

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут»

«Інженерія поверхні. Технології інженерії поверхні»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ ДЛЯ СТУДЕНТІВ
СПЕЦІАЛЬНОСТІ
«ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ І
КОНСТРУКЦІЙ»

Затверджено методичною радою ЗФ, НТУУ «КПІ»

Київ – 2012

Інженерія поверхні. Технології інженерії поверхні. Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» / Укл. В. М. Пащенко, – К.:НТУУ «КПІ», 2012 р. – 28 с. укр.

Навчальне видання.

«Інженерія поверхні. Технології інженерії поверхні»

Методичні вказівки
до практичних занять
для студентів спеціальності
«Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій»

УКЛАДАЧ:

Пащенко Валерій Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний редактор:

В. В. Квасницький,
доктор технічних наук, професор

Рецензент:

Р. М. Рижов,
доктор технічних наук, професор

ЗМІСТ

Практичне заняття № 1

Методологія вибору матеріалу покриття 4

Практичне заняття № 2

Методологія вибору методу нанесення та конструкції покриття11

Практичне заняття № 3

Передтехнологічна підготовка матеріалів основи та покриття18

Практичне заняття № 4

Методологія відпрацювання технології нанесення покриття26

Методологія вибору матеріалу покриття

Мета: Засвоєння методик вибору матеріалу покриття з урахуванням його сумісності з матеріалом основи, необхідної товщини покриття, конфігурації деталі, технологічних можливостей методу нанесення покриття. Розрахунок потрібної товщини покриття під час розробки технологічних процесів відновлення спрацьованих деталей та зміцнення нових

Хімічний склад матеріалу функціональних покриттів. Для напилення покриття визначеного функціонального призначення можуть бути використані матеріали різних груп (метали, сполуки, сплави, оксиди, карбіди, нітриди, полімерні матеріали, механічні суміші матеріалів та ін.). Використання при формуванні покриття матеріалу, що складається з кількох компонентів дозволяє отримувати складні за хімічним та фазовим складом структури, які переводять покриття до розряду *композиційних*.

При виборі складу покриття, поряд із експлуатаційними вимогами потрібно враховувати сумісність його з матеріалом основи та економічні показники застосування матеріалу: його собівартість, коефіцієнт використання тощо.

Під сумісністю розуміємо принципову можливість адгезійної взаємодії матеріалів покриття і матеріалу виробу. Крім того, у сумісних покриттів фізико-хімічні процеси на межі розділу з основою в процесі експлуатації не ведуть до порушення стабільності вихідного стану композиції. Наприклад, виключається утворення гальванічних пар, крихких фаз та ін. Питання сумісності особливо важливі при створенні захисних покриттів і мають меншу значущість при створенні інших типів покриттів, наприклад, декоративних.

При виборі матеріалу покриття, *стійкого до спрацьовування*, необхідно враховувати характер взаємодії пари тертя. При всіх сполученнях матеріалів необхідно прагнути до вибору матеріалу покриття з мінімальним коефіцієнтом тертя.

Для напилення покриттів, стійких до спрацьовування, придатні матеріали всіх згаданих вище груп. Покриття повинні мати високу міцність зчеплення з основою і міцність матеріалу покриття (до (100 – 250) МПа). Вимоги до пористості неоднозначні – покриття на інструменті, наприклад, повинні мати мінімальну пористість, а покриття, які працюють в умовах змащування (поршневі кільця, гільзи циліндрів та ін.), можуть мати значну пористість, що сягає (10 – 15) %.

У групі чистих металів часто використовується молібден та хром; серед сплавів – прості системи Fe-C і складні системи Ni-Cr-B-Si-C та ін.

На зношування добре працюють покриття, які містять тверді частинки та пластичну матрицю. Слабкі зв'язки між окремими частинками покриття ведуть до їх викришування.

Тому створення розвиненого металевого каркасу в покритті за рахунок введення пластичного металевого компонента, підвищує опір зношуванню. Вміст пластичної фази може сягати (30 – 40) % (об'ємних).

Із матеріалів всіх груп формуються також *корозієстійкі та жаростійкі* покриття. Основним принципом вибору в цьому випадку є мінімізація негативного впливу взаємодії з агресивним середовищем, що досягається підбиранням відповідного матеріалу покриття з урахуванням фізико-хімічних властивостей матеріалу основи та складу та параметрів навколишнього агресивного середовища.

Покриття повинні мати мінімальну пористість, особливо крізну та відкриту, тобто створювати ефективний бар'єр на шляху дифузії атомів газового середовища до основи і дифузії атомів основи через покриття у зворотному напрямку. Матеріал покриття повинен мати низьку пружність пари при робочих температурах, слабо взаємодіяти з основою і навколишнім середовищем. Покриття повинне бути механічно сумісним з основою і мати добре зчеплення з нею, тривало працювати без відшарування і руйнування. Додаткові вимоги до матеріалу жаростійкого покриття і особливо його конструкції висуваються за необхідності їх роботи в умовах багатократних різких змін температури. У цьому випадку необхідне узгодження КТР матеріалів основи та покриття.

Як жаростійкі матеріали для функціональних покриттів широко застосовуються сплави Ni, Co, Fe із Cr. Вони мають підвищений опір окисленню при високих температурах через утворення Cr_2O_3 . Оптимальним вважається вміст (20 – 25) % хрому. За цих умов спостерігається мінімальна швидкість окислення. Зазначені матеріали стійкі до 1050 °C. У випадку перевищення вказаної температури спостерігається окиснення Cr_2O_3 до CrO_3 . Введення до сплаву (2 – 6) % алюмінію призводить до наступного утворення при температурі (1000 – 1200) °C оксиду алюмінію Al_2O_3 . Робоча температура покриття систем Ni-Cr-Al, Co-Cr-Al, Fe-Cr-Al підвищується до (1150 – 1200) °C. Однак покриття згаданих систем мають низьку термостійкість, бо захисна плівка Al_2O_3 руйнується під час циклічної зміни температур через різницю КТР матеріалів покриття та основи.

Збільшення термостійкості можливе за умови додавання до сплавів систем Ni-Cr-Al, Co-Cr-Al, Fe-Cr-Al ітрію або рідкісноземельних матеріалів (РЗМ) у кількості (0,1 – 0,5) %. Y_2O_3 та $YAlO_3$, які утворюються біля поверхні є центрами росту захисного дрібнозернистого шару окалини, яка міцно тримається на основі.

Знайшли використання як жаростійкі матеріали інтерметалідні сполуки: алюмініди, силіциди, бериліди. Їх жаростійкість визначається головним чином утворенням за умови високих температурах стабільних оксидних плівок Al_2O_3 , SiO_2 , BeO , $TiAl$ – до 1000 °C. Додавання ніобію, танталу, срібла, кремнію збільшує стійкість $TiAl$ до окислення. $NiAl$ – (1100 – 1200) °C. $NbAl_3$ – (1200 – 1300) °C.

Максимальна жаростійкість у SiC та $MoSO_2$. Основною перешкодою широкому розповсюдженню покриттів під час використання матеріалів

такого типу є крихкість і низька термостійкість внаслідок різниці у значеннях КТР матеріалів покриття і основи.

Шлях вирішення проблеми – використання підшарів і поступовий перехід від матеріалу основи до матеріалу покриття, тобто конструкторські рішення під час розробки технології.

Аналогічні проблеми виникають за умови використання чистих оксидів для утворення покриття. Особливо на стадії охолодження, внаслідок різниці температур на поверхні та внутрішніх об'ємах матеріалу, виникають температурні напруження.

Теплозахисні покриття напильються із матеріалів із низьким коефіцієнтом теплопровідності. У багатьох випадках до теплозахисних покриттів висуваються додаткові вимоги по теплостійкості. Найкращі показники, з точки зору теплопровідності, мають оксидні матеріали: ZrO_2 , Al_2O_3 та ін. Важливим фактором є низька вартість ряду промислових оксидів.

Значна різниця в значеннях КТР матеріалів основи і оксидів, а також фазові перетворення, що мають місце під час напильнення чистих оксидів (ZrO_2 , Al_2O_3), призводять у загальному випадку до виникнення додаткових внутрішніх напружень у покриттях і, відповідно, появи дефектів покриття: розтріскування та відшарування (як у процесі формування покриття, так і під час експлуатації виробу). Тому отримання теплозахисного покриття не обмежується лише правильним вибором матеріалу. Необхідне конструювання покриття, виходячи з умов його експлуатації. У випадку теплозахисних покриттів це застосування підшару для вирівнювання значень КТР матеріалів основи і покриття та підвищення міцності зчеплення покриття з основою. Як підшар найчастіше використовуються терморегулюючі сполуки металоїдного типу, наприклад, $NiAl$, Ni_3Al та ін.

Специфічні вимоги висуваються до структури теплозахисних покриттів. Наявність розвиненої пористості підвищує їх ефективність. Цей факт потрібно враховувати під час вибору режимних параметрів нанесення покриття.

Коркові покриття. Якісні параметри коркових покриттів визначаються значною мірою матеріалом основи (моделі). Найбільш поширені сталеві та керамічні моделі. Найбільш щільне покриття можна отримати використовуючи сталеву модель.

Застосування сталевих моделей забезпечує отримання робочої поверхні до ($\nabla 9 - \nabla 11$) класу чистоти, керамічних – на (3 – 4) класи нижче. Високий клас чистоти робочої поверхні досягається шляхом нанесення покриття на поліровану поверхню сталеві основи.

Напильнення на гладку поверхню моделі обумовлює цілий комплекс вимог до технологічних параметрів і режимів напильнення. Наприклад, взаємодія матеріалів покриття і моделі повинна забезпечити міцне утримання покриття на моделі в процесі формування всієї товщини покриття і дозволити видаляти модель без руйнування матеріалу покриття.

На робочій поверхні формують деталі не повинно бути відкритих пор, викрашування та інших дефектів. Напилений матеріал на межі з поверхнею моделі повинен бути максимально щільним.

Матеріали для отримання формують деталей умовно можна поділити на дві групи:

- матеріали для нанесення робочого шару;
- матеріали для нанесення конструкційного шару.

До кожній із груп матеріалів висуваються свої вимоги. Так, наприклад, матеріали робочого шару повинні бути більш твердими, зносо-, жаро-, корозієстійкими, добре розплавлятися у високотемпературному струмені і формувати щільні покриття. У свою чергу, матеріали конструкційного шару повинні бути більш пластичними і легко піддаватися механічній обробці. З точки зору вартості бажано, щоб матеріали конструкційного шару були більш дешеві, бо їх витрата значно більша порівняно з матеріалами робочого шару.

Враховуючи згадані умови, для створення робочого шару можна використовувати порошкові самофлюсівні хромо-нікелеві сплави типу СНГН, ПГХН80-СР2 (СР3, СР4). Крім високої зносостійкості і твердості, ці сплави мають значну корозійну стійкість і жаростійкість. Завдяки додаванню бору і кремнію сплав набуває здатності до самофлюсування, добре змочується з поверхнею основи і має порівняно низьку температуру плавлення (980 – 1080) °С.

Для нанесення робочого і конструкційного шарів використовуються також порошки нікелю, заліза, міді та їх композиції. Залежно від складу композиції в процесі напилення можна отримувати матеріали робочого і конструкційного шарів із заданими фізико-механічними властивостями.

Вибір вихідного виду матеріалу, що застосовується для створення покриття. Для вакуумного конденсаційного напилення покриттів використовується широкий клас матеріалів, в тому числі і композиційних. Вихідний матеріал може бути у вигляді дроту, стрижня, таблеток, дисків та інших форм, які визначаються типом застосованого обладнання. Загальною вимогою є суворі відповідності потрібному хімічному складу за основними легуючими елементами; високий ступінь чистоти за домішками та сторонніми включеннями; мінімальна загазованість.

Під час використання газополуменевого та плазмового нанесення покриття найчастіше, а детонаційного – виключно, використовується дисперсні матеріали. Вони дозволяють досягати максимальної продуктивності, не мають обмежень за хімічним складом, забезпечують достатньо прогнозовану морфологію отриманого покриття. Серійно випускаються однокомпонентні та композиційні (багатокомпонентні) порошкові матеріали. Можливо використання механічних сумішей порошкових матеріалів.

Рівномірне подавання дисперсних матеріалів (особливо складної форми і дрібнодисперсних) у зону їх обробки досить складна технічна задача. До того ж, вартість таких матеріалів порівняно із дротяними матеріалами того ж

хімічного складу – вища. Якщо вибраний для покриття матеріал дозволяє виготовлення дроту, використання дроту може бути найкращим варіантом вирішення проблеми. До того ж, як вже згадувалось, коефіцієнт використання енергії, як правило, вищий під час напилення дротяних матеріалів порівняно з напиленням дисперсних матеріалів. Сучасною тенденцією розвитку методів ГТНП є використання для напилення композиційних покриттів порошкових дротів із металевою і органічною оболонкою.

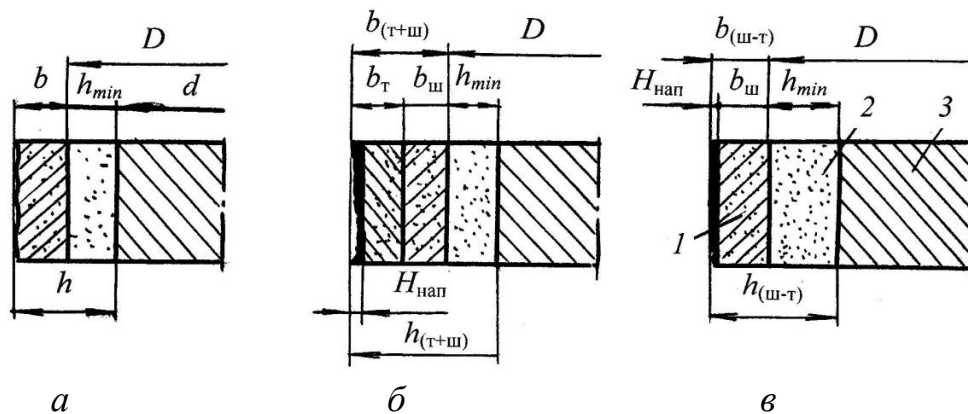
Електродуговий метод використовує виключно суцільний дротяний матеріал або порошковий дріт із металевою оболонкою.

Використання стрижнів на сьогоднішній час обмежено, що пов'язано з багатьма причинами і, не в останню чергу, із складністю їх безперервного рівномірного подавання у зону розпилення.

Визначення товщини покриття. Важливим етапом процесу конструювання покриття є визначення його товщини.

Товщина напиленого газотермічного покриття на деталях, у яких зміцнюється поверхня або відновлюються втрачені розміри, повинна передбачати припуск на наступну обробку (токарну, фрезерну, шліфувальну).

Методика розрахунку товщини покриття з урахуванням припусків на обробку ілюструється рис. 1.1.



a – припуск на обробку (загальний випадок); *б* – токарна (фрезерна) і шліфувальна обробка; *в* – шліфування без попередньої токарної (фрезерної) обробки; 1 – припуск на обробку; 2 – напилений шар покриття, який залишився після обробки; 3 – основний метал деталі

Рисунок 1.1 – Схеми до розрахунку товщини покриття з урахуванням припусків на обробку

Товщина покриття, що нарощується на зовнішні поверхні, може визначатися за формулою:

$$h = \frac{D - d}{2} + b, \quad (1.1)$$

де D – номінальний діаметр деталі; d – діаметр деталі після підготовки до напилення; b – припуск на обробку після напилення.

Для забезпечення нормальної експлуатації виробу і необхідної міцності покриття, а також виключення деформації основи з покриттям, що перевищує допустиму, товщина покриття після кінцевої обробки не повинна бути менше деякої визначеної величини.

Мінімальна товщина покриття, що працює в умовах спрацьовування, збільшується на деяку величину $h_{\text{пс}}$, пропорційну потрібному ресурсу роботи виробу.

В більшості випадків залежність між шляхом тертя L і величиною спрацьовування є лінійною, тому в умовах спрацьовування:

$$h_{\text{пс}} = i_{\text{сп}}L, \quad (1.2)$$

де $i_{\text{сп}}$ – інтенсивність спрацьовування; L – шлях тертя.

В умовах корозійного впливу зовнішнього середовища мінімальну товщину покриття збільшують на величину, пропорційну питомому зменшенню товщини покриття внаслідок корозійного руйнування протягом його експлуатації.

У згаданому випадку потрібно також враховувати висоту нерівностей, яка буде отримана при кінцевій обробці покриття, бо процес руйнування залежить від топографії поверхні.

Аналогічно враховуються інші фізичні величини, що залежать від товщини покриття, наприклад, діелектрична міцність.

У загальному випадку мінімальна робоча товщина покриття визначається за виразом:

$$h_{\text{min}} = h_{\text{пн}} + h_{\text{пс}} + Rz_{\text{п}} + W_{\text{п}}, \quad (1.3)$$

де $h_{\text{пн}}$ – товщина покриття, що забезпечує необхідну міцність покриття і нормальну роботу виробу; $Rz_{\text{п}}$ – висота нерівностей, отриманих при кінцевому переході обробки покриття; $W_{\text{п}}$ – хвилястість поверхні виробу.

Розрахунок значення h_{min} за формулою (4.3) ускладнений, внаслідок деякої попередньої невизначеності складових правої частини формули.

Тому, враховуючи загальні міркування, попередні розрахунки та накопичений промисловістю досвід, у літературі для випадку відновлення деталей рекомендується емпірична мінімальна товщина покриття, яка залежить від діаметра деталі i , зазвичай знаходиться в межах від 0,6 до 1,0 мм (табл. 4.1.). У спеціальних випадках, можливе застосування газотермічних покриттів меншої ((30 – 50) мкм) або більшої товщини (до (5 – 6) мм).

Для токарної обробки напилених деталей покриття наноситься з припуском $b_{\text{т}}$, який залежить від діаметра деталі i , крім того, обумовлений ступенем рівномірності покриття за товщиною. Припуск $b_{\text{т}}$ заходиться у прямій залежності від висоти нерівностей напиленого покриття. Нерівності покриття визначаються методом, який був застосований, і кваліфікацією оператора-металізаторщика. Величина припуску $b_{\text{т}}$ буде також залежати від

кваліфікації токара, що обробляє деталь після нанесення покриття. Величина припуску b_T практично може знаходитися в межах (0,5 – 1,0) мм.

Припуск на шліфування у розмір після обточування $b_{ш}$ залежить від якості абразивних кругів і точності станка. Ця величина приймається в межах (0,15 – 0,20) мм.

Таким чином, загальний припуск на токарну (фрезерну) і шліфувальну обробку $b_{(T+ш)}$ може бути розрахований як сума припусків b_T та $b_{ш}$ (рис.4.3, б):

$$b_{(T+ш)} = b_T + b_{ш} . \quad (1.4)$$

Звідси мінімальна товщина покриття для наступної токарної (фрезерної) і шліфувальної обробки $h_{(T+ш)}$ можна підрахувати за формулою:

$$h_{(T+ш)} = h_{\min} + b_{(T+ш)} . \quad (1.5)$$

Загальна товщина газотермічного покриття підготовленого для шліфування без попередньої токарної (фрезерної) обробки (рис. 4.3, в) підраховується за формулою:

$$h_{(ш-T)} = h_{\min} + b_{(ш-T)} . \quad (1.6)$$

Значення припуску на шліфування $b_{(ш-T)}$ з урахуванням висоти нерівностей напиленого покриття у цьому випадку має дещо більше значення ніж $b_{ш}$ (табл. 1.1).

Завдання на самостійну роботу на практичному занятті

- Вибрати матеріал покриття з урахуванням його сумісності з матеріалом основи, необхідної товщини покриття, конфігурації деталі, технологічних можливостей методу нанесення покриття. Розрахувати потрібну товщину покриття

Вихідні дані: *Назва виробу:* диск автомобільного колеса R14

Матеріал виробу: сталь Ст.45.

Умови роботи: контакт із навколишнім середовищем із підвищеною вологістю; наступне фарбування поверхні.

Практичне заняття 2.

Методологія вибору методу нанесення та конструкції покриття

Мета: Засвоєння методології техніко-економічного аналізу вимог до деталі з покриттям і вибору за результатами цього аналізу методу нанесення покриття. Засвоєння методик вибору конструкції покриття, залежно від його функціонального призначення та технічних вимог до виробу з покриттям

Вибір методу і способу нанесення покриття доцільно проводити:

- *виходячи із вимог, що висувуються до якості покриття.*

Високу якість покриття достатньо легко досягти вакуумно-конденсаційними методами напилення. Особливо це стосується способів, де потік частинок (пари) стимульований плазмою.

Серед газотермічних методів нанесення покриття найбільш високу якість забезпечують високошвидкісні методи: детонаційний, надзвукові плазмові та газополуменеві.

Високі результати досягаються газотермічними методами напилення із захистом робочої зони, наприклад, плазмовими у динамічному вакуумі;

- *враховуючи властивості матеріалу покриття.*

Вакуумні конденсаційні методи дозволяють отримувати покриття практично любого складу.

Номенклатура покриттів, нанесених реакційними вакуумними методами, визначається речовинами, які є складовими синтезованого матеріалу покриття. Доцільним є отримання карбідних, нітридних або оксидних сполук. У таких випадках процес проходить у відповідних середовищах: атмосфері азоту, кисню тощо.

Під час використання газотермічних методів можливі ускладнення, пов'язані з нанесенням термічно нестабільних сполук. У процесі нагрівання спостерігається часткова дисоціація цих сполук або їх сублимація. Так ведуть себе багато нітридів (TiN, ZrN, AlN та ін), деякі оксиди (міді, заліза та ін) та ряд інших сполук.

Склад матеріалу покриття може суттєво змінюватися внаслідок вибіркового випаровування окремих елементів з високою пружністю пари.

Газотермічне напилення на повітрі практично завжди пов'язане з окисненням компонентів матеріалу, який напилюється. За цих умов склад покриття може суттєво відрізнятись від вихідного. Збереження вихідного складу матеріалу можливе з умови загального або місцевого захисту ділянки нагрівання та прискорення матеріалу, що утворює покриття, і самої зони формування покриття. Такий захист частково здійснюється під час використання нейтральних або інертних робочих газів (плазмові методи напилення) і додатковому захисті зони формування покриття застосуванням захисних насадок, камер тощо. Або використанням складним газових сумішей, які дозволяють змінювати окиснювально-відновний потенціал середовища через зміну співвідношення компонентів суміші, наприклад, сумішей горючих вуглеводневих газів із окиснювачем.

Альтернативним шляхом є зменшення часу перебування частинок у агресивному середовищі. Цей шлях реалізується за умови використання високошвидкісних методів газотермічного нанесення покриття (звукових або надзвукових);

- *залежно від товщини покриття.*

Суттєвий вплив на вибір методу нанесення покриття має необхідна товщина покриття. Вакуумні методи дозволяють отримувати покриття товщиною від 10^{-8} нм до кількох мікрометрів. Газотермічні методи нанесення покриття забезпечують мінімальну товщину покриття, близьку до діаметра частинок, що утворюють покриття. Вона дорівнює (10 – 100) мкм.

Максимальна товщина газотермічного покриття принципово не обмежена, але потрібно враховувати накопичення напружень у товстих покриттях, що погіршує показники якості отриманих покриттів, зокрема, міцність зчеплення покриття з основою;

- *з урахуванням досягнення максимальної продуктивності.*

За цим показником газотермічні методи нанесення покриття значно (у десятки разів) продуктивніші за вакуумно-конденсаційні методи. Продуктивність сучасних плазмових та електродугових установок сягає 50 кг/год. за металевим та (25 – 30) кг/год. за керамічним матеріалом.

Продуктивність такого ж порядку мають електродугові методи розпилення.

- *з урахуванням геометричних розмірів виробу;*

Вакуумні методи нанесення покриття мають практичні обмеження на розміри виробу, які накладаються розмірами вакуумної камери, у якій проводиться процес нанесення покриття. Сучасні вітчизняні серійні установки вакуумно-конденсаційного нанесення покриття універсального призначення мають розміри вакуумних камер у межах 500×500×500 мм.

Газотермічні методи напилення у відкритій атмосфері таких обмежень не мають. Все визначається типом та можливостями застосованого допоміжного обладнання: маніпуляторів.

- *з урахуванням економічних показників процесу.*

Важливими факторами є енергоємність процесу (коефіцієнт використання енергії КВЕ) та коефіцієнт використання матеріалу (КВМ).

Плазмові методи забезпечуються високі значення КВМ: (0,7 – 0,25) для дротяних матеріалів та (0,3 – 0,8) для порошкових. За цих умов коефіцієнт використання енергії не перевищує (0,02 – 0,18) під час дротяного напилення і (0,001 – 0,2) – порошкового.

Газополуменеві методи, маючи обмеження за температурою матеріалу, з якого формується покриття, забезпечують для своєї номенклатури матеріалів КВМ на рівні плазмового методу, однак ефективний коефіцієнт нагрівання матеріалу не перевищує (0,02 – 0,1).

Детонаційний метод забезпечує КВМ на рівні (0,3 – 0,6) і коефіцієнт ефективності використання енергії на рівні (0,1 – 0,15), з урахуванням збільшення ентальпії частинок у момент зустрічі з основою. Ефективний

ККД нагрівання порошкових частинок під час їх перенесення оцінюється сотими долями.

Електродуговий метод має найвищий енергетичний ККД, який становить (0,7 – 0,9) та достатньо високий КВМ.

Економічне співставлення методів газотермічного нанесення покриття можна виконати шляхом розрахунку витрат на нанесення 1 кг покриття. У цьому випадку за питомими витратами "на обладнання" методи можна розмістити у такому порядку: газополуменевий – електродуговий – детонаційний – плазмовий.

За питомими витратами на робочі гази вибудовується такий ряд: електродуговий – газополуменевий – плазмовий – детонаційний.

За витратами на заробітну плату з нарахуваннями: електродуговий – газополуменевий – плазмовий – детонаційний.

За витратами на електроенергію: газополуменевий – детонаційний – електродуговий - плазмовий.

Сумарні питомі витрати на технологічну операцію напилення 1 кг покриття: електродуговий – газополуменевий – плазмовий – детонаційний.

Електродуговим способом наносять покриття із алюмінію, нержавіючої сталі, ніхрому, цинку, латуні та інших металів і сплавів у вигляді дроту, вартість 1 кг яких відносно мала.

Для нанесення покриття газополуменевим способом поряд із дротяними використовуються дисперсні матеріали, головним чином самофлюсівні на нікелевій основі. Вартість таких матеріалів у (3 – 10) разів вища за згадані дротяні. Окрім того, покриття потребують додаткової обробки у вигляді оплавлення. До витрат на напилення додаються витрати на оплавлення.

Перспективним матеріалом для створення покриттів вважаються керамічні порошкові матеріали, зокрема оксиди. Їх вартість нижча за вартість дротяних матеріалів. Основним методом нанесення оксидів, внаслідок їх високої температури плавлення, є плазмовий.

Використання поряд з оксидами карбідів, нітридів, боридів, які мають значну вартість але забезпечують унікальні властивості покриттів, значно підвищують вартість 1 кг покриття. Згадані матеріали характерні для детонаційного та плазмового методів нанесення покриття – дорогі матеріали у сполученні із дорогими методами.

Якщо врахувати значну відміну методів у номенклатурі матеріалів, що використовуються для утворення покриття, та різну вартість одиниці маси матеріалу, що найбільш широко застосовуються в конкретному методі напилення, тоді зростання вартості 1 кг покриття на деталі буде відповідати такому ряду: електродуговий – плазмовий – газополуменевий – детонаційний.

Вартість 1 кг покриття, отриманого вакуумно-конденсаційними методами нанесення значно перевищує вартість 1 кг покриття, отриманого газотермічними методами. Тому використання ВКНП потрібно ретельно обґрунтовувати, спираючись на факт отримання характеристик покриттів, недосяжних під час використання альтернативних методів.

- з урахуванням екологічної безпеки процесу.

Загальновідомі шкідливі фактори, що супроводжують процеси газотермічного нанесення покриття: значний шум, випромінювання у ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах, наявність у зоні технологічного процесу значних виділень озону, оксидів азоту та вуглецю, аерозолів матеріалів, що застосовуються для нанесення покриття. Захист від них здорожує процес, потребує значних технічних та організаційних зусиль.

Вакуумно-конденсаційні методи значно безпечніші у цьому відношенні: відсутній шум, а проведення процесу у герметичній камері спрощує захист персоналу і навколишнього середовища від наявних шкідливих факторів.

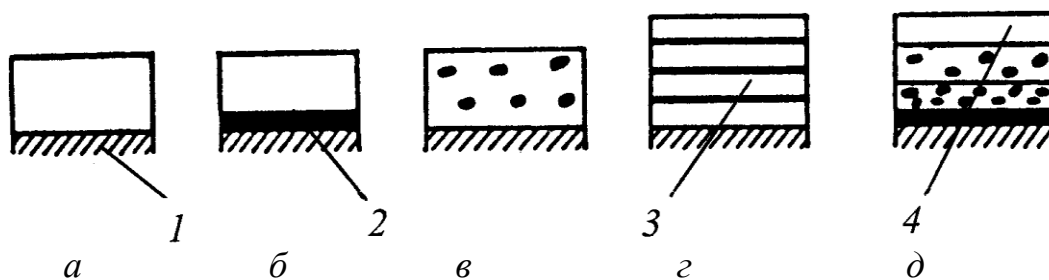
Таким чином, вибір методу нанесення покриття у конкретному випадку носить неоднозначний характер. Він лежить у площині вибору серед кількох альтернативних методів, які забезпечують приблизно однакові якісні характеристики покриття та мають близькі економічні показники.

Тому часто виникають додаткові суб'єктивні параметри, за якими обирається метод: особисті уподобання, наявність необхідного обладнання, доступність матеріалів, що використовуються у процесі, та ін.

Розробка конструкції покриття. Процес конструювання покриття містить у собі вибір складу матеріалу покриття, визначення структури системи “покриття-основа” та товщини шару (шарів) матеріалу, який створює робочу поверхню.

Досить поширеним є **одношарове покриття** (рис. 2.1, а).

Його використання доцільне у випадку створення конструкції “покриття-основа” із матеріалів з близькими значеннями коефіцієнтів термічного розширення. Необхідною умовою є також забезпечення міцності зчеплення покриття з основою. Як правило, такі умови витримуються при нанесенні металевих покриттів на металеву основу.



а – одношарове покриття; б – покриття з прошарком; в – багатокомпонентне покриття; г – багатшарове покриття; д – градієнтне покриття (з поступовим переходом від матеріалу основи до верхнього шару покриття); 1 – основа; 2 – прошарок; 3 – шар покриття; 4 – верхній шар покриття

Рисунок 2.1 – Конструкції покриття

Більш поширеним є **покриття з підшаром** (рис. 2.1, б). *Підшар газотермічного покриття* – частина газотермічного покриття, яка безпосередньо прилягає до основи і виконує функції зв'язку між основною частиною покриття і основою.

Основна частина газотермічного покриття – частина газотермічного покриття, яка розміщена над підшаром і виконує робочу функцію покриття.

Основа – поверхня основного матеріалу, на яку наноситься покриття.

Підшар має меншу, ніж основна частина покриття, товщину, яка лежить у межах (0,025 – 0,1) мм. Призначення прошару – забезпечення міцного зв'язку покриття з основою, а також узгодження коефіцієнтів термічного розширення матеріалів основної частини покриття і основи. Найчастіше, як прошарок, використовуються нікель-алюмінієві матеріали у вигляді композиційних порошків або сплавів. Під час нанесення оксидних покриттів добрі результати, як матеріал прошарку, показують нікель-титанові сплави.

У процесі конструювання теплозахисних покриттів та покриттів, стійких до спрацьовування, перспективними можуть бути **багатокомпонентні покриття** (рис. 2.1, в). Покриття такого типу можуть бути отримані під час нанесення механічних сумішей або композиційних порошків.

Композиційний порошок – порошок, кожна частинка якого складається із макрооб'ємів кількох компонентів, які відрізняються за хімічним складом, та ідентична за якісним складом всім іншим частинкам. Композиційні порошки поділяються на *плаковані* та *конгломеровані* порошки.

Плакований композиційний порошок – композиційний порошок, кожна частинка якого складається із відмінних за хімічним складом центральної частини і оболонки, що її охоплює.

Конгломерований композиційний порошок – композиційний порошок, кожна частинка якого є конгломератом макрооб'ємів кількох компонентів, скріплених між собою в'язучою речовиною або спіканням.

Обов'язковими складовими багатокомпонентних покриттів є тверда та пластичні компоненти. Пластична компонента покращує експлуатаційні властивості покриття, підвищує міцність зчеплення покриття з основою і міцність покриття, знижує його пористість. Як пластична фаза використовуються чисті метали (нікель, алюміній, кобальт, мідь, хром та ін.) або терморезистентні порошки алюмінідів, ніхром.

Тверда фаза (оксиди, карбіди, нітриди, бориди, силіциди тощо) підвищує зносостійкість або покращує захисні властивості матеріалу покриття.

У випадку експлуатації покриття в умовах механічних ударних навантажень і тепловмін, а також за необхідності сполучення багатьох різних функціональних властивостей (наприклад, високої зносостійкості і корозієстійкості), використовуються **багатошарові** покриття (рис. 2.1, в).

Багатошарове газотермічне покриття – газотермічне покриття, що складається із двох або більше шарів, які відрізняються за своїм складом (рис. 2.1, а, в).

Зовнішній шар газотермічного покриття – шар багатошарового покриття, поверхня якого стикається із зовнішнім середовищем.

Проміжний шар газотермічного покриття – будь-який шар багатошарового покриття, що розміщується між основою або підшаром і зовнішнім шаром.

Товщина шарів покриття залежить від методу нанесення покриття та його функціонального призначення і визначається розрахунково-експериментально із урахуванням технічно мінімально можливої товщини шару покриття.

Покриття із плавним переходом від одного матеріалу до іншого в межах товщини покриття називають градієнтним покриттям.

Градієнтне покриття – багат шарове газотермічне покриття, в якому кожний проміжний шар містить кілька компонентів із градієнтом концентрації, що напрямлений від основи до зовнішнього шару (рис. 4.3, з).

Градієнтне покриття, незважаючи на деяку технічну складність його нанесення, може бути дуже перспективним за умови необхідності ретельного узгодження КТР матеріалів основи і покриття та при нанесенні покриттів, матеріал яких не сумісний із матеріалом основи.

Під час виготовлення виробів із покриттям важливою умовою отримання якісного покриття у процесі його формування, а також ефективної експлуатації виробів із покриттям (особливо в умовах циклічної зміни температури експлуатації виробів) є узгодження коефіцієнтів термічного розширення (КТР) матеріалів покриття і основи.

Теплове розширення твердих тіл характеризується коефіцієнтами термічного розширення. Відрізняють *лінійне* та *об'ємне* розширення в деякому діапазоні температур. Відповідно розглядаються коефіцієнти лінійного або об'ємного розширення. Коефіцієнт лінійного розширення характеризує відносне подовження тіла при нагріванні його на один градус:

$$\alpha_l = \frac{\Delta l}{l_0 t}, \quad (2.1)$$

де Δl – подовження тіла під час нагрівання до температури t ; l_0 – довжина тіла за умови температури 0°C .

Зв'язок коефіцієнтів об'ємного та лінійного розширення у першому наближенні має вигляд:

$$\alpha_V \approx \alpha_l. \quad (2.2)$$

Значення КТР у загальному випадку залежить від температури матеріалу. В ідеальному варіанті значення КТР матеріалу покриття повинно дорівнювати значенню КТР матеріалу основи у всьому робочому діапазоні температури експлуатації виробу:

$$\alpha_{\text{п}} = \alpha_0, \quad (2.3)$$

де $\alpha_{\text{п}}$ – КТР матеріалу покриття; α_0 – КТР матеріалу основи.

У випадку невиконання умови (2.3), наприклад, $\alpha_{\text{п}} > \alpha_0$, у процесі охолодження покриття може руйнуватися, а у випадку $\alpha_{\text{п}} < \alpha_0$ – довільно відокремлюватися від основи.

У спеціальних випадках, наприклад, під час виготовлення коркових покриттів, висуваються дещо інші вимоги до КТР матеріалів, використаних для виготовлення виробу. З метою запобігання розшаруванню робочого та конструкційного шарів, послаблення натягу в обоймі необхідно виконувати умову:

$$\alpha_p \geq \alpha_k \geq \alpha_o, \quad (2.4)$$

де α_p – КТР робочого шару покриття; α_k – КТР конструкційного шару покриття; α_o – КТР основи (обойми).

У табл. 4.1 наведені значення КТР ряду характерних матеріалів, що застосовуються у газотермічному напиленні для створення покриття і типових матеріалів, з яких виготовляються вироби (матеріал основи).

Основним способом узгодження КТР матеріалів покриття і основи є нанесення підшарів із іншого матеріалу, які підвищують міцність зчеплення покриття з основою і одночасно, деякою мірою, узгоджують КТР їх матеріалів (рис. 2.1, б).

За рахунок сполучення властивостей матеріалу матриці і наповнювача можна отримати покриття з багатокомпонентною структурою (рис. 2.1, в)

Покриття такого типу може бути отримане під час нанесення механічних сумішей матеріалів або композиційних порошків.

Попередній розрахунок КТР у цьому випадку може бути зроблений на основі існуючих модельних уявлень про фізичні характеристики багатокомпонентних матеріалів:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 + \dots + \alpha_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}; \quad A = E(1 - 2\mu)\beta / \rho, \quad (2.5)$$

де E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона; β – масова частка компонента; ρ – густина матеріалу.

Рациональним, у випадку експлуатації в умовах механічних ударних навантажень і теплосмін, може бути використання спеціальної конструкції покриття, що складається із кількох шарів матеріалу із поступовим переходом від значення КТР основи до значення КТР верхнього шару покриття (рис. 2.1, з) або градієнтних структур (рис. 2.1, д). Градієнтна структура характерна безперервним зміною складу (і властивостей) від основи до верхнього шару покриття, за рахунок окремого дозування компонентів у процесі нанесення покриття.

Завдання на самостійну роботу на практичному занятті

- Провести техніко-економічний аналіз вимог до деталі з покриттям і вибрати за результатами цього аналізу метод нанесення покриття. Вибрати конструкцію покриття.

Вихідні дані: для варіанта, наведеного у завданні до практичного заняття № 1.

Передтехнологічна підготовка матеріалів основи та покриття

Мета: Засвоєння методології передтехнологічної підготовки матеріалів та виробів до нанесення покриття. Визначення основних показників якості покриття залежно від його функціонального призначення

Підготовка матеріалу. Підготовка матеріалу містить визначення фізичних та технологічних властивостей порошкового матеріалу та, за можливістю, адаптацію їх властивостей до вимог конкретного технологічного процесу.

До основних методів визначення властивостей порошкового матеріалу відносяться:

- Визначення гранулометричного складу порошкового матеріалу. Гранулометричним складом порошку називається відносний вміст у порошковому матеріалі фракцій зерен різного розміру. Гранулометричний склад для порошкових матеріалів визначається ситовим методом за ГОСТ 18318 та мікроскопічним методом за ГОСТ 23402. Ситовий метод містить в собі операції просіювання проби порошку через набір сит, зважування окремих фракцій і розрахунок їх процентного вмісту (метод не розповсюджується на порошки з максимальним розміром частинок менше 0,05 мм).
- Визначення форми зерен порошкового матеріалу та фактора подовженості частинок. Такий аналіз встановлює морфологічний тип частинок за принципом подібності їх із формами макротіл не порошкової природи. Для визначення фактора подовженості частинок думкою зображення зерна поміщується у прямокутник мінімальної площі.

Відносні параметри прямокутника пов'язуються у рівнянні $x = a / b$, де a , b – розміри сторін прямокутника; x – фактор подовженості частинок. Крім того, за цією методикою визначаються особливості порошкових матеріалів за наявністю домішок та конгломератів.

- Визначення текучості порошку. Під текучістю порошку розуміють його здатність сипатися під дією сили тяжіння і зчеплення частинок між собою. Текучість порошку визначається у відповідності до ГОСТ 20899 для порошків, які висипаються із лійки безперервним струменем.
- Визначення кута природного відкосу порошкового матеріалу. Кут природного відкосу α є характеристикою сипкості і визначається як кут вільного нахилу вільно насипаного порошкового матеріалу до горизонтальної площини.
- Визначення вологості порошку. Вологість порошкового матеріалу визначається відношенням маси вологи до загальної маси проби

матеріалу, який досліджується. Для зменшення вологості порошкових металевих та композиційних матеріалів їх сушать у сушильній шафі при температурі (130 – 150) °С протягом (3 – 5) год. Прокалювання керамічних порошоків проводиться в електропечах при (600 – 800) °С протягом (3 – 5) год. Товщина шару засипки порошоків, які висушуються, не повинна перевищувати 20 мм. Сам процес проводиться на противнях із нержавіючої сталі за умови періодичного перемішування.

Підготовка поверхні виробу. Однією із важливіших характеристик якості покриття є міцність зчеплення з основою, високий рівень якої досягається не тільки створенням оптимальних умов напilenня, але й за рахунок відповідної підготовки поверхні (видалення забруднень і активація поверхні основи для усунення бар'єрів, що перешкоджають контакту частинок, що створюють покриття, і поверхневого шару основи).

Основні технологічні прийоми активації пов'язані з отриманням шорсткого мікрорельєфу поверхні основи, її деформуванням для створення напруженого стану і попереднім підігріванням. Найчастіше застосовується струминно-абразивна обробка (САО) – найбільш проста і економічна при підготовці поверхонь як складної, так і простої форми. Результатом САО є шорстка поверхня основи, вкрита западинами.

Для утворення міцного з'єднання площа контакту деформованої частинки з основою повинна приблизно дорівнювати площі кульового сегменту, який моделює западину (рис. 3.1).

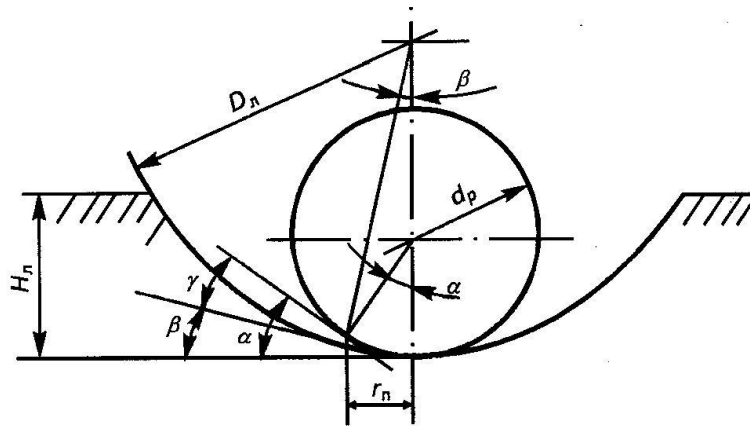


Рисунок 3.1 – Схема співудару частинки, що напильється, із западиною мікрорельєфу поверхні основи

Зі збільшенням відносної глибини лунок \bar{H}_D оптимальний діаметр абразивних частинок D_a зменшується (рис. 3.1).

Для визначення відносної глибини лунок зручно користуватися графіками їх залежності від діаметру частинок, що напильються d_p (рис. 3.2).

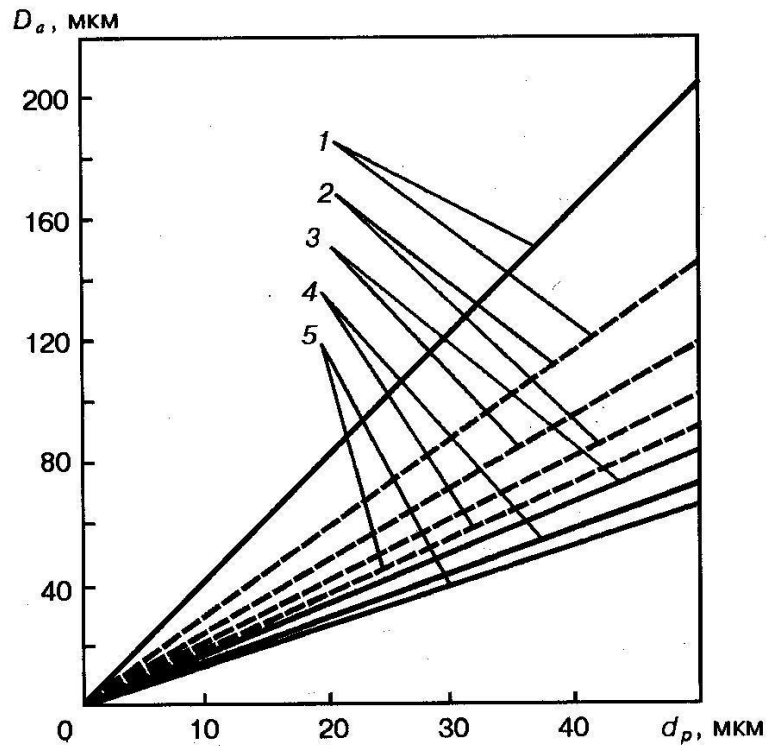


Рисунок 3.2 – Залежність оптимального D_a від d_p за умови $\bar{H}_n = 0,1$ (1); 0,2 (2); 0,3 (3); 0,4 (4); 0,5 (5); (на рис. 3.2 та 3.3 суцільна лінія для $\bar{h}_p = 0,1$; штрихова – для $\bar{h}_p = 0,2$)

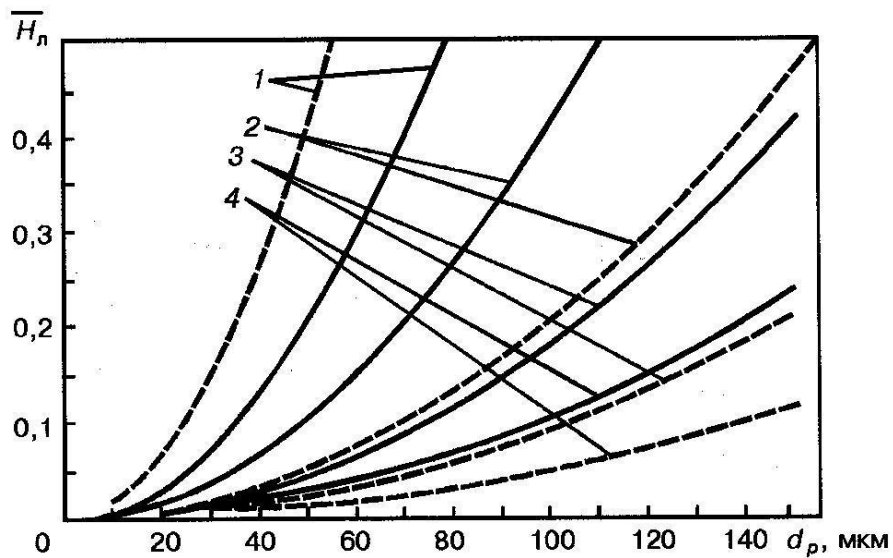


Рисунок 3.3 – Залежність оптимальної \bar{H}_n від d_p при $D_a=100$ (1); 200 (2); 300 (3); 400 (4)

Під час підготовки виробів до ГТНП після САО утворюється повністю новий мікрорельєф поверхні.

Можна оцінити ймовірність потрапляння частинок, що напилуються, у лунку:

$$P = \sum F_{\text{л}} / F, \quad (3.1)$$

де $\sum F_{\text{л}}$ – сумарна площа проєкцій лунок на обробленій поверхні; F – площа обробленої поверхні.

Відносна глибина лунок $\bar{H}_{\text{л}}$, які утворюються від удару абразивних частинок, як правило, не повинна перевищувати 0,5 ($\bar{H}_{\text{л}} = H_{\text{л}} / D_{\text{л}}^*$, де $D_{\text{л}}^*$ оптимальний діаметр лунки; $H_{\text{л}}$ – глибина лунки). Тому доцільно, для досягнення високої міцності зчеплення покриття із заданим розміром частинок, що напилуються, вибирати мінімально можливий діаметр абразивних частинок за умови $\bar{H}_{\text{л}} \rightarrow 0,5$.

Для спрощення методики визначення P можна виділити на поверхні елементарну геометричну фігуру у вигляді, наприклад, рівнобічного шестикутника, що охоплює лунку. У свою чергу, в цій лунці можна виділити трикутник, що охоплює проміжну ділянку між сусідніми лунками (рис. 4.12).

Співвідношення площ необробленої ділянки поверхні і частин трьох лунок, що входять до цього трикутника, будуть визначати величину P :

$$P = F_1 / F_2, \quad (3.2)$$

де F_1 – площа трьох секторів лунок, що входять до трикутника; F_2 – площа елементарного трикутника.

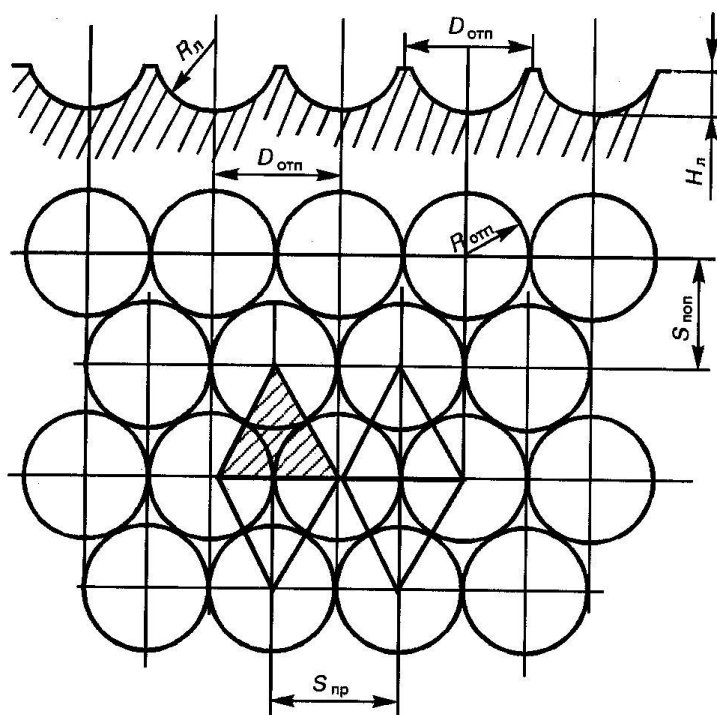


Рисунок 3.4 – Модель мікрорельєфу поверхні основи

Достатньо широко розповсюджений спосіб підготовки поверхні деталей типу “тіл обертання” шляхом нарізання “рваної” різьби. Цей спосіб потребує достатньої товщини стінки виробу і не рекомендується для використання на деталях, що працюють за умови знакозмінних навантажень, бо нарізання “рваної” різьби знижує втомну міцність металу. Його розповсюдження пояснюється простотою реалізації (можна використовувати універсальні металоріжучі верстати) і отримання розвиненого мікрорельєфу поверхні. Різьба називається “рваною”, тому що поверхня її ниток вкрита значною кількістю задилок, які утворюються в результаті вібрації різця і деталі. Чим більша шорсткість поверхні різьби, тим більша міцність зчеплення покриття з основою.

Глибина різьби залежить від товщини шару покриття, товщини стінок і діаметра виробу і коливається в межах (0,4 – 0,7) мм. Для отримання тонких покриттів потрібно наносити різьбу з малим шагом і невеликою глибиною.

Товсті шари покриття викликають значні напруження, тому у цьому разі поверхня повинна бути більш шорсткою, а глибина різьби – більшою. Шаг різьби становить біля 1 мм з невеликими коливаннями залежно від діаметра деталі (табл. 3.1). різьба нарізується за один прохід із малою швидкістю різання на всю глибину.

Різьба може бути трикутною, стрічковою, напівкруглої форми або у вигляді кільцевих канавок. Часто здійснюється наступне накатування її вершин.

Паралельні кільцеві канавки напівкруглого перерізу розміщуються на рівній відстані одна від одної. Напівкругла різьба наноситься за кілька проходів інструменту. Глибина канавок – біля (0,6 – 0,7) мм, а ширина – біля 1 мм. Кількість ниток на 10 мм довжини деталі коливається від 5 до 6.

Прокатування вершин різьби дозволяє збільшити міцність зчеплення покриття з основою, бо утворюється форма заглиблення типу “ластівчин хвіст”.

Таблиця 3.1 – Кількість ниток різьби при нанесенні рваної різьби

Діаметр деталі, мм	Кількість ниток на 10 мм	Діаметр деталі, мм	Кількість ниток на 10 мм
25	12	150	8
50 – 100	10	200	7

Можлива оптимізація кута трикутної різьби, виходячи із співвідношення між міцністю зчеплення покриття з основою на відривання $[\sigma]$ та зріз $[\tau]$:

$$\alpha = 2 \arctg K, \quad (3.3)$$

де α – кут профілю різьби; $K = \frac{[\sigma]}{[\tau]}$;

Важливим етапом є підготовка поверхні перед вакуумно-конденсаційним нанесенням покриття. Стан поверхні перед нанесенням покриття визначає якість конденсованого шару і функціональні характеристики покриття, зокрема міцність зчеплення з основою. У практичному плані найбільш важливі процеси, які визначають енергетичний стан поверхні. З точки зору технології ВКНП, важливішою характеристикою поверхні є значення поверхневої енергії, яке може бути критерієм чистоти поверхні і ступеня підготовки основи до формуванню на її поверхні покриття.

Єдиний загальний метод оцінки поверхневої енергії – напівемпіричний метод визначення поверхневого натягу твердого тіла за поверхневим натягом рідини, яка нанесена у вигляді краплі на поверхню. Крапля не розтікається по поверхні, а контактує з нею під деяким кутом. Якщо на поверхні однотипних основ нанести краплі рідини, то за зміною крайового кута змочування можна оцінити зміну стану основи і, відповідно, оцінити зміну поверхневої енергії – одного із критеріїв якості підготовки поверхні основ перед нанесенням покриття.

Для полегшення доступу атома, який адсорбується, до поверхні, необхідно видалити плівку забруднень, що є на основі, та адсорбовані плівки.

Вид очищення залежить від кількості та складу поверхневих забруднень. Відрізняють:

- грубе та тонке механічне очищення;
- грубе та тонке хімічне очищення;
- термообробку на повітрі та вакуумі;
- тонке очищення та активацію поверхні у вакуумі за допомогою різних фізичних впливів.

Механічне очищення здійснюється шляхом видалення механічних забруднень: залишків окалини і іржі, крупних скупчень мастильного матеріалу. Складається очищення із обробки поверхні металевими щітками, наждачним папером і протиранні ганчіркою. Грубе механічне очищення доповнюють, як правило, механічною обробкою поверхні, яка містить шліфування і полірування поверхонь з використанням абразивних матеріалів (порошків, паст, суспензій тощо). Як зв'язувальна речовина використовуються керамічні наповнювачі, як основа – тверді (шліфувальні круги, головки, бруски) і гнучкі (тканина, папір) матеріали. Порошки виготовляють переважно із алмаза, граніту, пемзи, піску або штучних матеріалів (карбідів кремнію, бору, титану та ін.).

Хімічне очищення поверхні – наступний після механічної обробки етап підготовки поверхні виробу. Перша стадія хімічного очищення, так зване грубе хімічне очищення, складається із видалення з поверхні помітних шарів органічних забруднень: залишків масла. Мастильних матеріалів, фарб, відбитків пальців і жирових плям. Для цього використовуються органічні розчинники – бензин, ацетон, тетрахлорид вуглецю, етиловий спирт та ін. (табл. 3.2).

Для видалення продуктів очищення з поверхні деталей, що обробляються, та забезпечення якісного стану поверхні після грубого очищення рекомендується застосовувати м'які тканини типу бязі, міткали та ін.

Знежирювання в органічних розчинниках (грубе хімічне очищення) часто недостатньо для забезпечення якісної підготовки поверхні основи перед нанесенням покриття. У цих випадках застосовується тонке хімічне очищення у розчинах неорганічних кислот та лугах, а також у парах органічних розчинників. Процес очищення проводиться, як правило, за умови підвищених температур розчину.

Очищення поверхні кислотами базується на реакції перетворення деяких оксидів та жирових плівок у сполуки, які легко розчиняються у воді. Розбавлені лужні розчини розчинюють жирові плівки, що робить їх змочуваними у воді.

Для очищення основ із боросілікатного скла застосовують полірування карбонатом кальцію, травлення у розбавленому NaOH, потім у HCl із наступним очищенням крейдою і промиванням у концентрованій HNO₃, потім послідовно у концентрованому розчині NaOH, воді і спирті. Кварцові основи промивають у CCl₄, K₂CrO₄, деіонізованій воді та CH₃COCH₃.

Таблиця 3.2 – Область застосування органічних розчинників, що використовуються для хімічного очищення поверхні

Розчинник	Склад	Призначення
Бензин із низьким октановим числом	Суміш вуглеводнів різної будови, переважно C ₄ -H ₁₂	Видалення грубих жирових плям
Бензин із високим октановим числом	Фракція бензину прямої перегонки	Повторне очищення поверхні після обробки бензином низької якості
Ізопропиловий спирт (ізопропанол)	CH ₃ -CH-OH-CH ₃	Видалення ефірних масел (замінювач етанолу, етилового спирту)
Етиловий спирт (етанол)	C ₂ H ₅ OH	Розчинення лакофарбових матеріалів
Ацетон	CH ₃ COCH ₃	Розчинення перхлорвінілових та поліакрилових лаків, ацетатів целюлози та ін.
Тетрахлоретилен (перхлоретилен)	Cl ₂ C-CCl ₂	Знежирювання поверхні металів
Тетрахлорид (перхлорметан)	CCl ₄	Очищення поверхні металів і деяких полімерів, наприклад, полістіролу (можливе травлення основи в процесі обробки)
Трихлоретилен	CHCl-CCl ₂	Знежирювання поверхні металів, видалення масел, жирів, воску

Процес очищення сталевих деталей містить електрохімічне знежирювання у лужному розчині (25 г/л NaOH, 30г/л Na₂CO₃, 25 г/л Na₃PO₄) при $T = 343$ К, промивання послідовно у гарячій і холодній воді, декапірування у 5 % розчині H₂SO₄, потім у воді, нейтралізацію залишків кислоти у 5 % розчині NaOH, промивання у воді, сушіння гарячим повітрям.

Алюмінієві деталі знежирюють у лужному розчині (6,0 г/л NaOH, 7,0 г/л Na₂CO₃, 10,5 г/л рідкого скла) при $T = 348$ К, потім проводять травлення у суміші кислот (HF: HNO₃ = 1 : 3), нейтралізації у 0,5 % -ному розчині NaOH, промивають у дистильованій воді і сушать.

Завдання на самостійну роботу на практичному занятті

- Запропонувати та обґрунтувати варіант підготовки виробу та вихідного матеріалу до процесу нанесення покриття для варіанта, наведеного у завданні до практичного заняття № 1;

Методологія відпрацювання технології нанесення покриття

Мета: Засвоєння методології складання плану проведення робіт по відпрацюванню технологічних параметрів нанесення покриття. Засвоєння методик визначення показників якості, аналіз їх можливостей і відповідності точності отриманих результатів технічним вимогам до деталі з покриттям

Ефективність технологічного процесу нанесення покриття характеризується, у першу чергу, *якістю покриття, коефіцієнтом використання матеріалу, який розпилюється, та енергії*, що використана при цьому, а також *продуктивністю* процесу.

Відома значна кількість параметрів, які залежно від функціонального призначення покриття можуть характеризувати його якість. Але, в більшості випадків, достатнім є визначення кількох основних показників якості, до яких відносяться: *товщина (або різнотовщинність) покриття, міцність зчеплення покриття з основою, міцність газотермічного покриття, пористість покриття, твердість (мікротвердість) матеріалу покриття.*

У разі застосування газотермічного нанесення покриття найпоширенішими методами вимірювання *товщини* покриття є неруйнівні методи – метод прямого вимірювання, метод вимірювання мас, відривний магнітний метод, індукційний магнітний метод, електромагнітний метод (вихрових струмів) тощо. Широко використовуються також руйнівні методи – металографічний, гравіметричний, струминний, крапельний, струминно-періодичний, струминно-об'ємний, термоелектричний.

За умови застосування вакуумно-конденсаційних методів товщину покриття у процесі його нанесення контролюють мікрозважуванням, використовують оптичні методи, що базуються на явищах поглинання, пропускання або відбиття світла, а також на явищі інтерференції. Для вимірювання товщини вже напилених плівок використовуються згадані вище руйнівні та неруйнівні методи.

Методи визначення *міцності зчеплення* покриття з основою поділяються на якісні та кількісні. Основними методами визначення *міцності зчеплення* газотермічного покриття з основою є кількісні методи: клейовий метод та метод відривання штифта. Можливо використання якісних методів: полірування, навивання, нанесення сітки подряпин, втискування, тертя, нагрівання та ін. Аналогічні методи використовуються і під час застосування ВКНП. До них додаються кількісні методи ультрацентрофугування та відшаровування, а також якісний метод дослідження кінетики нестационарного реєвипаровування атомів металу під час формування плівок у вакуумі.

Пористість всіх видів покриттів зазвичай визначається методом гідростатичного зважування. Можливе застосування також корозійних методи та методу ртутної порометрії.

Твердість покриття визначають за відомими методиками Вікерса, Роквела, Бринеля. Мікротвердість за стандартизованою методикою визначається втискуванням у визначені ділянки покриття алмазної піраміди на спеціальних приладах типу ПМТ-3.

Окрім основних, згаданих вище, параметрів якості визначальними, в окремих випадках, можуть бути газопроникність, шорсткість, блиск покриття, стійкість до спрацьовування, корозійна стійкість, електрофізичні властивості покриття та ін. Відомі методики визначення цих параметрів.

Коефіцієнт використання матеріалу в умовах газотермічного напилення – коефіцієнт, що є відношенням маси матеріалу, який був напилений, до маси матеріалу, який був використаний для створення покриття.

Ефективність використання енергії для розпилення матеріалу, визначається відношенням зміни ентальпії потоку частинок, що напилюються (ΔH), до загальних витрат енергії (W_e).

Продуктивність за матеріалом, який був напилений визначається, як маса матеріалу покриття, що нанесена за одиницю часу.

Зазначені показники якості покриття та ефективності технологічного процесу можуть бути параметрами оптимізації під час відпрацьовування технологічного процесу.

Відпрацювання технології нанесення покриття. Відпрацювання технології нанесення покриття здійснюється шляхом визначення оптимальних для вибраного обладнання, матеріалу та заданого виробу, режимних параметрів ведення процесу нанесення покриття, починаючи з операцій підготовки поверхні і закінчуючи фінішною обробкою нанесеного покриття.

Оптимальними можна вважати режимні параметри, які забезпечують максимальне (мінімальне) значення вибраного параметра якості покриття або ефективності процесу (параметра оптимізації).

Для відпрацювання технології використовуються, як правило, зразки-свідки, що виготовлені із матеріалу виробу. Форма зразків визначається методикою, яка використовується для визначення параметра оптимізації. У таких умовах підготовка поверхні зразків проводиться згідно із розробленою технологією підготовки поверхні виробу перед нанесенням покриття.

Для зменшення кількості експериментів та отримання математичної залежності параметрів якості від режимних параметрів проведення процесу можна застосовувати методи планування експерименту. У цьому разі за “нульовий рівень”, тобто вихідні значення параметрів, що визначають параметр оптимізації, можна прийняти літературні дані, отримані для аналогічних умов проведення процесу. Функцією відгуку є параметр якості покриття або параметр ефективності проведення процесу нанесення покриття.

Результатом проведення серії дослідів може бути знаходження локального екстремуму функції відгуку (параметра оптимізації) у дослідженому діапазоні зміни режимних параметрів процесу.

Існують інші шляхи відпрацювання технології нанесення покриттів. Наприклад, розробка оптимального режиму напилення порошкового газотермічного покриття може базуватися на визначенні оптимальної теплової потужності високотемпературного струменя залежно від оптимального кількісного розподілу оплавлених частинок порошку по плямі напилення та ступеня оплавленості частинок.

Практично ця задача вирішується розпиленням порошкового матеріалу на трьох попередньо вибраних режимах. Порошковий матеріал збирається у спеціальне пристосування, яке має вигляд циліндричних ємностей, діаметром від 8 до 150 мм, які вставлені одна в одну і утворюють кільцеві зони різних діаметрів. Під час випробувань ємності заповнюються дистильованою водою. Потік частинок у процесі розпилення поділяється концентричними перерізами пристосування. Тривалість процесу однакова на всіх трьох режимах. Після випаровування води здійснюється зважування частинок матеріалу, зібраних із різних зон пристосування. Проводиться металографічний аналіз форми зерен. Будуються графіки процентного розподілу кількості частинок по плямі напилення. Найкращим вважається режим, за яким густина розподілу частинок максимальна по відношенню до осі струменя. Розплавленими вважаються частинки порошку, які після розпилення мають сферичну форму по відношенню до вихідної форми частинок. Вважається, що для отримання максимальної міцності зчеплення покриття з основою, бажано розплавити всі частинки порошку.

Для проведення оптимізації технології нанесення покриття необхідно, згідно із вибраним методом оптимізації, скласти план експериментальних досліджень. Провести цикл досліджень, а результати оформити у вигляді рівняння регресії або в будь-якому іншому вигляді, зручному для користування споживачами.

Завдання на самостійну роботу на практичному занятті

- Визначити основні показники якості покриття та ефективності процесу для варіанта, наведеного у завданні до практичного заняття № 1;
- скласти план проведення робіт по відпрацюванню технологічних параметрів нанесення покриття виходячи із технічних можливостей вибраного обладнання.