронів. Для збудження розряду між гарячим катодом і анодом 8 прикладається висока напруга (1-2 кВ). Більш ефективна іонізація газу досягається за рахунок додання електронам складної траєкторії руху. Для цього в схему введена магнітна катушка 9. Магнітне поле, що впливає на тліючий розряд, змінює головним чином характер руху електронів. На важкі іони магнітне поле впливає слабо. В основному застосовують магнітне поле, паралельне електричному полю в темному катодному просторі. Під дією магнітного поля електрони скоюють складніші рухи навкруги магнітних ліній, рухаючись, наприклад, по спіралі. Зростає

ефективна довжина шляху електронів і, як наслідок, збільшується ступінь іонізації робочого газу.

Допоміжний катод, анод і катушка складають генератор плазми, незалежний від матеріалу, що розпилюється, і напилюваних деталей. Виріб, на який наноситься покриття, розташовується поблизу плазми або занурений в ній. Напруга, що подається на матеріал, який розпилюється (катод), не впливає на розряд, що створює плазму. Це дозволяє регулювати прискорюючу напругу, не вдаючись до високих його значень.

На матеріал, що розпилюється, (холодний катод), подається негативний потенціал ($U=0,7-1,0$ кВ). Створюються умови для прискорення іонів з області гарячого катода у напрямі матеріалу мішені. На анод подається позитивний зсув відносно виробу, що напилюється. Це запобігає перенесенню електронів до поверхні, що напилюється, і відповідно, зменшує небезпеку її перегріву. Процес ведуть при більш низькому тиску робочого газу ($P=10^{-1}$ Па і нижче).

Продуктивність розпилення в порівнянні з діодною схемою зростає у декілька разів.

3.4.1.3 Магнетронна схема іонно-плазмового розпилення

Подальше підвищення густини іонного потоку, а, отже, і швидкості розпилення забезпечують магнетронні системи (див. рис. 3.9 в). Під матеріалом мішені (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. Електрони, що емітуються катодом, під дією схрещених полів рухаються по циклоїдних траєкторіях. В площині, паралельній площині катода, утворюється область замкнутого дрейфу електронів. При русі електрони зазнають багатократні зіткнення з атомами робочого газу і іонізують їх. Електрони, що втратили велику частину своєї енергії, падають на анод. Складний, замкнутий рух електронів обумовлює зростання концентрації іонів, що бомбардують поверхню матеріалу, який розпилюється. Зона інтенсивного розпилення поверхні має вид замкнутої доріжки, розміри і форма якої визначаються геометрією магнітної системи. Ступінь використання матеріалу катода 25-40%.

В кільцеподібній зоні ступінь іонізації робочого газу наближається до 100%. Це дозволяє досягти високої густини іонного струму (до 10-20 мА/см²). Завдяки цьому швидкість розпилення наближається до електронно-променевого термічного випаровування або вибухового розпилення катода дугою низького тиску. Гранична швидкість розпилення визначається теплопровідністю матеріалу мішені, умовами його охолодження. Водяне охолодження матеріалу катода запобігає його нагріву і оплавленню.

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

3.4.2 Технологічні особливості іонно-променевого розпилення

Використання низькотемпературної плазми у вакуумі викликає ряд проблем. Плівка, що росте, піддається складній і неконтрольованій обробці, що включає бомбардування високоенергетичними іонами, збудженими атомами, електронами. Супроводжуючись поліпшенням адгезії покриттів, вона приводить до негативних ефектів - змінюються оптичні властивості покриттів і їх електричні параметри. Одночасно високоенергетичні частинки бомбардують елементи усередині камерного оснащення, спричиняючи десорбцію адсорбованих газів і розпилення їх приповерхневого шару. Це приводить до забруднення плівок і погіршення їх якості.

Для виключення цих недоліків можливо використання методу іонно-променевого розпилення. Він полягає в розпиленні поверхні матеріалу в умовах високого вакууму під дією пучка іонів певної енергії (рис. 3.10).

Між катодом і анодом збуджується електричний розряд. Магнітне поле, що створене усередині гармати, відхиляє електрони від руху під дією електричного поля, подовжуючи їх траєкторію і збільшуючи вірогідність зіткнення з молекулами газу. Система фокусування дозволяє одержувати практично моноенергетичний пучок іонів аргону. Для нейтралізації променя і попередження утворення позитивного заряду при бомбардуванні нейтральної мішені встановлюється джерело низькоенергетичних електронів.

Вказана іонна гармата використовується для очищення поверхні, травлення напівпровідників, нанесення покриттів і т.д.

Існують гармати, які на поверхні Ø 100мм при U=1000В при дистанції обробки L=100мм забезпечують потік іонів (аргону) густиною до 26 мА/см², що близька до такої для магнетронного напилення.

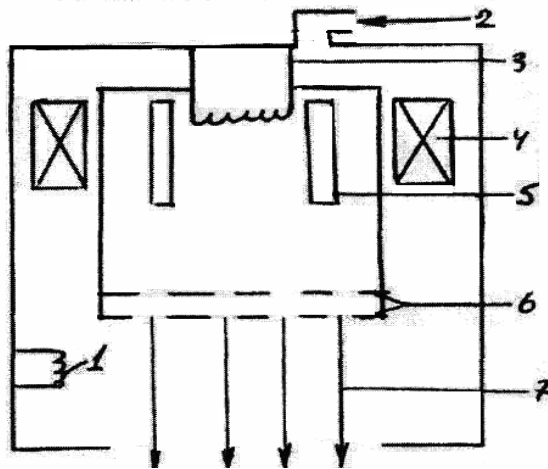


Рисунок 3.10 - Схема іонної гармати: 1 - нейтралізатор; 2 - напуск газу;
 3 - термоелектронний катод; 4 - магнітна система; 5 - анод;
 6 – прискорюючі електроди; 7 - потік іонів

4 ФІНІШНА ОБРОБКА ПОКРИТТІВ І ДІАГНОСТИКА ЇХ ЯКОСТІ

4.1 Фінішна обробка покриттів

Для забезпечення робочим поверхням необхідних експлуатаційних характеристик вироби з покриттями можуть піддаватися фінішній обробці. Її призначення - усунення дефектів покриттів (пористість, низька адгезійна і когезійна міцність і т.д.), додання деталям з покриттями необхідних геометричних розмірів.

4.1.1 Зниження пористості напилених покриттів і підвищення їх міцностних характеристик

Одним з основних недоліків покриттів, одержаних методами ГТН, є висока пористість і відносно низька міцність. Для її зменшення, а також підвищення міцності покриття піддають:

- а) термообробці;
- б) просоченню шару з термообробкою (або без неї);
- в) проплавленню або оплавленню;
- г) мехобробці (обкатка, плющення, крацювання).

Зменшенню пористості покриттів також сприяє введення склоподібної складової в порошок, який використовується для нанесення покриття. Навіть при малому вмісті склоподібної складової в порошку при плазмовому

напиленні можна досягти рівномірного розподілу її в покритті. Пористість знижується до 3%.

Дифузійний відпал ефективний для зменшення певних температурних напруг в покритті. Окрім зниження пористості покриття на межі основа-покриття утворюється перехідна дифузійна зона певного складу і структури. Це приводить до зміни структури дислокацій як на поверхні, так і в об'ємі твердого тіла. Утворюються рухомі дислокації, які є основними активними центрами, відповідальними за хемосорбцію атомів контактуючих поверхонь. Тобто створюються умови, які сприяють полегшенню зародження дислокацій в поверхневих шарах, що обумовлює збільшення адгезії покриття. Може використовуватися твердорідке спікання, що вживається, в основному, для композиційних покриттів. Рідка фаза, що утворилася, проникає в порожнини, сприяючи зниженню пористості і зростанню адгезійної міцності покриттів.

Для підвищення жаростійкості і корозійної стійкості покриттів достатньо ефективно просочення напиленого шару кремнійорганічними цементами (працездатні до 600-700°C). Для покриттів з Al_2O_3 застосовують просочення розчинами $Al(NO_3)_3$.

Найбільш часто просочення проводиться міддю, припоями, епоксидною смолою, воском. За рахунок капілярних сил матеріал проникає в несучільності покриттів. Правильно вибраний просочувальний склад і режим обробки також забезпечують заповнення більшості відкритих пор, підвищують міцнісні характеристики покриттів.

Покриття із сплавів, що самофлюсуються, наприклад, системи Ni-Cr-B-Si, Fe-Cr-Si-B, ті, що наносяться, для захисту сталей від абразивного зносу і підвищення корозійної стійкості, як правило, оплавляють з метою ліквідації пористості і підвищення термомеханічних властивостей. Під самофлюсуванням розуміють самодовільне видалення оксидів з поверхні частинок при оплавленні. Його проводять при температурах, відповідних інтервалу кристалізації сплавів даної системи у присутності рідкої і твердої фази. При нагріві до 1000-1100°C відбувається проплавлення покриття, B і Si частково перетворюються у B_2O_3 і SiO_2 . Оксиди розчиняються в склоподібних легкоплавких шлаках (шлаках системи $B_2O_3-SiO_2-Cr_2O_3$) і спливають на поверхню покриття. Оброблені таким чином покриття мають високу твердість і міцність зчеплення з основою і корозійну стійкість.

Проплавлення покриттів може проводитися:

- газовим пальником;
- плазмовим струменем;
- в печі з контрольованою атмосферою;
- ВЧ - нагрівом.

Зайве збільшення температури і часу витримки проплавленого покриття спричиняє укрупнення і огрубіння структури, що знижує його зносостійкість. Контроль за проплавленням покриття - візуальний або автоматичний (по «запітнілій» поверхні).

4.1.2 Додання виробу остаточних розмірів

При нанесенні покриттів (особливо ГТН) поверхня шару виходить достатньо грубою. Для отримання чистих поверхонь з точними розмірами покриття наносять з деяким припуском для подальшої обробки різанням. Найчастіше прагнуть наносити їх з мінімальним припуском.

При твердості матеріалу покриття менше 35 HRC обробку проводять звичайним різальним інструментом, при більшій твердості - шліфуванням. Її ведуть з мінімальним зняттям шару за один прохід.

Швидкість різання вибирають експериментально. Звичайно вона знаходиться в межах 15-100 м/хв при подачі 0,05 - 0,15 мм/об.

При шліфуванні покриттів бажано охолодження, якщо це не веде до погіршення властивостей покриття через проникнення рідини в порожнини напиленого матеріалу.

Щоб виключити утворення тріщин і викришування необхідно правильно вибрати матеріал круга і режим шліфування. Зазвичай вибирають круги з неміцною зв'язкою. Для шліфування покриттів з підвищеною твердістю (матеріали, що самофлюсуються) використовують круги із зв'язкою середньої міцності і абразивними частинками із зеленого корунду або карбіду кремнію. Швидкість шліфування 15-40 м/с, глибина 0,015-0,030 мм. Покриття з високою твердістю часто обробляють алмазними кругами. Доведення крихких оксидних покриттів часто ведуть абразивними стрічками.

4.2 Властивості напилених покриттів і методи їх випробувань

При визначенні області використання напилених покриттів необхідно мати уявлення про їх міцність, пористість, зносостійкість, жароміцність, корозійну стійкість, теплоізоляційні властивості і ряд інших характеристик.

Напилене покриття є тонким шаром на поверхні основи. Тому для

визначення його характеристик повинні бути використані відповідні методи випробувань. Порівнюючи результати різних випробувань властивостей покриттів і, особливо, на міцність зчеплення з основою, необхідно враховувати особливості методик, за якими вони були одержані. При повідомленні результатів досліджень властивостей покриттів необхідно детально викладати методику випробувань.

Методи контролю діляться на:

- активні (дослідження властивостей проводяться в процесі напилення) і пасивні (дослідження властивостей проводяться після напилення);
- руйнуючі і неруйнуючі;
- лабораторні і заводські.

4.2.1 Випробування на міцність зчеплення з основою

Міцність зчеплення напиленого покриття з основою є одним з основних критеріїв, який дозволяє визначити область вживання і експлуатаційні характеристики покриття. При ГТН, в основному, зчеплення покриття з основою є механічним. Виключення складає утворення металевих зв'язків, як це має місце на поверхні основи у разі напилення молібдену. Отже, міцність зчеплення напиленого покриття з основою залежить в значній мірі від підготовки поверхні перед напиленням.

4.2.1.1 Випробування на міцність зчеплення методом витягання штифта

Схема випробувань на міцність зчеплення покриття з основою методом витягання штифта наведена на рисунку 4.1.

Зразок для випробувань являє собою основу (1) з центральним отвором, в який по ковзаючій посадці вставляється штифт (2).

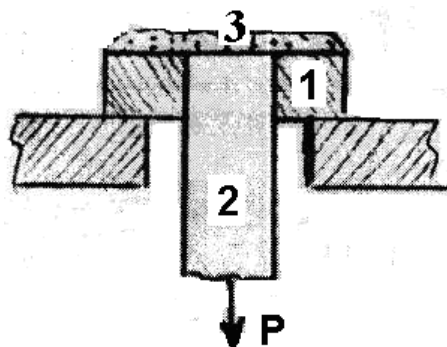


Рисунок 4.1 - Схема випробувань на міцність зчеплення покриття з основою методом витягання штифта

Штифт встановлений так, щоб поверхня основи і його торець знаходилися в одній площині. Після зборки на верхню поверхню напилюють покриття (3). При випробуванні основу 1 встановлюють на упори, штифт 2 витягають вниз. Відношення величини навантаження P_{\max} , при якому відбувся відрив штифта від покриття, до площі його напиленого торця (S) характеризує міцність зчеплення покриття з основою, тобто $\sigma_a = P_{\max}/S$. Перевага методу - його простота. Основний недолік - навіть при високій точності виготовлення ковзаючої посадки між поверхнею штифта і основою утворюється вільна ділянка покриття, в якій відбувається концентрація напруг, що приводять до руйнування покриття при більш низьких значеннях навантаження. Отже, цей метод дає занижені результати.

4.2.1.2 Випробування на міцність зчеплення на відрив з використанням клею

На заздалегідь оброблену поверхню циліндрового зразка напилюють шар покриття, що досліджується. До його поверхні приклеюють циліндровий зразок, діаметр якого дорівнює діаметру зразка з покриттям, і проводять випробування на розтягування. Міцність зчеплення розраховується як частка від ділення руйнуючого навантаження на площу торцевої поверхні.

Обмеження вживання методу:

- покриття повинні бути рівномірними по товщині по всій поверхні;
- мінімальна товщина покриття - 0,04 мм, оскільки при більш малій товщині, як правило, відбувається просочування клею до основи;
- метод застосовний тільки для покриттів, міцність зчеплення з основою у яких не перевищує міцності клею.

Як правило, експериментальні зразки мають діаметр 10-40мм. Склеювання проводять епоксидною або поліефірними смолами, плівковими клеями типу ВК-3. Зразки випробовують на розривній машині. Схема випробувань наведена на рисунку 4.2.

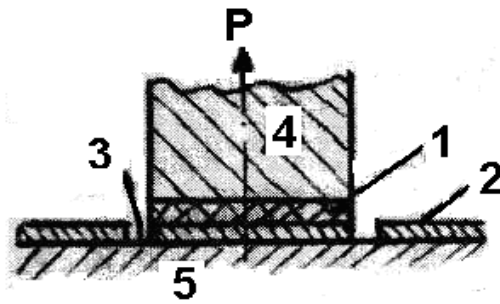


Рисунок 4.2 - Схема визначення міцності зчеплення покриття з основою з використанням клею: 1 - клей; 2 - покриття; 3 - кільцева проточка; 4 - зразок; 5 - основа

Основний недолік - при випробуванні на відрив часто не відбувається одночасного відділення покриття по всій поверхні з'єднання з основою. У багатьох випадках відділення покриття від основи починається по периметру, що приводить до появи концентрації напруг, а потім процес руйнування розповсюджується по перехідній зоні. Тому не можна вважати, що одержані дані є безперечними.

4.2.1.3 Випробування на міцність зчеплення при зсуві

До покриття (2), напиленого на основу 3, приклеюють смугу 4 (рис. 4.3).

Одержаний таким чином зразок піддають розтягуванню. Міцність покриття з основою визначається як відношення максимальної величини зусилля, при якому відбувається відділення покриття від основи в результаті зсуву, до площі, де проведено склеювання ($\sigma_a = \frac{P_{\max}}{S}$).

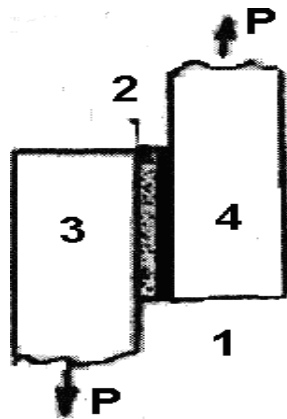


Рисунок 4.3 - Схема визначення міцності зчеплення покриття з основою при зсуві: 1 - клей; 2 - покриття; 3, 4 – зразки

При аналізі результатів слід враховувати, що одержані дані будуть дещо відрізнятися від істинних значень, оскільки при такому методі в покритті можуть діяти не тільки зусилля зсуву.

Як вже наголошувалося раніше, одержані результати залежать від методики випробувань, що застосовувалася. При нанесенні вуглецевої сталі (0,1% С) на вуглецеву сталь міцність зчеплення покриття з основою при її визначенні по штифтовій методиці склала 18,7 МПа, а при визначенні при зсуві - 49 МПа, що ще раз підтверджує необхідність обов'язково указувати методику її визначення при публікації даних.

Розглянуті вище методи діагностики міцності зчеплення покриття з основою частіше використовують в лабораторних умовах.

У багатьох випадках у виробничих умовах доцільно використовувати для встановлення міцностних характеристик напилених покриттів методики якісного її визначення. Нижче розглянуто ряд найтипівіших подібних методик.

4.2.1.4 Випробування на вигин

На рисунку 4.4 наведена схема визначення міцності покриттів випробуванням на вигин і типові розміри зразків.

Міцність зчеплення оцінюють, зіставляючи величини прогинання напилених зразків, при яких в них з'являються тріщини, з еталонними значеннями.

Оцінку міцності зчеплення можна проводити не тільки по моменту появи тріщини в покритті, але і по місцю їх появи, а також по величині площі зразка, на якій покриття відійшло від основи.

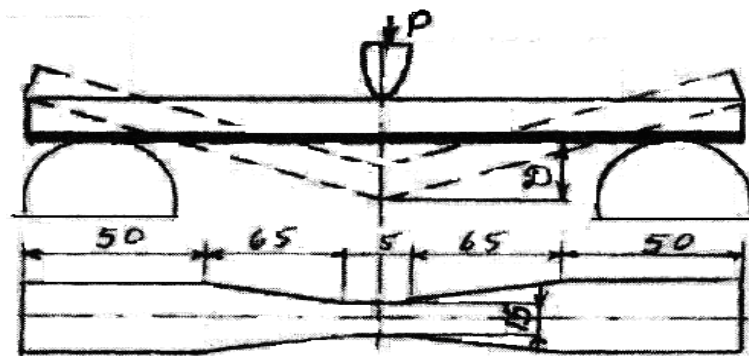


Рисунок 4.4 - Схема визначення міцності покриттів при випробуваннях на вигин: D- величина прогинання

Різновид методу - загинання на 180° на оправках різного діаметра (8, 16, 32.. мм).

4.2.1.5 Випробування циклічним ударним навантаженням

Поверхню покриття піддають багатократній дії падаючої кульки або молоточка. Оцінку проводять по характеру відшаровування покриття, а також по розвитку відшаровування покриття залежно від числа ударів.

4.2.1.6 Випробування вдавлюванням кульки

В пластину з напиленим покриттям із зворотньої сторони вдавлюють сталеву кульку. Це приводить до спучування металу і покриття. Після деформації зразка досліджують руйнування, що відбуваються в покритті (рис. 4.5).

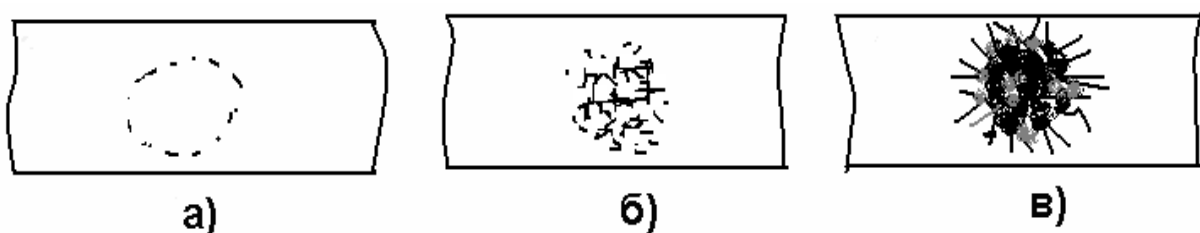


Рисунок 4.5 - Діагностика міцності покриттів вдавлюванням кульки: а - якість покриття - хороша (немає тріщин і відшаровувань); б - якість покриття – задовільна (поява окремих тріщин); в - якість покриття - незадовільна (поява мережі тріщин, сколів)

Метод застосовний для покриттів завтовшки до 0,1-0,2 мм

4.2.1.7 Нанесення сітки подряпин

В покритті гострим інструментом наносять сітку подряпин. Звичайно крок складає ~ 5 мм. Про міцність зчеплення покриття з основою судять по характеру руйнування покриття.

4.2.2 Визначення когезійної міцності покриттів

Міцність на розтягування матеріалу напиленого покриття можна визначити таким чином. Зразок - сталева трубка, зовнішній $d=5,5\text{мм}$, $l=127\text{мм}$, $h=1\text{мм}$. На торцях її потовщення з внутрішньою різкою для закріплення зразка при проведенні випробувань (рис. 4.6).

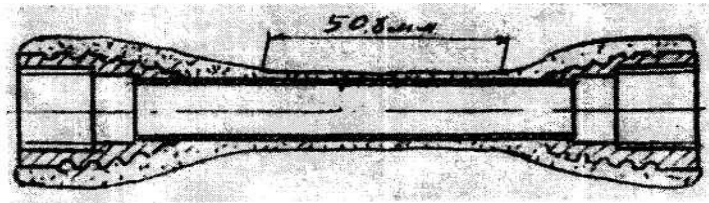


Рисунок 4.6 - Зразок для визначення когезійної міцності покриттів

На зразок, що обертається, напилують покриття завтовшки 3,2мм. Для отримання заданого розміру покриття шліфують. В центральній частині зразка роблять проточку глибиною 0,05 мм, щоб на цій ділянці відбулося руйнування при розтягуванні. Трубку видаляють і проводять випробування на міцність матеріалу покриття в поздовжньому напрямі.

Інший метод - на торець стрижня наносять шар легкоплавкого припою. На припій напилують досліджуване покриття. Потім покриття відділяють, розплавляючи припій. Одержаний шар приклеюють до торців стрижнів. Випробування на розтягування такого зразка дозволяють визначити міцність напиленого матеріалу покриття в поперечному напрямі (когезійна міцність)

$\sigma_k = \frac{P_{max}}{S}$. Подібні зразки можна випробовувати на вигин.

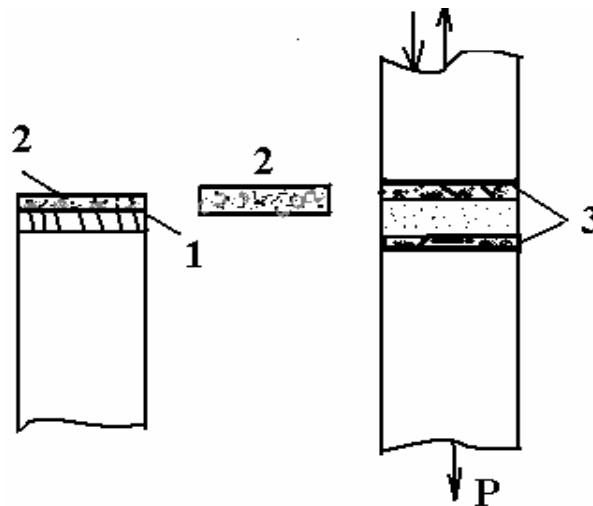


Рисунок 4.7 - Схема визначення когезійної міцності покриттів з використанням клею: 1- припій; 2 - покриття; 3 - клей

4.2.3 Визначення пористості покриттів

Покриття, напилені методами ГТН, є пористими. Наявність пор корисна, коли їх наносять на деталі, які працюють при змащуванні (захоплення і збереження мастила), і шкідлива для антикорозійних покриттів. Пористість можна розрахувати за формулою

$$\Pi = (1 - P_0/P) \cdot 100,$$

де Π - пористість %; P_0 - щільність покриття; P - теоретична щільність.

4.2.3.1 Визначення загальної пористості методом гідростатичного зважування

Напилене покриття відділяють від основи, просушують, покривають тонким шаром вазеліну (парафіну) і зважують на повітрі. Зразок підвішується на металевий дріт і зважується у воді. Пористість розраховують за наведеним нижче рівнянням:

$$\Pi = 1 - \left(\frac{P_z / \rho_z}{P - P^1 - \frac{P_c}{\rho_c} - \frac{P_v}{\rho_v} \rho_w} \right) \cdot 100,$$

де Π - загальна пористість покриття;

ρ_z - щільність матеріалу покриття;

ρ_w - щільність рідини (води);

ρ_c - щільність металевого дроту;

ρ_v - щільність вазеліну;

P_z - маса зразка на повітрі;

P_c - маса частини металевого дроту, зануреного у воду;

P_v - маса вазеліну, нанесеного на поверхні покриття;

P - сумарна маса зразка, дроту, вазеліну на повітрі;

P^1 - маса зразка, покритого вазеліном, у воді.

4.2.3.2 Вимірювання відкритої пористості на просочених зразках

Покриття відділяють від основи, виготовляють з нього зразок, визначають розміри і масу. Проводять просочення зразка рідиною (толуол, бензол і ін.), для чого його поміщають в рідину на 1 годину. Просочення під вакуумом прискорює цей процес. Рідина проникає у відкриті пори. Закриті - залишаються незаповненими. Після просочення зразок знову зважують і, знаючи його об'єм,

густину просочуючої рідини і зміну маси зразка розраховують величину відкритої пористості. Величину закритої пористості визначають як різницю між загальною і відкритою пористістю.

4.2.3.3. Визначення пористості методом прямого зважування

У циліндровому зразку виконують кільцеву виточку і визначають її розміри. Зразок зважують. В кільцеву виточку з лишком напилують покриття. Його надлишки зішліфовують, відновлюючи початкові розміри зразка. Одержану систему знову зважують. Знаючи масу покриття, щільність його матеріалу і об'єм виточки, розраховують загальну пористість покриття.

4.2.4 Газопроникність покриттів

Визначають об'єм повітря, що пройшло через зразок за певний час при фіксованому перепаді тиску на ньому. Газопроникність розраховують за формулою

$$\Gamma = \frac{V \cdot h}{S \cdot \Delta P \cdot \tau},$$

де V - кількість повітря, що пройшло через зразок; h - товщина покриття; S - площа покриття; ΔP - перепад тиску на зразку; τ - час випробувань.

4.2.5 Твердість покриття

При напиленні одного і того ж матеріалу можна одержати покриття, що мають різну твердість, яка багато в чому залежить від методу напилення. При одному і тому ж методі твердість залежить від умов напилення.

Вживані методи визначення твердості напиленого матеріалу дають значний розкид результатів, оскільки на величину одержаних при вимірюванні відбитків істотний вплив надає структура покриття.

Звичайно твердість зерен покриття вище твердості матеріалу в вихідному стані, що дозволяє одержати кращу зносостійкість.

Твердість напилених покриттів із сплавів, що самофлюсуються, може мінятися в широких діапазонах залежно від складу сплаву. Коли сплав містить добавки карбідів титану, покриття одержують більш твердим.

5 ВИКОРИСТАННЯ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

Нижче наведені деякі приклади використання напилених покриттів в різних галузях сучасної техніки.

5.1 Чорна металургія

Основні технологічні процеси металургії характеризуються отриманням і транспортуванням великих мас розплавлених металів і шлаків, а при обробці тиском - контактом профілеутворюючого устаткування з товарним металом при великих швидкостях і навантаженнях. При обслуговуванні металургійних агрегатів використовують велику кількість різноманітного механічного, енергетичного і підйомно-транспортного устаткування. Крім того, в металургійний цикл включені операції отримання металургійної сировини (агломерату, обкотишів і т.п.) і виготовлення вогнетривів.

5.1.1 Агломераційне виробництво

Одним з вузлів устаткування агломераційних фабрик, що швидко зношуються, є лопатки ексгаустерів. Використання покриття з нікелевого сплаву, що самофлюсується, завтовшки 0,5 мм дозволяє підвищити їх довговічність в 4 рази, тобто довести до 36 міс. У разі плазмового напилення покриття з твердого сплаву (типу ВК12) термін служби таких деталей досягає 15000 г (625 діб).

Плазмове нанесення нікелевого сплаву ХН80СРЗ, що самофлюсується, завтовшки близько 1 мм з подальшим оплавленням киснево-ацетиленовим пальником підвищило в 2-3 рази стійкість до абразивного зносу деталей шламових насосів аглофабрики.

5.1.2 Доменне виробництво

Основними причинами виходу з ладу повітряних фурм доменних печей є прогар від термічних ударів при контакті з рідкими продуктами плавки і абразивний знос шихтою, що опускається. Можливість вживання плазмового напилення для підвищення їх довговічності багато разів розглядалася в Україні і за кордоном. Нанесення керамічних плазмових покриттів на повітряні фурми доменних печей було запропоновано в Англії, карбідів - в Японії. Для плазмового напилення фурм на одному з вітчизняних металургійних комбінатів була використана установка «Полум'я», в якій в якості плазмоутворюючого газу застосовувались продукти згоряння пропан - бутану у повітрі. Покриття є шаром діоксиду цирконію завтовшки 0,8-1,0 мм, нанесеним по підшару з

нікелю завтовшки 0,25-0,30 мм.

Проведені роботи з плазмового напилення повітряних фурм доменних печей (підшар - із сплаву ХН80СРЗ завтовшки 1 мм, захисний шар - з оксиду алюмінію завтовшки 0,8-1,0 мм), заміні керамічних чохлаів термопар гарячого дуття металевими з покриттями з нікельалюмінієвих сплавів. При вдуванні в доменні печі пиловугільного палива різко зростає газоабразивний знос повітряних фурм. Для підвищення їх довговічності в цих умовах були проведені роботи по плазмовому напиленню нікелевого сплаву ПГ-ХН80СР4, що самофлюсується, з подальшим оплавленням. Для запобігання стікання шару при оплавленні поверх покриття із сплаву наносили діоксид цирконію завтовшки 0,08 мм. Стійкість фурм з покриттям зросла з 30 діб до 3 міс.

Дросельні заслінки доменних печей захищають плазмовими покриттями з оксиду алюмінію.

Керметні плазмові покриття використовують на шлакових фурмочках доменних печей. Їх вживання свідчить про наявність суттєвого теплоізолюючого ефекту, що припускає можливість заміни міді як матеріалу фурмочок на інші матеріали, наприклад, сталь.

5.1.3 Сталеплавильне виробництво

Ряд робіт проведений по підвищенню довговічності кисневих фурм мартенівських печей. Фірма «Аркус» (США) застосувала плазмові покриття з діоксиду цирконію завтовшки 0,5 мм при підшарі з алюмініду нікелю на зовнішній поверхні фурми і з карбідів хрому - на внутрішній. Використання керметного (оксид алюмінію + нікель) і керамічного (з оксиду алюмінію) плазмових покриттів дозволяє збільшити стійкість таких фурм до 50 плавов в порівнянні з 8 початковими.

Ковпак конвертера зазнає теплові удари, викликані бризками сталі, і значну ерозійну дію гарячих газів, що відходять, з температурою, що досягає 2000°C. Нанесення на внутрішню поверхню ковпака з тонколистової сталі комбінованого плазмового покриття, що складається з шару оксиду цирконію завтовшки 0,4 мм і шару карбиду хрому меншої товщини, збільшує термін служби такого ковпака з 3 до 7 міс.

Плазмова металізація виявилася ефективною для підвищення стійкості осьових муфт сталерозливних ковшів і при відновленні корпусів підшипників 600-тонних конвертерів. Нанесення покриття із сталі типу ХІЗ дозволило

відновити зношену поверхню при мінімальних витратах. За 12 місяців експлуатації не відзначено ніяких пошкоджень ні на одному з 12 відновлених корпусів.

Плазмовий метод використовується для нанесення покриття з механічної суміші оксиду алюмінію і алюмінію завтовшки 0,3-0,6 мм на бічну поверхню графітованих електродів діаметром 150-555 мм.

Вживання молібденового покриття на внутрішній поверхні мідних кристалізаторів УНЛЗ забезпечує їх стійкість при розливанні більше 250 тис. т сталі.

5.1.4 Прокатне і волочильне виробництво

Одним з основних напрямів вживання газотермічного напилення в умовах прокатного виробництва є підвищення працездатності валів прокатних станів. За даними фірми «Юніон Кабайд Корп.» (США) нанесення покриттів з карбідів хрому, вольфраму, титану завтовшки 25-75 мкм збільшує тривалість їх служби більш ніж на 50%.

Широке поширення в цій області набувають покриття з колмоною (нікельборкремнієвого сплаву). Відомі численні приклади використання покриттів з нікелевих сплавів, що самофлюсуються, з термообробкою на стадії оплавлення на різних вузлах прокатних станів (плунжерах гідравлічних систем, приводних валках, напрямних та ін.). Їх нанесення на валки 110x150 мм чистової кліті дозволяє збільшити термін служби при прокатці катанки діаметром 6-8 мм із швидкістю 60 м/с в 2,5-7 разів. В іншому випадку дане покриття на валках гарячої прокатки арматурних стрижнів забезпечило термін їх служби 8-9 місяців замість початкових 4 діб. Витрати на отримання покриття в 4 рази нижче вартості нового вала. Витрати на експлуатацію валів знизилися на 95%. Вживання такого покриття на проводковій арматурі збільшило її стійкість з 3 діб до 5-6 тижнів.

Позитивні результати одержані при випробуванні плазмових покриттів з нікелевого сплаву ПГ-ХН80СРЗ, що самофлюсується, на чавунних валках прокатного стану 500. Нанесення аналогічного сплаву СНГН з добавкою 15 % бориду титану підвищило зносостійкість проводок прокатних станів в 1,7-2 рази.

Одна з активно працюючих у напрямі впровадження плазмового напилення в чорну металургію фірм США «Даман Індастрі» розробила технологію керметних плазмових покриттів для відновлення самого різного

устаткування, у тому числі підшипників прокатних станів, гідравлічних циліндрів і плунжерів компресорів і ін. Витрати на відновлення значно нижче, ніж на виготовлення нового устаткування, а стійкість його після відновлення виявляється вище первинної.

5.2 Машинобудування

5.2.1 Інструментальне господарство, металообробка

Нанесення покриттів з суміші нікельхромборкремнієвого сплаву і карбиду вольфраму (1:1) забезпечило суттєве підвищення стійкості мірного інструменту. Термін служби інструменту з покриттям зростає в 20 разів в порівнянні з інструментом з легованої сталі (до 19 місяців) і складає 85% терміну служби цілком твердосплавних калібрів. В той же час вартість їх набагато нижче, інструмент більш легкий, не боїться ударів. Найбільш ефективно застосовувати це покриття на вставних, площинних і різьбових калібрах при діаметрі більше 8 мм.

Вживання газотермічного покриття з молібдену дозволяє збільшити термін служби направляючих металообробних верстатів. Напилення карбиду вольфраму (завтовшки 0,7 мм) на затискні губки підвищує їх стійкість не менше, ніж на 30%.

Покриття з оксиду алюмінію забезпечують високу зносостійкість шпинделів свердлильних верстатів, державок фрез і інших деталей металообробних верстатів.

Стійкість упорних центрів, зміцнених методом напилення, підвищується в 5-7 разів у порівнянні з загартованими із сталі У10.

Стійкість пуансона, що використовується для штампування фланців, встановлюваних у вузлах осей коліс автомобілів, не перевищувала 200-300 заготовок. Нанесення на пуансон молібденового покриття дозволило збільшити кількість заготовок до 30000-40000 шт.

Для зміцнення штампів гарячої деформації застосовується плазмова металізація нікельхромборкремнієвими сплавами. Працездатність штампів визначається опорністю покриття і основи температурно-силовим діям при штампуванні. Ефективність металізації порошками ПГ-ХН80СР3 і ПГ-ХН80СР4 зростає у разі зміцнення штампів, що працюють при плавному навантаженні. Зокрема, працездатність інструменту діаметром 570-670 мм для поперечно-клинового вальцювання, експлуатованого в умовах зносу

стиранням, питомого тиску 250-350 МПа і розігрівання робочої поверхні до 600-630°C, після зміцнення сплавом ПГ-ХН80СРЗ підвищується в 2-3 рази в порівнянні зі сталлю 5ХНМ.

Стійкість штампів для гарячого штампування деталей з титану після нанесення покриттів із сплавів СНГН підвищується в 20 разів.

5.2.2 Текстильне машинобудування

Одним з найраціональніших способів підвищення надійності і довговічності деталей текстильних машин є газотермічне напилення керамічних покриттів.

Випробувано плазмове напилення покриття з $Al_2O_3 + 3\% TiO_2$ (мас.) на деталі снувальної машини, прядильні і відхиляючі диски і конуси натягнення різної конструкції і розмірів. При цьому покриття наносять на алюмінієві деталі текстильних машин, що має на меті заміну звичайно вживаних конструкційних матеріалів (сталі, чавуни) або суцільнокерамічних виробів. Це дозволило понизити масу деталей, поліпшити їх динамічні характеристики, збільшити швидкість обертання на 8-20%. Заміна суцільнокерамічних деталей на алюмінієві з керамічним покриттям дозволяє зменшити вартість устаткування на 62-66 %.

5.2.3 Хімічне машинобудування

Для захисту деталей нафтохімічних реакторів, що працюють в умовах контакту з полум'ям, застосовують пакетні плазмові покриття, що складаються з чотирьох шарів і більш. Як підшар товщиною до 100 мкм застосовують покриття з нікелевого сплаву, монель-металу або мідьцинкового сплаву, що самофлюсується. Поверх підшару наносять шари завтовшки 150-200 мкм, що складаються з сумішей сплаву, який застосовується для підшару, чистого металу (наприклад, хрому) і кераміки (наприклад, оксиди магнію, алюмінію, цирконію і т.п.). По мірі переходу до верхніх шарів частка металевої складової зменшується.

Для захисту димарів і газовідвідних стволів з вуглецевої сталі від корозії в атмосфері SO_2 при температурі 100-150°C наносили плазмове покриття із сплавів АМГ-6 і просочували його кремнійорганічними лаками і смолами. Випробувані: ЕКФФ, Э-4100, ЕП-0010, Ф-10, УР-19, лак-этиноль, ЕД-5. Кращі результати дало просочення ЕКФФ, Э-4100, УР-19.

На поршнях високого тиску в нафтохімічній промисловості застосовують

покриття на основі карбиду вольфраму (товщина - 250 мкм, шорсткість Ra=0,1... ..0,2 мкм).

5.3 Інші області вживання напилених покриттів

Для підвищення опору корозійно-механічному зносу робочих органів машин по приготуванню і внесенню в ґрунт добрив використовували плазмове напилення нікелевих сплавів (ПГ-ХН80СР4 і СНГН), що самофлюсуються, з подальшим оплавленням газополуменевим пальником. Швидкість зношування покриттів при стиранні зі швидкістю 1 м/с у фосфоритній муці вогкістю 9 % і в сульфаті амонію вогкістю 4 % в 15-20 разів нижче, ніж сталі 45.

Деталі гідроприводу автонавантажувача зміцнюють плазмовим напиленням сплаву з високим вмістом молібдену.

Напилення міді, бронзи і інших мідних сплавів замість виготовлення нової деталі з подібного матеріалу дає економію кольорових металів. Ефективне виготовлення таким шляхом кришок клапанів, валів машин для виробництва паперу.

Характерним останнім часом є звернення до методу напилення фахівців з області медицини. Досліджена можливість використання нержавіючої сталі з плазмовим покриттям з оксиду алюмінію як матеріал для зубних протезів. Нанесення плазмовим методом двошарового покриття з композиційного порошку нікель-алюмінію і оксиду алюмінію (або діоксиду цирконію) на поверхню металевої коронки дозволяє значно підвищити міцність напилюваного облицювального шару з фарфору. Вартість виготовлення фарфорових коронок за даною технологією виявляється більш низькою.

Пористі плазмові покриття з суміші титану і діоксиду титану на титанових стрижнях, що одержуються в результаті напилення порошку гідриду титану, використовують в ортопедії при пересадках і відновних операціях з метою підвищення міцності зрощення кісток.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корас В.М. Технологія та обладнання для напилення: Навч. посібник. – К.: НМЦ ВО, 2000. – 152 с.
2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов / Под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
3. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – К.: Наукова думка, 1983. – 378 с.
4. Костержицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия.- М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
5. Борисов Ю.С., Борисова Л.П. Плазменные порошковые покрытия. – К.: Техніка, 1986. – 223 с.

Навчальне видання

Рожков Олександр Дмитрович

ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Частина II

Навчальний посібник

Тем. план 2008, поз. 280

Редактор О.І. Лук'янець

Підписано до друку 26.08.08. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. 2,23. Умов. друк. арк. 2,20. Тираж 100 пр. Замовлення №

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

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

