

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни «Інженерія поверхні» (Частина 2)
для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітня програма «Відновлення та підвищення зносостійкості
деталей та конструкцій» усіх форм навчання

2018

Конспект лекцій з дисципліни «Інженерія поверхні» (Частина 2)
для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітня
програма «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей та
конструкцій» усіх форм навчання / Укл.: С.П. Бережний. - Запоріжжя:
ЗНТУ, 2018 – 79 с.

Укладач: С.П. Бережний, канд. техн. наук, доцент
Рецензент: Ю.М. Савонов, канд. техн. наук, доцент
Редактор: І.П. Аверченко
Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 3 від 27.10.2018

Рекомендовано до видання
НМК ІФФ
Протокол № 3 від 14.11.2018

ЗМІСТ

2.7.3 Установки для вакуумно-конденсаційного нанесення покриття	82
2.7.4 Установки для вакуумного напилення покриття з іонним бомбардуванням	88
2.7.5 Установки для ВКНП іонним розпиленням.	91
2.8 Матеріали для вакуумно конденсаційного нанесення покриття	93
2.9 Технологія вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів	99
2.9.1 Особливості підготовчих робіт	99
2.9.2 Технологія нанесення покриттів термічним випаровуванням.	102
2.9.3 Технологія нанесення покриттів іонно-плазмовим напиленням.	105
2.9.4 Особливості технологічного процесу нанесення покриттів іонним розпиленням	106
2.9.5 Особливості процесу вакуумно-конденсаційного реакційного напилення покриття	108
2.9.6 Технологія створення багатокомпонентних та мікрошарових покриттів.	110
ТЕМА 3 ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБІВ НАПЛАВЛЕННЯ ТА ПЛАКУВАННЯ. ОБРОБКА НАПЛАВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ..	118
3.1 Характеристика способів наплавлення та плакування ...	118
3.2 Підготовка поверхні до наплавлення	133
3.3 Обробка наплавлених поверхонь	134
3.3.1 Механічна обробка	134
3.3.2 Термічна обробка	138
ТЕМА 4. ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ КОНЦЕНТРОВАНИМИ ПОТОКАМИ ЕНЕРГІЇ	140
4.1 Закономірності лазерного зміцнення та легування	140

2.7.3 Установки для вакуумно-конденсаційного нанесення покриття

Установки для вакуумно-конденсаційного нанесення покриття термічним випаровуванням використовують різні типи установок, які розрізняються між собою способом нагрівання матеріалу, що випаровується. Це установки з резистивними, електронно-променевими, ВЧ-індукційними та дуговими випарниками. На рис. 2.36 показана базова модель установки УВН-2М з резистивним нагрівником. Вона призначена для відпрацювання технології напилення та серійного виробництва плівкових елементів і схем.

Установка випускається в однокорпусному виконанні з камерою ковпакового типу розміром $\varnothing 500 \times 640$ мм з об'ємом $0,12 \text{ м}^3$, яка розміщена на базовій плиті.

Вертикальний підйом камери відбувається за допомогою гідравлічного механізму. У внутрішній порожнині камери розміщені випарники, напилювані вироби, каруселі, екрани та інше оснащення.

Для напилення покриття в багатоопераційному варіанті є карусель випарників на п'ять позицій.

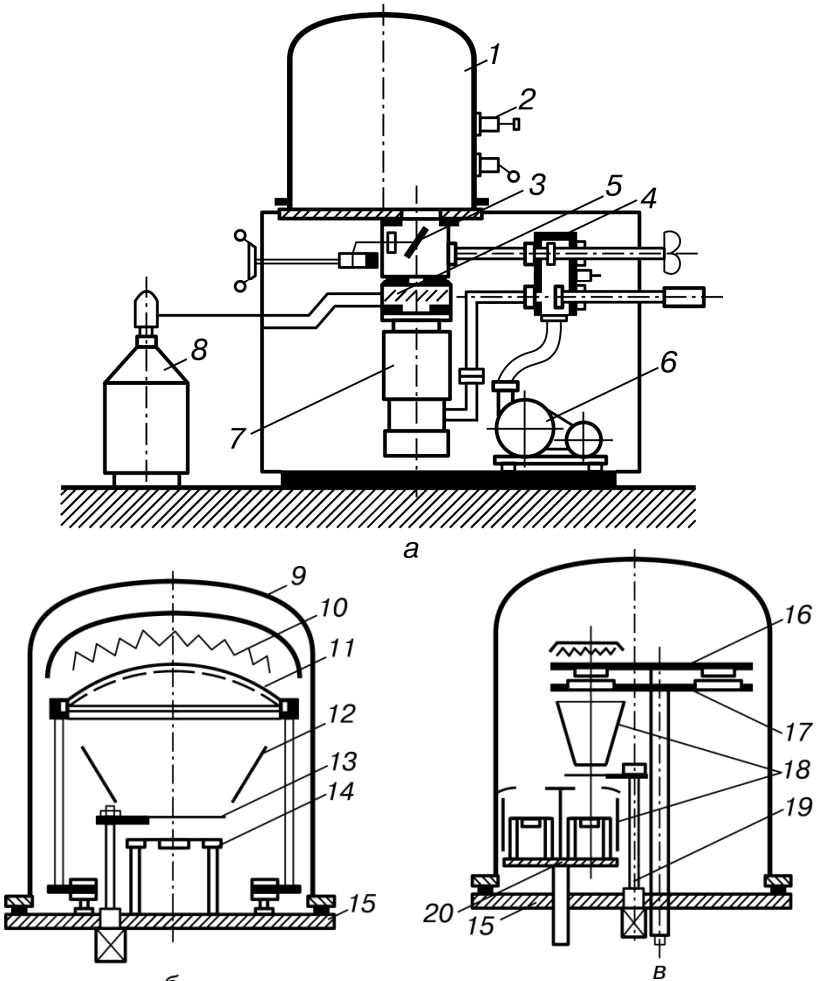
Максимальна температура напилюваного матеріалу становить 1500°C .

Джерело живлення (див. рис. 2.33) має однофазний трансформатор, в якому передбачені чотири ступені регулювання з напругою холостого ходу 4, 8, 16 та 32 В, та тиристорний регулятор напруги для плавного регулювання сили струму в резистивному випарнику від 60 до 500 А.

Потужність джерела живлення становить до 20 кВт.

Установки електронно-променевого напилення покриття є досить складними та енергоємними агрегатами. Вони розраховані на безперервну роботу протягом 10-15 год і більше. Блок-схема з переліком основних вузлів електронно-променевої установки УЭ-175М показана на рис. 2.37.

На практиці використовується багато промислових та експериментальних установок з електронно-променевими випарниками. Поширення отримали установки УЭ-137, УЭ-175, УЭ-366М, розроблені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, які досить широко використовуються для нанесення захисного покриття на лопатки газотурбінних двигунів та інших виробів.



1, 9 - камера; 2 - натікач робочого газу; 3 - високовакуумна засувка; 4 - коробка клапанів; 5 - азотна пастка; 6 - механічний вакуумний насос; 7 - дифузійний насос; 8 - посудина Дьюара; 10 - нагрівник напилюваного виробу; 11 - карусель масок на виробі; 12 - екран; 13, 19 - засувка; 14 - випарник; 15 - базова плита; 16 - карусель напилюваних виробів; 17 - карусель масок; 18 - екран; 20 - карусель випарників

Рисунок 2.36 - Схема базової установки УВН-2М (а) та технологічного оснащення в камерах одноопераційного (б) та багатоопераційного типів (в)

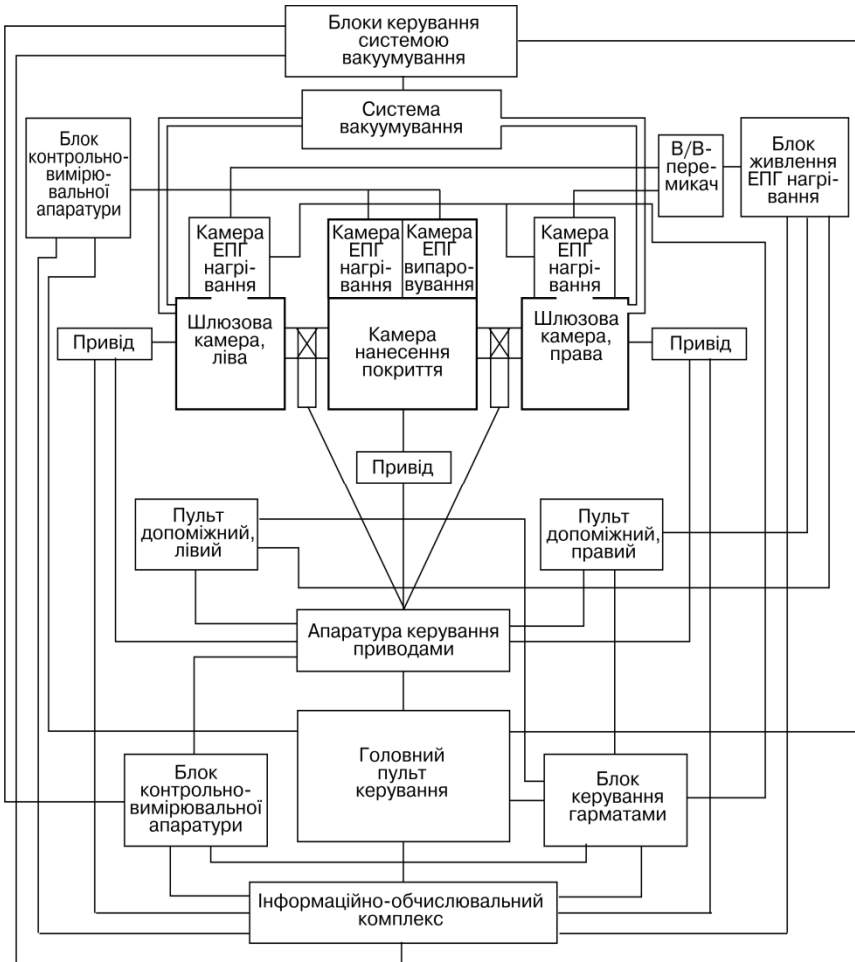


Рисунок 2.37 - Блок-схема промислової електронно-променевої установки УЭ-175М

Дослідно-промислова електронно-променева установка УЭ-366М (рис. 2.38) дає можливість отримати багатоконцентні дисперснозміцнені та багат шарові конденсати з різних матеріалів на плоскі нерухомі підкладки, а також на лопатки газотурбінних двигунів.

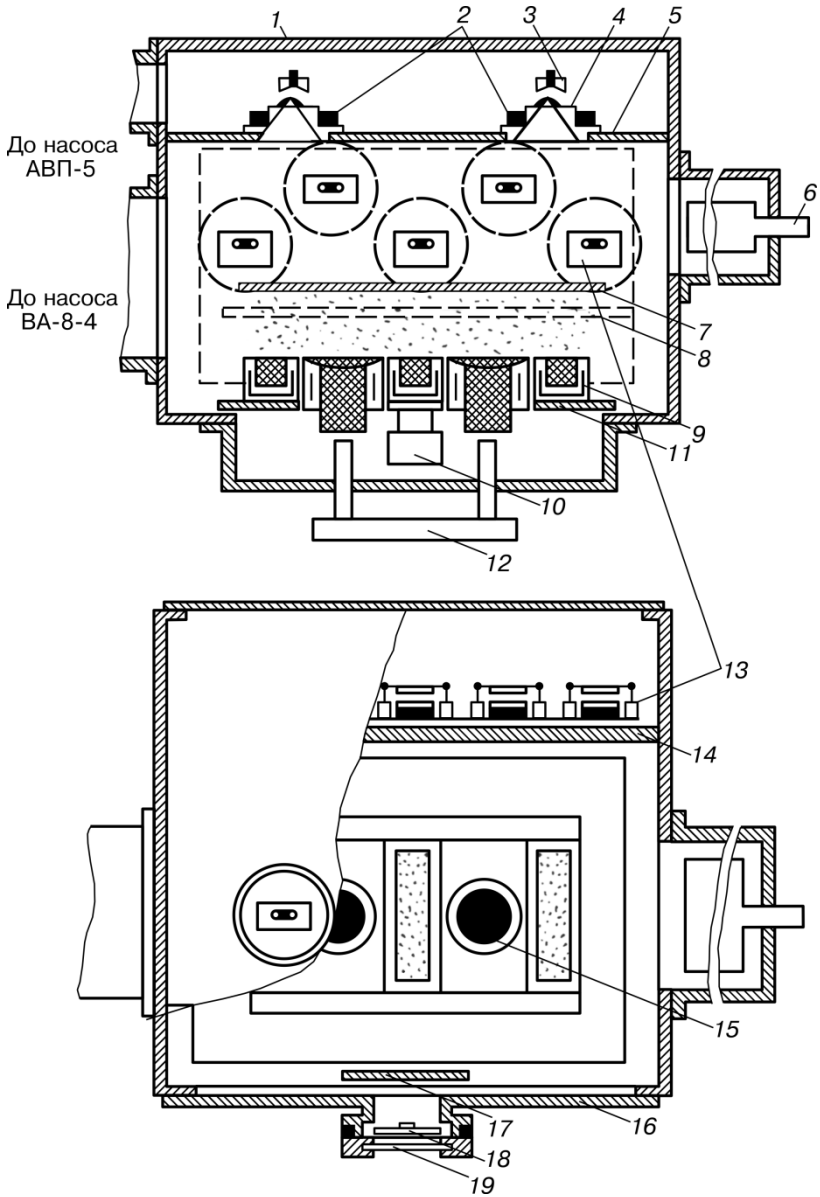


Рисунок 2.38 - Схема электронно-променевої установки УЭ-366М

Установка складається з вакуумної камери, що має сім електронних гармат, системи створення вакууму та електрообладнання.

Вакуумна водоохолоджувана камера 1 виконана у формі паралелепіпеда з основою 1200×1200 мм та висотою 1000 мм з листів низьковуглецевої сталі товщиною 12 мм. Дві електронно-променеві гармати 2, призначені для підігрівання підкладки, встановлені на водоохолоджувану горизонтальну плиту 5.

На вертикальній плиті 14 встановлено п'ять електронних гармат 13. Дві випаровують металевий сплав, а три - керамічні матеріали.

Безпосередньо над тиглями 15 та 9 на відстані 270-300 мм встановлюється основа 7, на якій відбувається конденсація матеріалів, що випаровуються. На час виведення установки на заданий режим основа захищається від напilenня засувкою 8.

П'ять мідних водоохолоджуваних тиглів - три типу "човник" 9 та два циліндричних 15 з нижньою подачею злитка матеріалу, що випаровується, - встановлені на плиту 11, яка за допомогою гвинтової пари 10, приводу 12 та роlikової системи в процесі випаровування може пересувати тиглі або здійснювати їх зворотно-поступальне переміщення за заданою програмою.

Це дає змогу розширяти можливості установки та вводити домішки, наприклад оксиди, у металеві матеріали, які випаровуються, таким чином, що характер їх зміни в матеріалах підпорядковується практично будь-якому наперед заданому закону. Вхід 6 системи водяного охолодження тиглів та рухомої плити зроблено через допоміжну камеру.

Завантаження матеріалів та обслуговування робочої камери відбувається через передні двері 16. Робочі гармати захищаються від перегрівання та запилення водоохолоджуваним екраном 4.

Спостереження за ходом процесу випаровування ведеться через оглядову систему 19, яка змонтована на передніх дверях камери. Освітлення всередині камери створюється випромінюванням світла поверхнею матеріалу, що випаровується, розігрітого до високої температури електронними потоками.

Для зниження забруднення скла оглядової системи перед ним встановлюється диск 18, що обертається під дією рухомого електромагнітного поля. Після досягнення стабільного режиму

випаровування оглядове вікно закривається заслонкою 17, яка відкривається тільки для періодичного спостереження за ходом процесу. Це дає змогу набагато підвищити термін використання оглядового скла без очищення його від конденсату.

Особливістю установки є відокремлення електронних гармат від зони випаровування за допомогою вертикальної 14 та горизонтальної 5 плит та їх роздільне вакуумування. Це поліпшує стабільність роботи електронно-променевих нагрівників.

Робочий вакуум $1,3 \cdot 10^{-2}$ – $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в камері створюється за допомогою форвакуумного насоса ВН-4Г, бустерного насоса БН-3 та двох вакуумних агрегатів ВА-8-4 і АВП5-4.

Усі електронні гармати установки УЭ-366М заживлені прискорювальною напругою 18 кВ від загального високовольтного блока, який складається із силового трансформатора та випрямляча.

Кожна гармата має свій трансформатор розжарювання катода, який керується магнітним підсилювачем. Роздільне живлення катодів електронно-променевих гармат разом із роздільним живленням електромагнітів і керування положенням променя в просторі дає змогу отримати одночасно сім незалежних електронних променів різної потужності.

Нагрівання основи до заданої температури здійснюється двома допоміжними гарматами зі стабілізаторами температури, які керуються термopарами. Рівномірність нагрівання деталі, що напильється, досягається скануванням електронних променів за заданою програмою за допомогою спеціального генераторного пристрою.

Для випаровування металевої основи мікрошаруватих матеріалів служать дві гармати. Кожна з них має автоматичний регулятор струму променя, який керується сигналом із високовольтного датчика струму.

Випаровування оксидів здійснюється за допомогою трьох гармат. Стабілізація робочого струму кожної гармати також забезпечується автоматичними регуляторами струму, які керуються датчиками струму.

Використання системи автоматичної стабілізації режиму випаровування стабілізацією струму емісії дає можливість отримати високоякісні та однорідні за складом матеріали при випаровуванні з кількох тиглів.

В установках УЭ-175 попереднє електронне нагрівання виробів проводиться в допоміжних камерах, розміщених з обох сторін від робочої камери. Передбачено автоматичну систему контролю керування технологічним процесом випаровування.

Для напилення покриття електронно-променевим випаровуванням великогабаритних деталей діаметром до 2,5 м та висотою до 2 м створені установки типу УТН.

Широке поширення для напилення виробів електронної техніки отримали установки УВН-73П-5, УВН-83-1, “Лада-5” та ін. У них використано циліндричні горизонтальні камери з пристосуванням барабанного типу для кріплення виробів, які напилюються, та вертикальні ковпакові камери з транспортувальними пристроями карусельного типу.

2.7.4 Установки для вакуумного напилення покриття з іонним бомбардуванням

Є кілька типів установок високошвидкісного розпилення дугою низького тиску. Найбільшого поширення набули установки типу “Булат” (табл. 2.1). Установки “Булат” призначені для синтезу твердих матеріалів та нанесення їх у вигляді покриття методом конденсації матеріалу, який випаровується та розпилюється у вакуумі електричною дугою, та іонним бомбардуванням різального інструмента і деталей машин та інструментального оснащення.

Випрямляч для іонного бомбардування має шість ступенів регулювання: 0,1; 0,3; 0,5; 0,8; 1,1 і 1,7 кВ та забезпечує максимальний струм у режимі іонного бомбардування, не більший, ніж 15 А.

На рис. 2.39 наведено схему установки “Булат” з одним випарником. Базовою деталлю установки є камера 1 з водяним змісподібним охолодженням. Відкачувальні насоси 5 забезпечують у камері вакуум до 10^{-2} - 10^{-3} Па. Для виморожування пари мастила передбачена азотна пастка 6. Дуговий розряд виникає між водоохолоджуванним анодом 8 та матеріалом, який розпилюється катодом 9. Для збудження дуги використовується допоміжний електрод 11.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики установки “Булат-6”

Максимальна потужність установки, кВт	до 42
Напруга живлення, В	380
Частота напруги живлення, Гц	50
Максимальна площа поверхні, що напилюється, дм ² ..	приблизно 25
Швидкість осадження покриття одним джерелом плазми на нерухому основу при номінальному режимі на відстані 50 мм від зрізу анода, мкм/год .	15-50
Напруга холостого ходу джерела живлення дугових випаровувачів, В	не менше, ніж 100
Струм дуги, А	до 150
Регулювання струму дуги, плавно, А	80-150
Напруга холостого ходу випрямляча іонного бомбардування, кВ	не менше, ніж 1,7
Кількість джерел плазми	3
Діаметр потоку плазми на виході з джерела, мм	200
Робочий тиск у камері, Па	$2,6 \cdot 10^{-3}$ - $6,5 \cdot 10^{-1}$
Час відкачування камери до тиску 1,3 Па, хв.	до 20
Час відкачування камери до тиску $2,6 \cdot 10^{-3}$ Па паромасильним вакуумним насосом, хв.	до 20
Максимальні розміри деталі, що напилюється, мм: діаметр висота	400 200
Навантаження на шпіндель поворотного пристрою, кг.	не більше, ніж 50
Тривалість робочого циклу, хв	не більше 90

Електродуговий прискорювач плазми 10 працює від силового спеціалізованого джерела постійної напруги. Для екстракції іонів із плазмового потоку та їх прискорення в напрямку до виробу, що напилюється, використовується високовольтне джерело живлення 7. Від нього на виріб 2, який напилюється, подається від'ємне зміщення напруги від десятка вольт до 2-3 кВ. Електромагнітні котушки стабілізують катодні плями на зовнішній поверхні матеріалу, що розпилюється, фокусують та прискорюють потік напилюваних частинок, відхиляють заряджені частинки з метою сепарації потоку.

Установки “Булат” мають пристрій для автоматичного напуску газу у вигляді голчастого натікача 4. Атмосфера в камері контролюється мас-спектрометром 3, завдяки чому з’являється можливість створення плазмових струменів із регульованим вмістом іонів різних елементів.

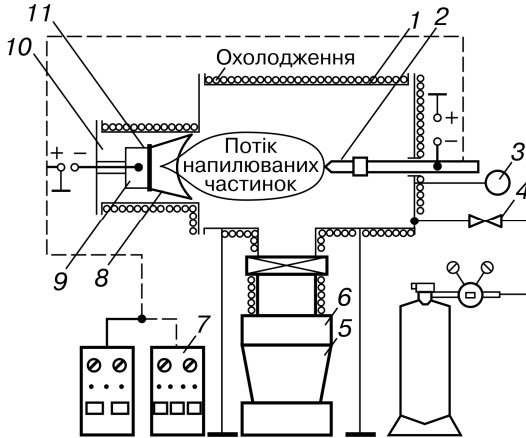


Рисунок 2.39 - Схема установки типу “Булат” з одним випарником

Крім установок типу “Булат”, випускаються установки для конденсації з металеві плазми при іонному бомбардуванні типу “Пуск”, “Юніон” та ін.

Основним призначенням практично всіх установок є зміцнення різального інструмента. Крім того, їх можна використати для нанесення покриття на деталі найширшого призначення.

Всеросійським інститутом авіаційних матеріалів (BIAM) розроблено установку для іонно-плазмового напilenня MAP-1M. Вона призначена для нанесення іонно-плазмового дифузійного покриття з композицій жароміцних сплавів, які забезпечують високу жароміцність, термостійкість та міцність від утомленості деталей, що працюють при високих температурах.

2.7.5 Установки для ВКНП іонним розпиленням.

Для отримання покриття з металів, в тому числі тугоплавких сплавів, напівпровідників, діелектриків та іншого покриття конструктивного призначення, використовують установки нанесення покриття іонним бомбардуванням.

Найбільше поширення отримали установки з магнетронними розпилювальними системами (МРС). Це такі установки, як ZV1200, Z700P2/2 (фірми “Лейбольд-Хареус”, Німеччина), МИР-16, МИР-2, MARS-650, УВН-6 та ін.

Порівняно з електронно-променевим випаровуванням МРС забезпечують на два-три порядки вищий ступінь іонізації і дозволяють отримати покриття більшої номенклатури складових компонентів. Енергія розпилюваних частинок при магнетронному розпиленні на порядок вища, ніж при електронно-променевому.

Існує багато конструкційних варіантів МРС, які розрізняються способом створення магнітного поля, конструкцією катодного вузла, геометрією мішені. Розроблено три базові конструкції магнетрона: циліндрична з циліндричним катодом, планарна з плоским катодом і так звана *S-Gun* з кільцевим конусоподібним катодом, яку іноді розглядають як різновид циліндричної (рис. 2.40). Установка УВН-61 має циліндричну (коаксіальну) магнетронну систему, в якій катод із матеріалу, що розпилюється, виконано у вигляді труби (рис. 2.40, а).

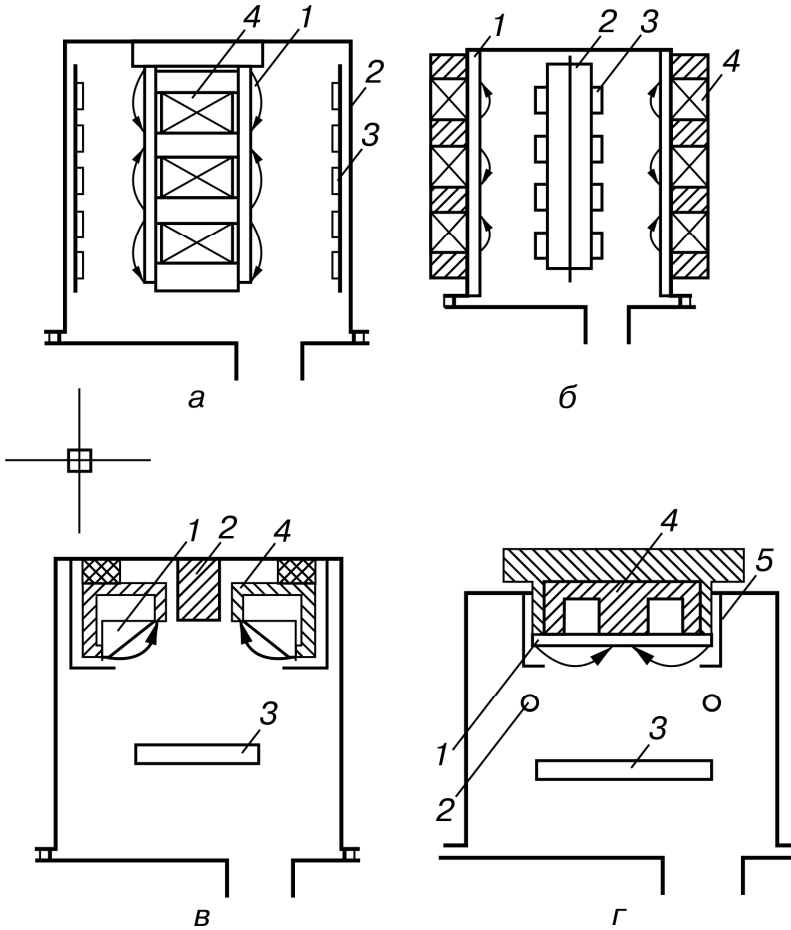
Магнетронна система встановлена у внутрішній порожнині труби, і при цьому розпилюється зовнішня поверхня катода.

Плазма локалізується біля поверхні катода, що розпилюється, за допомогою кільцевого аorchного магнітного поля. Підкладки розміщуються навкруг катода. Для наведеної схеми характерні густина струму 60 mA/cm^2 та досить висока рівномірність покриття.

Установка УВН-61 складається з основи, ковпакової робочої камери з підковпаковим пристроєм, механізмом, для підйому ковпака, вакуумної системи, системи охолодження і пульта керування з електронним блоком.

Основу становить сталевий зварний каркас, закритий металевими панелями пульта керування. Ковпакова робоча камера з випарником і виробами розташовані на базовій плиті, а всередині каркаса змонтовано всі інші системи й елементи. Ковпакова камера

являє собою металеву (з нержавіючої сталі) герметичну оболонку, що вакуумно щільно з'єднується з базовою плитою. Для спостереження за процесом напилювання ковпак має оглядове вікно.



а - циліндрична з внутрішнім розміщенням катода; *б* - циліндрична із зовнішнім розміщенням катода; *в* - система з кінцевим катодом *S-Gun*; *г* - планарна система; 1 - катод (мшень); 2 - анод; 3 - тримач підкладки; 4 - магнетронна система; 5 - екран.

Стрілочками показано напрямок силових ліній магнітного поля

Рисунок 2.40 - Конструктивні схеми магнетронних схем розпилення

До камери припаяний змійовик, який призначений для охолодження або підігрівання камери холодною чи гарячою водою.

Для нанесення покриття досить часто використовують установки, в яких процес здійснюють з використанням двох методів. Прикладом такої установки може бути установка УВН-75Р-2, схема якої наведена на рис. 2.41.

Електрична схема установки забезпечує живлення і керування тліючим розрядом при максимальному струмі 200 мА та напрузі 5 кВ і електронно-променевим випарником при максимальному струмі променя 200 мА і напрузі 10 кВ.

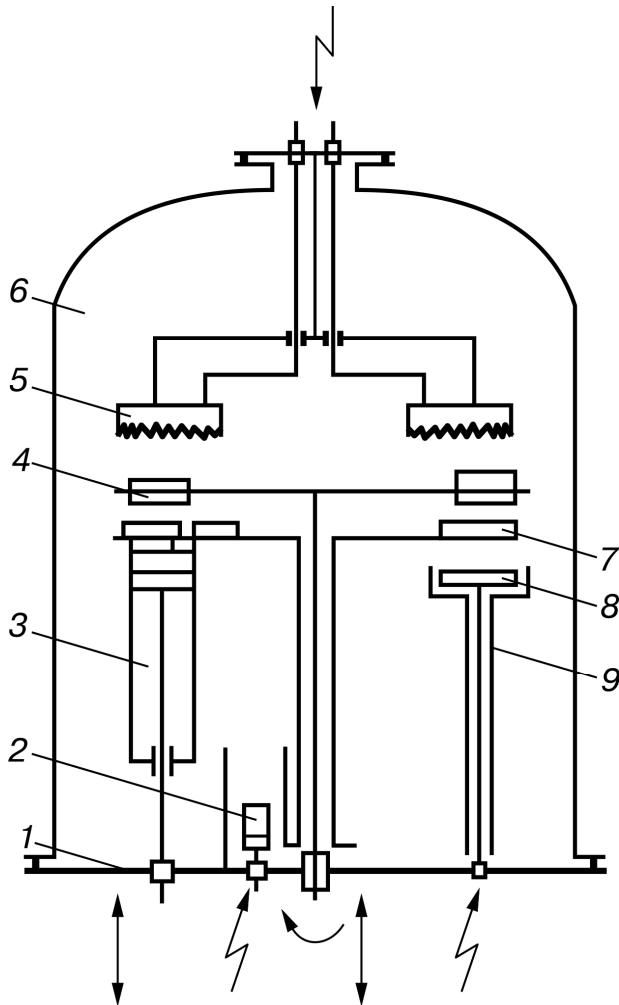
Більші можливості має інша модифікація установок такого типу УВН-75П-1. Вона забезпечує іонне розпилення як на постійному, так і на змінному струмі.

При розпиленні металів, сплавів, з'єднань металевого типу на матеріал подається постійна напруга до 5 кВ. При розпиленні діелектриків використовується змінна напруга до 3 кВ з частотою 76 МГц. Крім того, установка має двопроменевий електронний випарник, який працює при напрузі 6-10 кВ та силі струму до 200 мА.

2.8 Матеріали для вакуумно конденсаційного нанесення покриття

Вибір матеріалів для нанесення вакуумно-конденсаційного покриття здійснюється так само, як і для газотермічних методів. Матеріал вибирається з урахуванням фізико-хімічних процесів випаровування-конденсація, які відбуваються при нанесенні покриття, вимогами до експлуатаційних властивостей шару покриття, сумісності матеріалу шару покриття і виробу.

Форма матеріалу, який випаровується, залежно від способу вакуумно-конденсаційного напылення може бути у вигляді дроту, порошку грануляцією 8-400 мкм, гранул грануляцією приблизно 700 мкм, циліндричних заготовок (злитків або дрітків), пластин, дисків та штабок. Розміри циліндричних заготовок, дисків, пластин та штабок визначаються геометрією випарників - човників, тиглів тощо. Діаметри заготовок можуть бути 50-200 мм і товщиною 5-20 мм.



1 - базова плита; 2 - електронно-променевий випарник; 3 - бункер деталей
; 4 - багатопозиційна карусель; 5 - підігрівник виробів; 6 - ковпак вакуумної камери;
7 - виріб; 8 - магнетронна розпилювальна система; 9 - екран

Рисунок 2.41 - Схема внутрішньокамерного обладнання установки УВН-75Р-2

При використанні порошкових матеріалів необхідно враховувати те, що частинки матеріалу мають розвинену поверхню,

яка зумовлює підвищену абсорбцію вологи та газів із навколишнього середовища. При миттєвому випаровуванні адсорбованої вологи і газів відбувається розбризкування частинок порошку реактивними силами, що веде до порушення технологічних параметрів режиму випаровування, додаткових витрат речовини, що випаровується, забруднення поверхні конденсату, що формується на поверхні виробу, нерозплавленими частинками.

Для усунення цього недоліку при використанні неметалевих матеріалів використовуються штапки, як правило, у вигляді таблеток круглої форми, які виготовляються методами пресування і спікання з порошків відповідних матеріалів.

Для стабілізації якості покриття для дегазації та усереднення хімічного складу дротиків із металевих матеріалів їх досить часто переплавляють в електронно-променевих установках у злитки циліндричної форми.

Для вакуумно-конденсаційних методів нанесення покриття використовують, як і для газотермічних методів, чисті метали, металеві сплави, інтерметалідні з'єднання та сплави на їх основі, керамічні матеріали та складні композиції з різних груп матеріалів.

Для отримання різних типів покриття можна використовувати матеріали однієї або кількох груп.

Як матеріали для покриття з чистих металів найчастіше використовують алюміній, хром та благородні метали. Вибір цих металів зумовлений їх високою корозійною стійкістю, утворенням на поверхні щільних та міцно зчеплених оксидних плівок, пластичністю, достатнім зчепленням з поверхнею виробу.

Алюмінієві покриття, отримані осадженням у вакуумі, служать надійним захистом від окиснення при високих температурах, захищають сталі від високотемпературної газової корозії. Отримані іонним осадженням алюмінієві покриття використовують для захисту сталевих та титанових деталей в авіаційній та аерокосмічній техніці.

Залежно від умов експлуатації алюмінієві покриття, отримані іонним осадженням, мають різну товщину і умовно поділяються на три групи.

До першої групи належать покриття товщиною 15-25 мкм. Вони призначені для захисту деталей від високотемпературного окиснення при контакті з навколишнім середовищем. До другої групи відносять покриття товщиною 8-13 мкм, які призначені для

захисту деталей переважно від атмосферної корозії. Третя група алюмінієвого покриття товщиною до 8 мкм наноситься на вироби, для яких необхідно точне додержання геометричних розмірів.

Покриття з хрому, які отримують катодним розпиленням та іонним осадженням, мають високу міцність зчеплення з поверхнею виробу і корозійну стійкість при підвищених температурах. Вакуумно-конденсаційне покриття з хрому краще, ніж гальванічне хромування.

Благородні метали - рутеній, радій, паладій, осмій, іридій, золото, платина - використовуються для захисту титану і сплавів на його основі від окиснення при температурах, більших за 600 °С.

Напилення металевих сплавів дає можливість отримати ширший спектр покриттів, ніж при використанні чистих металів. На практиці поширення отримали сплави на основі заліза, нікелю, кобальту, міді, титану, цирконію тощо.

Бінарні сплави Ni-Cr, Co-Cr, Fe-Cr являють собою простіші системи, які використовуються в техніці для отримання захисних покриттів на виробах, що зазнають високотемпературної газової корозії. Випаровування таких або подібних сплавів із подальшим осадженням у вакуумі зумовлює перспективи для створення ефективного покриття для захисту від високотемпературної газової корозії елементів камер згоряння, деталей гарячого тракту турбін і пальних пристроїв, що експлуатуються при температурах 900-950 °С.

Для захисту лопаток газових турбін від високотемпературного окиснення можна використати алюмінідні покриття. Основу захисного шару на нікелевих та кобальтових сплавах становлять з'єднання NiAl (CoAl) або суміш інтерметалідів NiAl та Ni₃Al.

Чисто алюмінідне покриття товщиною 45 мкм може забезпечити надійний захист жароміцних нікелевих сплавів при незмінній температурі 1100 °С протягом 1000 год.

Жаростійкі покриття із сплавів Fe-Cr-Al-Y товщиною 75-125 мкм використовуються для нанесення вакуумно-конденсаційного покриття з електронно-променевим способом нагрівання для захисту лопаток газових турбін від корозійної дії багатосірчаних продуктів згоряння палива при температурах 600-850 °С.

Для захисту деталей тракту турбін тим же способом можна наносити покриття складу Co-Cr-Al-Y з подальшим відпалом і

кінцевою обробкою осадженого шару.

Металоїдні матеріали ефективно протидіють зношуванню. З простих речовин таку твердість мають тільки вуглець (алмаз) та бор. Більшість речовин з високою твердістю - це тугоплавкі хімічні сполуки: безкисневі металоподобні і неметалеві, кисневмісні та інтерметаліди. Найбільш перспективними для практичного використання є металоподобні карбіди, нітриди, бориди, силіциди.

Більшість металоїдних сполук характеризуються підвищеною крихкістю. У зв'язку з цим у склад покриття доцільно вводити пластичний компонент, наприклад метал або сплав. Залежно від умов експлуатації напиленого виробу та властивостей металоїдної сполуки співвідношення між останньою і металом може коливатися у великих інтервалах.

При вакуумному конденсаційному напиленні покриття термічним випаровуванням необхідно враховувати, що випаровування, як правило, супроводжується різноманітністю первинних (вихідних) молекул металоїдної сполуки. У більшості сполук, які становлять інтерес для створення покриття, в процесі випаровування відбувається дисоціація первинних (вихідних) молекул з утворенням газоподібних продуктів різного складу. Тому отримання покриття прямим випаровуванням з одного джерела без зміни вихідного складу металоїдної сполуки можливо тільки за умови однакової леткості продуктів дисоціації. При цьому взаємодія пари елементів сполуки із залишковими газами камери має бути нехтовно малою.

Так, при електронно-променевому випаровуванні сполук TiC, ZrC, NbC, TiB₂, ZrB₂ та інших металоїдних матеріалів вдається отримати покриття практично без змінення складу. І навпаки, при випаровуванні сполук WC, SiC, AlN, ZrN створюються продукти дисоціації з дуже різною леткістю елементів. Для отримання покриття такого складу необхідно використовувати роздільне випаровування елементів сполуки або застосовувати методи вакуумного реакційного напилення.

При вакуумному конденсаційному напиленні методами розпилення практично можна уникнути впливу різної леткості елементів металоїдної сполуки на склад покриття.

Карбіди широко використовують для напилення зносостійкого, корозійностійкого, жаростійкого покриття. Більшість із них мають високу температуру плавлення та твердість при нормальних та

підвищених температурах, жаростійкість та стійкість до агресивного середовища.

Нітридні покриття можна використовувати для створення зносостійкого, корозійностійкого та жаростійкого покриття, а також покриття зі специфічними властивостями.

При високих температурах нагрівання напилювані частинки дисоціюють, тому це треба враховувати при напиленні:

$$(\text{MeN})_{\text{ТВ}} = \text{Me}_{\text{ТВ}} + 1/2 \text{N}_{2(\text{газ})}$$

Найстійкішими є нітриди титану, цирконію, гафнію, танталу, алюмінію та ін.

Для створення тонкого нітридного покриття товщиною 1-180 мкм найбільшого поширення отримали методи вакуумного конденсаційного реакційного наплення за наявності азоту.

Враховуючи, що більшість нітридів, як і карбіди, являють собою фази вкорінення зі щільною кубічною або гексагональною кристалічною ґраткою, формування вакуумного реакційного покриття полегшується у зв'язку з широкими межами гомогенності, які властиві нітридним сполукам.

Нітрид	TiN	ZrN	VN	NbN	TaN
Масова частка N ₂ , %	37-50	34-50	41-50	50-51	44-47

Реакція утворення нітридів відбувається переважно на поверхні, яка напилюється. Характер течії реакції залежить від швидкості попадання на поверхню атомів металу та азоту, коефіцієнта їх конденсації, температури поверхні. Розрахунки показують, що кількість зіткнень металу і газу при напиленні нітриду титану стане однаковою при тиску азоту в камері $P_{\text{N}_2} = 0,08 \text{ Па}$.

Реакцію між металом і азотом можна стимулювати активацією та іонізацією атомів. Це легко досягається при використанні дугових способів реакційного термовакuumного іонно-плазмового розпилення та реакційного осадження покриття при магнетронному іонному розпиленні. Іонізація потоку пари зумовлює високі швидкості плазово-хімічних реакцій у просторі випаровування та на поверхні наплення. Концентрацію азоту в напиленому покритті регулюють тиском азоту в камері. Однак сильно впливає і від'ємне зміщення, що подається на виріб, який напилюється.

Оксидні покриття найбільш універсальні і можуть бути використані як зносостійкі, корозійностійкі і жаростійкі, теплозахисні і електроізоляційні покриття.

У багатьох агресивних середовищах, особливо при високих температурах, оксиди більш стійкі, ніж карбіди, бориди і нітриди. Вони мають низьку тепло- та електропровідність, високу твердість та зносостійкість до окиснювального середовища.

При вакуумно-конденсаційному напыленні оксидного покриття найбільш доцільно використовувати реакційні методи іонно-плазмового напылення - Plasma Assisted Physical Vapor Deposition (PA PVD). Для цього в робочу камеру крізь натікач подається активний окиснювальний газ - найчастіше кисень. Цим методом можна отримати тонкі чисто оксидні покриття і складні композиційні з добавками різних металів та сполук інтерметалідного та металідного типів, причому доданий компонент може бути розміщений у покритті у вигляді окремих включень (дисперсно-зміцнені шари), а також у вигляді шарів (мікрошаруваті покриття) зі зміною за товщиною покриття концентрації (градієнтні покриття).

2.9 Технологія вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів

2.9.1 Особливості підготовчих робіт

Як відомо, стан поверхні перед нанесенням покриття визначає якість сконденсованого шару, функціональні характеристики покриття і, зокрема, адгезію.

Будова поверхневої плівки залежать від попередньої історії поверхні, тобто від умов отримання, збереження і транспортування того чи іншого виробу.

Щоб полегшити доступ атомів матеріалу, що випаровується, до поверхні, необхідно видалити плівку забруднень і адсорбовані плівки, тобто очистити поверхню. Спосіб очищення залежить від кількості і складу поверхневих забруднень. Відповідно до послідовності і характеру проведення очищення виділяють: грубе і тонке механічне очищення; термообробку в повітрі і вакуумі, тонке очищення і активацію поверхні у вакуумі за допомогою різних фізичних процесів.

Для механічних і хімічних методів підготовки поверхні виробів до

розміщення їх у вакуумній камері використовують переважно ті ж методи підготовки, що і для газотермічних методів нанесення покриття.

Особливу увагу при підготовці поверхні для нанесення покриття вакуумно-конденсаційними методами необхідно звернути на осушення очищеної поверхні після хімічної обробки перед нанесенням покриття. Осушення необхідно проводити в паровому очиснику або чистій печі гарячим відфільтрованим повітрям або азотом.

Останній ступінь при очищенні - промивання в деіонізованій воді, з якої виріб треба виймати так, щоб на поверхні залишилася мінімальна кількість рідини. Краплі треба видувати струменем повітря або центрифугуванням.

Для збереження і транспортування виробів рекомендується використовувати обезпилені контейнери або ексикатори.

Підготовка поверхні виробів після розміщення виробів у вакуумній камері характерна тільки для вакуумно-конденсаційних методів нанесення покриття. Це термообробка і електрофізична обробка поверхні.

Термообробку проводять нагріванням поверхні або всього виробу у вакуумі при тиску приблизно $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па до визначеної температури, витримку при цій температурі і охолодження до температури конденсації матеріалу, що випаровується. У процесі нагрівання і витримки відбувається очищення та обезгажування поверхні. Але внаслідок обмеженої термічної стійкості деяких матеріалів виробу, наприклад полімерів, напівпровідникових структур, нетерmostійких композицій, термообробка у вакуумі не завжди допускається.

Для матеріалів з обмеженою термічною стійкістю можна використовувати електрофізичні методи очищення - опромінення імпульсними лампами у високому вакуумі і очищення в тліючому розряді на етапі відкачування системи механічним насосом.

При нагріванні імпульсними лампами досягається поєднання високотемпературного нагрівання поверхні низької температури в об'ємі виробу і шарах, які дотикаються до поверхні. Лампи працюють при високій напрузі, що ускладнює роботу обслуговуючого персоналу.

Очищення поверхні тліючим розрядом має істотні переваги над іншими видами електрофізичної підготовки поверхні. Це один із видів несамостійного розряду в газах, який виникає між електродами при визначеній різниці потенціалів. Електроди виготовляють у вигляді пластини, рамки або дротика. При очищенні діелектрика електроди

розміщуються з боку поверхні, на яку наноситься покриття. Найчастіше електроди виготовляють з алюмінію, який має низький коефіцієнт розпилення, високий коефіцієнт вторинної електронної емісії, добрі механічні характеристики, високу тепло- і електропровідність.

При очищенні металевих виробів вони самі можуть слугувати катодом, а заземлена вакуумна камера - анодом.

Очищення поверхні діелектриків найбільш ефективна при короткочасній (3-7 с) дії плазми тліючого розряду і густини струму 2,0-4,0 А/м². Такий режим дає можливість видалити хемосорбовану воду і тонкі поверхневі забруднення без розігрівання внутрішніх шарів виробу. Особливо ефективне плазмове очищення для оксидних шарів поверхні при нанесенні на них шарів металів із високою питомою енергією утворення оксиду.

Очищення в плазмі тліючого розряду після грубого хімічного очищення поверхні виробу дає змогу отримати адгезію покриття, яка дорівнює когезійній міцності поверхні виробу.

При вакуумно-конденсаційних методах нанесення покриття, важливим етапом є підготовка до процесу нанесення покриття технологічного устаткування і обладнання, що знаходиться у вакуумній камері, зокрема, очищення його від сконденсованих на його поверхні при попередніх процесах матеріалів, вологи та інших забруднень.

Технічне устаткування і обладнання, що знаходиться у вакуумній камері, необхідно піддавати механічному очищенню переважно за межами камери.

Для хімічного очищення кожного металу, що випаровується, і випарника з урахуванням його матеріалу використовують спеціальні склади рідин для травлення, наприклад, для алюмінію - розчинену HCl і розчини, луг; Au - "царську горілку"; W - суміш HF та HNO₃; Ni - розчинені HCl, H₂SO₄, концентровану HNO₃ тощо.

2.9.2 Технологія нанесення покриттів термічним випаровуванням.

Роботи починають з операцій з підготовки установки до роботи і:

- вибір відносного положення випарника і поверхні виробу;
- підготовка матеріалу, що випаровується, та установка оптимального режиму випаровування;
- забезпечення необхідного температурного режиму конденсації.

Правильний вибір взаємного розміщення поверхонь, з якої випаровується і на якій конденсується матеріал, із урахуванням розмірів випарника і підкладки забезпечує отримання покриття заданої рівномірності товщини покриття.

Рівномірність товщини покриттів визначається тиском залишкових газів у камері та геометрією випаровування. Тиск залишкових газів впливає на рівномірність товщини покриття, особливо в інтервалі 0,13-0,65 Па.

Звичайна відстань від випарника до виробу становить $h \approx 250-300$ мм. Тому δ/δ_0 приблизно дорівнює 0,5 при $x/h = 0,6, x \approx 150 \dots 180$ мм. Якщо розміщувати джерела випаровування на такій відстані, то можна отримувати покриття, рівномірне за товщиною. Наприклад, при випаровуванні з малої поверхні рівномірне покриття при дистанції напilenня 200 мм становить пляму діаметром 80-120 мм.

Не рекомендується розміщувати поверхню, що напилиться, близько до випарника, оскільки при нагріванні і плавленні матеріалу з випарника на поверхню виробу падають краплі роз-плавленого металу. При значному віддаленні поверхні виробу від випарника зменшується коефіцієнт використання пари. Залежно від способу випаровування на практиці діапазон дистанції напilenня при випаровуванні знаходиться в інтервалі 0,05-0,5 м.

У табл. 2.2 наведено рекомендовані температури випаровування різних матеріалів для досягнення тиску насиченої пари 1,33 Па.

Наявність оксидної плівки та різних включень на поверхні, яка випаровується, ускладнюють процеси випаровування. Не можна допускати високу концентрацію газоподібних включень у матеріал.

Форми і розміри поверхні випаровування впливають на стабільність процесу, характер розподілу елементів. Тому потрібно підтримувати стабільний рівень ванни подачею порошкових або пруткових матеріалів, використанням лазерних та інших систем

контролю за рівнем поверхні.

Таблиця 2.2 - Рекомендовані температури випаровування різних матеріалів для досягнення $P_0 = 1,33$ Па

Матеріал	$T_{\text{вип}},$ °C	$T_{\text{пл}},$ °C	$T_{\text{кип}},$ °C	Матеріал	$T_{\text{вип}},$ °C	$T_{\text{пл}},$ °C	$T_{\text{кип}},$ °C
Кадмій	264	320	767	Нікель	1530	1455	2730
Свинець	715	327	1744	Титан	1750	1672	3260
Срібло	1030	960	2212	Платина	2100	1760	4410
Алюміній	1220	660	2370	Молибден	2530	2622	4804
Мідь	1260	1083	2595	Вольфрам	3230	3345	5930
Золото	1400	1063	2530	Діоксид кремнію	1250	1993	2250
Хром	1400	1845	2508	Діоксид алюмінію	1800	2320	3250

Температурний режим конденсації визначає адгезію покриття, структуру, пористість осаджених шарів, які є визначальними параметрами захисного вакуумного покриття.

Для формування якісних захисних покриттів необхідно утворити оптимальні умови формування первинних шарів, які визначають переважно характер і закономірності росту всього покриття. Змінюючи температуру поверхні, яка напильється, згідно з теорією тризонної будови структури покриття залежно від температури основи можна в широких межах регулювати механічні властивості покриття.

У табл. 2.3 наведені значення температур T_1 і T_2 для товстих покриттів, напилених різними матеріалами.

Невисокі температури нагрівання виробу можуть призвести до формування на поверхні покриття з низькою когезійною міцністю. Основна причина формування неякісного покриття пов'язана з невисоким енергетичним рівнем напилених частинок.

Температуру нагрівання напилених виробів вибирають, виходячи з багатьох факторів. У табл. 2.4 наведено мінімальні значення температури напилених виробів для різних комбінацій матеріалів.

Попереднє підігрівання поверхні, що напильється, до визначеної температури принципово можна реалізувати таким чином:

- пропусканням струму крізь виріб, що напильється (тонкі листи, стрічки);
- непрямым нагріванням від допоміжного нагрівника (всі поверхні

виробів);

- індукційним нагріванням (масивні вироби з металів);

- електронним променем, який сканує вздовж поверхні, що напилюється;

- електронним та іонним бомбардуванням.

Таблиця 2.3 - Обмежувальні температури T_1 і T_2 та їх співвідношення для тризонної структурної моделі формування покриття

Матеріал	$T_{пл}, K$	T_1, K	$T_1/T_{пл}$	T_2, K	$T_2/T_{пл}$
Титан	1945	643 ± 10	0,33	948 ± 30	0,49
Нікель	1726	543 ± 10	0,31	723 ± 10	0,42
Мідь	1356	433 ± 10	0,32	673 ± 20	0,50
Залізо	1809	563 ± 10	0,31	863 ± 20	0,48
Ni + 20% Cr	1673	500 ± 50	0,30	870	0,52
Вольфрам	3683	1133 ± 50	0,30	1723 ± 50	0,47
Оксид хрому Cr_2O_3	2973	648 ± 10	0,22	1273 ± 100	0,43
Оксид Al_2O_3	2323	623 ± 10	0,26	1173 ± 100	0,50
Карбід титану	3340	1070 ± 30	0,31	-	-
Карбід цирконію	3690	1323 ± 50	0,36	1623 ± 50	0,44

Таблиця 2.4 - Мінімальні температури ($^{\circ}C$) напилюваних виробів для різних комбінацій матеріалів виробу і покриттів

Матеріал покриття	Матеріал виробу					
	Ti	Cu	Mo	Fe	Nb	Ni
Молібден	650	500	750	350	400	400
Хром	650	450	700	600	-	400
Мідь	-	-	400	450	400	350
Нікель	-	350	500	350	-	-

Після досягнення заданого температурного режиму осадження покриття встановлюється оптимальний технологічний режим випаровування, відкривається засувка і проводиться нанесення покриття.

При нанесенні покриття необхідно постійно контролювати температурний режим конденсації, тому що в процесі нанесення покриття поверхня виробу, на яку наноситься покриття, додатково розігрівається. Це відбувається через виділення прихованої теплоти конденсації та випромінювання випарника. Від додаткового розігрівання температура може підніматися до кількох сотень градусів.

2.9.3 Технологія нанесення покриттів іонно-плазмовим напиленням.

Серед великого різновиду типів покриттів, отриманих іонно-плазмовим напиленням, найбільш поширеним є зносостійке покриття.

Для отримання зносостійких покриттів на різальному, штампувальному та вимірювальних інструментах та деталях машин, що швидко спрацьовуються, широко використовується метод конденсації металевої плазми при іонному бомбардуванні, який використовує катодну форму вакуумної дуги.

Процес формування покриття можна умовно поділити на три стадії.

Перша стадія - формування плазмового потоку частинок речовини, що випаровуються. Стаціонарний катодний режим генерації стійкого плазмового потоку при струмах, більших за критичні, найчастіше при потужності більшій, ніж 1 кВт. Для формування сфокусованого плазмового потоку використовують електромагнітні торцеві (холівські) прискорювачі.

Друга стадія - іонне бомбардування або іонне очищення поверхні. На цій стадії між катодом, що розпилюється, і виробом, на який напилюється матеріал, подається висока напруга (1,2-1,5 кВ). Заряджені частинки плазми, іонізовані атоми речовини, що випаровуються, конгломерати частинок отримують більшу енергію і з високою швидкістю переміщуються до поверхні виробу, бомбардуючи її. Внаслідок такого бомбардування у високому вакуумі відбувається фізичне і хімічне очищення поверхневого шару виробу, значне розігрівання поверхневого шару, а основна маса виробу залишається відносно холодною. Це викликає появу значних напружень стискання, які сприяють зтягуванню мікротріщин, поліпшенню робочих характеристик поверхні виробу, і веде до захоплення частинок матеріалу, що напилюється, з розігрітим шаром поверхні.

Час іонного бомбардування визначається теплофізичними властивостями матеріалу.

Третя стадія - безпосереднє нанесення покриття заданої товщини на поверхню, що обробляється.

Властивості покриття визначаються параметрами процесу - температурою конденсації і швидкістю нанесення покриття. Температуру конденсації, яка залежить переважно від властивостей

матеріалу основи (виробу), підтримують сталою протягом усього процесу нанесення покриття. Швидкість конденсації покриття визначається густиною іонного струму і енергією частинок, що напилються. Це регулюється підбором параметрів процесу - видом робочого газу, густиною іонного струму, прискорювальною напругою між катодом і виробом, індукцією магнітного поля. У стандартних технологічних процесах швидкість нанесення покриття знаходиться в діапазоні 5-10 нм/с. Час технологічного циклу отримання покриття регламентується переважно товщиною покриття.

Отримання на поверхні виробу хімічних сполук досягається використанням контрольованої атмосфери робочого (легуючого) газу.

Для переходу від одного матеріалу, що напильється, до іншого слід замінити внутрішній диск або дротик катода.

При нанесенні зносостійких покриттів на різальний інструмент необхідно враховувати особливості матеріалів, на які наносяться покриття. Так, нанесення покриття на інструмент типу твердосплавних пластин (Т15К6, Т5К10 тощо) не вимагає суворого дотримання температурного режиму конденсації. У досить широкому інтервалі температур (623-973 К) можливе отримання якісного покриття з непоганою адгезією до підкладки. При цьому механічні характеристики основи практично не змінюються.

При нанесенні покриття на вироби з деяких інструментальних сталей необхідно враховувати температурні обмеження, пов'язані з можливою зміною фізико-механічних властивостей основи. Наприклад, при нанесенні покриттів на сталь Р6М5 температура основи не повинна перевищувати 723 К. Це визначає додаткові вимоги до вибору параметрів очищення перед нанесенням покриття.

Використання цієї технології нанесення покриття не завжди ефективне для виробів із підвищеними вимогами до стану поверхні, а також з низькою температурою відпуску.

2.9.4 Особливості технологічного процесу нанесення покриттів іонним розпиленням

Через те що діодні і тріодні способи іонного розпилення мають низьку продуктивність, вони знайшли поширення в мікроелектроніці.

Для отримання зносостійких та корозійностійких покриттів використовують магнетронний спосіб іонного розпилення.

До основних робочих характеристик магнетронних розпилювальних систем належать: напруга на електродах, струм розряду, густина струму на мішені та питома потужність, індукція магнітного поля і робочий тиск.

Магнетронні системи належать до низьковольтних систем розпилення, напруга живлення яких не перевищує 1000 В. Робоча напруга становить 300-700 В. На виріб звичайно подається від'ємний потенціал. Анод має нульовий потенціал. Але в магнетронних системах із площинним катодом для уловлювання вторинних електронів рекомендується подавати на анод невелике позитивне зміщення - 40-50 В. У деяких системах подачі від'ємного потенціалу на виріб, що напилується, для реалізації розпилення зі зміщенням досягає 100 В.

Густина струму на мішені, що випаровується, досить велика і в середньому становить для порожнистого циліндричного катода 80 мА/см², конічного катода - 160 мА/см², площинного катода - 200 мА/см². Питома потужність у магнетронних системах з порожнистим циліндричним катодом досягає 40 Вт/см², з площинним катодом - 100 Вт/см², найбільш дозволена потужність визначається умовами охолодження мішені та теплопровідністю матеріалу, що розпилюється.

Магнетронна система може працювати в діапазоні тиску від 10⁻² до 1 Па і вище.

Важливими параметрами, які визначають характер розряду, є геометрія та напруженість магнітного поля; індукція останнього в поверхні мішені становить 0,03-0,1 Т. Для отримання покриття з діелектричних матеріалів використовують високочастотне ($f = 13,56$ МГц) магнетронне розпилення.

Як відомо, інтенсивність процесу катодного розпилення характеризується коефіцієнтом розпилення:

$$S = \frac{N_0}{N_i}, \quad (2.32)$$

де N_0 - кількість вибитих атомів матеріалу, що розпилюється;

N_i - кількість іонів, що падає на розпилюваний матеріал.

Як було вказано раніше, коефіцієнт розпилення S залежить від

атомного номера та структури електронних оболонок. У табл. 2.5 наведені коефіцієнти розпилення та середні швидкості магнетронного напилення деяких матеріалів. Для розпилення використовували плоскі мішені діаметром 150 мм. Потужність тліючого розряду становить 4 кВт, дистанція напилення - 60 мм.

Таблиця 2.5 - Коефіцієнт розпилення S і швидкість зростання покриття V_n для деяких матеріалів

Матеріал, який розпилюється	S для іонів аргону з енергією 600 еВ, атом/іон	Швидкість осадження, нм · с ⁻¹	Матеріал, який розпилюється	S для іонів аргону з енергією 600 еВ, атом/іон	Швидкість осадження, нм · с ⁻¹
Si	0,5	6,7	G	1,2	12,8
Ti	0,6	7,8	Cr	1,3	16,6
Ta	0,6	7,8	Pt	1,6	21,0
W	0,6	7,8	Cu	2,8	30,0
Nb	0,65	8,4	Pd	2,4	31,2
Mo	0,9	11,7	An	2,8	36,7
Al	1,2	12,7	Ag	3,4	44,2

Великий вплив на ефективність процесу мають форма і розмір розпилюваного матеріалу. Розміри поверхні розпилення повинні відповідати потоку плазми тліючого розряду. Як правило, розміри поверхні розпилення беруть близькими до розмірів напилюваної поверхні. Залежно від способу іонного розпилення площу мішені, яка розпилюється, вибирають у широких межах - від десятків до тисяч квадратних сантиметрів.

2.9.5 Особливості процесу вакуумно-конденсаційного реакційного напилення покриття

Вакуумно-конденсаційне реакційне напилення покриття використовується у випадках, коли сполука, яка напилюється, розкладається при дії термічного поля.

Суть реакційного напилення в тому, що внаслідок зіткнення атомів металу і атомів реакційного газу - азоту, метану та інших газів -

утворюються нітриди і карбіди. Для утворення оксидів використовують кисень.

Введення активних газів у вакуумну камеру забезпечує плазмо-хімічні реакції з речовиною, що розпилюється, і утворення на поверхні виробу покриття з хімічних сполук. Цей процес має технологічні особливості, які необхідно враховувати.

При розпиленні мішені частина реакційного газу зв'язується речовиною, що розпилюється, а частина - поверхнею мішені, що безперервно поновлюється. Відбувається своєрідне відкачування реакційного газу. Швидкість відкачування при розпиленні залежить від площі покриття, швидкості видалення плівки, що утворилася на мішені, і виявляється в зменшенні тиску реакційного газу у вакуумній камері з початком процесу напилення.

При малому тиску реакційного газу при постійній потужності розряду з мішені розпилюється метал і хімічна реакція відбувається на поверхні, що напилюється. При вищому тиску на поверхні мішені утворюються хімічні сполуки і швидкість розпилення різко знижується, оскільки швидкість розпилення хімічної сполуки (оксиду, нітриду, карбіду) значно нижча, ніж чистих металів.

Техніка отримання покриття при магнетронному реакційному розпиленні показує велику чутливість до таких технологічних параметрів, як густина іонного струменя мішені, напруги розряду і відношення парціального тиску інертного газу до реакційного. Останній параметр в кожному окремому випадку має своє певне значення і не може мати сталого значення для кожної хімічної сполуки, тому що воно залежить від потужності розряду і швидкості натікання реакційного газу. Висока густина струму необхідна для ерозії з катода поверхневих діелектричних плівок з більшою швидкістю, ніж їх утворення.

Висока напруга необхідна, оскільки в деяких випадках невелике збільшення напруги істотно збільшує швидкість осадження.

Велика чутливість якості та повторюваності властивостей покриття від технологічних параметрів процесу реакційного розпилення і, зокрема, від кількості реакціоспроможного газу та потужності розряду вимагає чутливого контролю процесу напилення в часі. Електричні параметри ефективно контролюються електровимірювальними приладами, а стан плазмового розряду, і, зокрема, емісія - оптичною електрометрією або розрахунками газів.

Найбільш поширеним є спосіб реакційного нанесення нітридного

покриття, зокрема, нітриду титану TiN, а також інших сполук, наприклад Al_2O_3 , Ti_2O_5 , SiO_2 та ін.

У табл. 2.6 наведені умови утворення на поверхні виробу нітриду титану активованим реакційним напиленням при електронно-променевому напиленні променем потужністю 2 кВт.

Таблиця 2.6 - Умови утворення нітриду титану

Температура основи, К	Тиск азоту, Па	Товщина покриття, мкм	Твердість, ГПа*	Колір покриття	Покриття
773	7,8	12	19	Білий	Ti_2N
523	7,8	12	17	Блідо-золотистий	$\text{TiN}+\text{Ti}_2\text{N}$
423	7,8	17	15	Золотистий	TiN

*Твердість вимірювалась при навантаженні на індентор 0,25 Н.

2.9.6 Технологія створення багатокомпонентних та мікрошарових покриттів.

У конденсованих матеріалах чітко виявляється залежність механічних властивостей від структури. Одночасно з можливістю зміни в широких межах структури в конденсатах порівняно з масивними матеріалами з'являється ще додатковий фактор впливу на показники зміцнення - товщина. У сконденсованих плівках товщиною, меншою, ніж 1 мкм, коли дискретність субструктури порівнюється з товщиною плівки, міцність її істотно підвищується. Враховуючи, що товщина захисного покриття дуже часто більша за 15-20 мкм, то підвищення міцності внаслідок малої товщини може бути досягнуто в особливих мікрошаруватих покриттях. Тому до перспективних матеріалів, які отримуються у вигляді товстих конденсатів, належать мікрошаруваті композиції, які складаються з великої кількості мікрошарів із різних матеріалів, які перемежуються.

Вища міцність товстих конденсатів також отримується у двофазних матеріалах. У жароміцних покриттях практичний інтерес становлять товсті дисперсно-зміцнені конденсати типу метал (сплав)-тугоплавкий оксид з термічностабільною структурою.

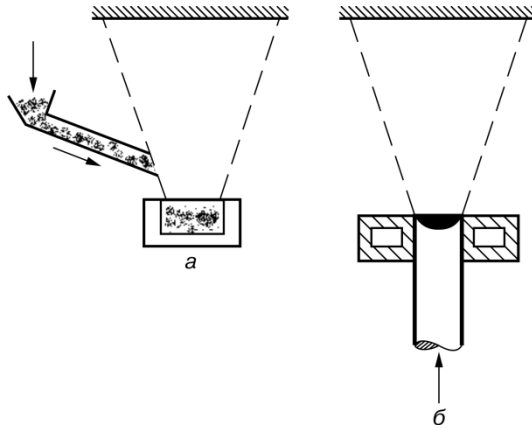
На практиці багатокомпонентні системи покриттів можна

отримати такими способами.

Випаровування з довантаженням (в літературі частіше користуються терміном “випаровування в стаціонарному режимі”) використовують при отриманні товстих (від десятків мікрометрів) покриттів на нерухомих і рухомих поверхнях, на які наноситься покриття, в установках безперервної, напівперервної та періодичної дії. Для довантаження використовують або готовий сплав, або один із його компонентів.

Характерною особливістю випаровування в стаціонарному режимі є рівномірний розподіл компонентів за товщиною покриття.

Довантаження тигля може відбуватись або зверху (рис. 2.42, а), або знизу (рис. 2.42, б) тигля.



а) з довантаженням тигля подачею матеріалу зверху;

б) з довантаженням металевих сплавів знизу тигля

Рисунок 2.42 - Схема випаровування неметалевих композиційних матеріалів

Різновидом методу отримання покриттів у стаціонарному режимі є *метод спалаху*. При цьому методі у випарник, в якому знаходиться розплавлений метал при температурі випаровування або вище за температуру компонента, що важко випаровується, безперервно або порціями подається легуючий компонент сплаву. При попаданні частинок на перегрітий метал відбувається миттєве розплавлення і випаровування матеріалу і на виробі формується покриття з рівномірним розподілом компонентів за товщиною конденсату.

Випаровування кінцевих наважок готових сплавів - найпростіший

із точки зору конструктивного рішення спосіб отримання багатокомпонентного покриття. Цей спосіб використовується для отримання тонких (до 2-5 мкм) плівок переважно для електронної техніки і декоративного покриття. Для нього характерне нерівномірне розміщення компонентів за товщиною: початкові шари збагачені легколетким компонентом, а в загальних шарах переважає речовина з низьким тиском насиченої пари при даній температурі випаровування. Матеріал, що випаровується, це або готові сплави, або, як правило, спечена в таблетки механічна суміш компонентів сплавів.

Роздільне випаровування (рис. 2.43) як метод отримання багатокомпонентних покриттів використовують тоді, коли за технологічними міркуваннями методи прямого випаровування застосовувати недоцільно або неможливо. Цей метод дає можливість отримати покриття зі сплавів, компоненти яких різко відрізняються за термодинамічними параметрами випаровування (наприклад, Ag-Cd, Cu-Zn, Cu-Cd тощо), покриття зі змінним складом вздовж нерухомої поверхні виробу або змінним за товщиною покриття складом при рухомій поверхні виробу.

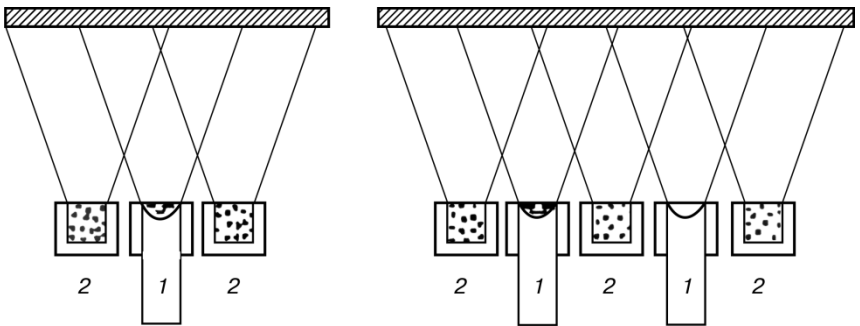
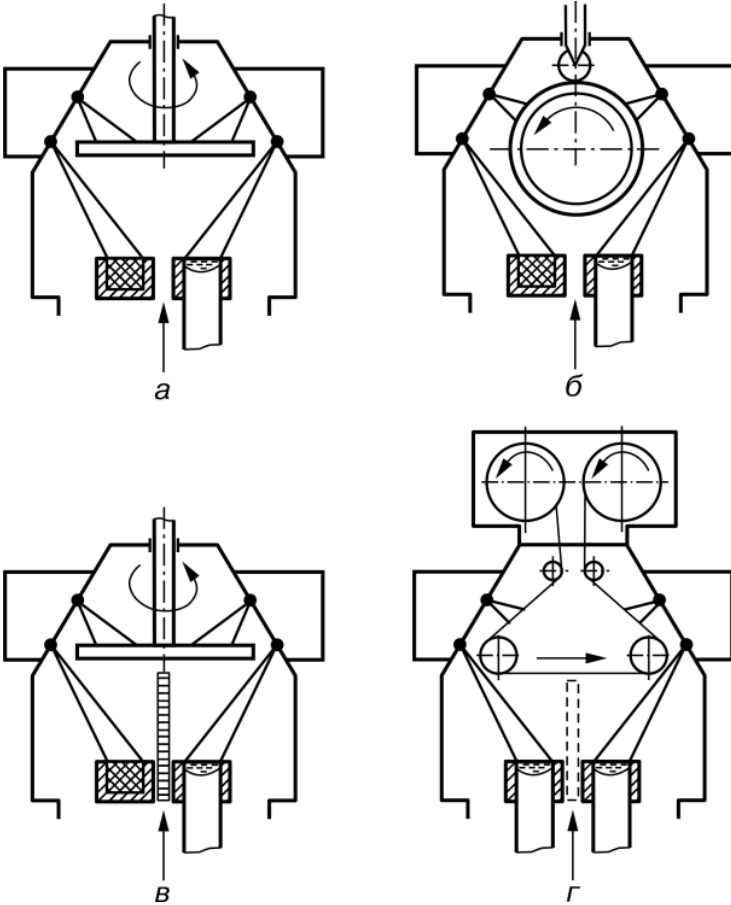


Рисунок 2.43 - Схема випаровування металевих (1) і неметалевих (2) матеріалів одночасно з трьох (а) та п'яти (б) джерел випаровування

На рис. 2.44 наведено схеми варіантів деяких технологічних процесів, які реалізуються нанесенням покриття випаровуванням на електронно-променевої установці з кількома випарниками. За цими схемами можна отримати багатокомпонентні композиції, в тому числі дисперсно-зміцнені, мікрошаруваті.



- а* - випаровування з незалежних випарників металів і неметалів з подальшою одночасною конденсацією парової фази на плоску основу, що обертається;
б - випаровування з незалежних випарників металів і неметалів із подальшою одночасною конденсацією парової фази на циліндричну деталь, що обертається;
в - випаровування з незалежних випарників металів і неметалів із подальшою пошаруваною конденсацією парової фази на плоску основу, що обертається;
г - випаровування з незалежних випарників металів із можливістю подальшої пошаруваної конденсації парової фази на стрічку, що переміщується

Рисунок 2.44 - Схеми деяких технологічних процесів, які реалізуються на електронно-променевій установці з кількома випарниками

Необхідно враховувати, що неминуче нагрівання поверхні кон-

денсації є одним із найсуттєвіших обмежень інтенсифікації процесу нанесення покриття. Неприпустимо збільшувати швидкість конденсації, площу поверхні випаровування, температуру випаровування.

Якщо при нанесенні покриттів із титану, міді, ферохрому, корозійностійкої сталі, хрому, нікелю та інших тугоплавких металів і сплавів на сталь теплові ефекти конденсації мало впливають на властивості покриття, то вищі вимоги до стабілізації температурного режиму конденсації висуваються при отриманні покриття на сталь зі свинцю, цинку, кадмію. Підвищення температури конденсації цих металів призводить до зміни коефіцієнта конденсації, а при досягненні критичної температури основи - до припинення конденсації.

При нанесенні алюмінієвого покриття на сталь Ст3 зі збільшенням температури основи більше, ніж на 733 K, утворюються сполуки типу Fe_2Al_5 , які погіршують адгезію покриття.

У табл. 2.7 наведено систематизовані лабораторією вакуумного покриття ОТІПП ім. М.В. Ломоносова (м. Одеса) отримані під час досліджень і виробничої практики результати з нанесення захисних покриттів. Наведені дані можна використовувати як вихідні для скорочення етапів пошуку і вибору оптимальних параметрів режиму нанесення покриттів із необхідними властивостями, але вони потребують уточнення і доробки стосовно вирішення конкретних завдань з нанесення захисного вакуумного покриття.

Таблиця 2.7 - Технологічні параметри нанесення покриття та області використання захисного вакуумного покриття

Матеріал покриття (основи)	Температура конденсації T_K , К	Швидкість конденсації покриття V_K , мкм/хв	Товщина покриття, мкм	Рекомендована область використання покриття
Алюміній (сталь)	473-723	0,2-6,0	2-5 Більше, ніж 6	Суша атмосфера Волога атмосфера, атмосфера з домішками діоксиду сірки; тропічний клімат
	393-733	0,2-6,0	Більше, ніж 20	Висока температура (973 К)
	733-773	-	Більше, ніж 10	
	473-673	4-6	2,5-8,0 0,5-1,0	Продуктове середовище (консервна тара) Те саме (тара з лаковим покриттям)
	413-733	До 6	5-15	Водяні розчини за наявності іонів хлору
Алюміній (магнієві сплави)	553-613	1,0	50-80	Атмосферна корозія; декоративні покриття
	573		Більше 40	Дехлороване рідинне середовище (дистильована вода)
	553-613		30-80	Середовище з іонами хлору зі збільшенням товщини від 40 до 80 мкм, захисно-декоративні показники поліпшуються
Титан (сталь)	633-1123	5-6	20-25	Середовище, що вміщує іони хлору (безпористі покриття)
	1323-1463	2-6	Більше 12 30-40	Хлорвмісні середовища
	Вище 873		До 15-20	Продуктові середовища Ті самі (тара з лаковим покриттям)

Продовження табл. 2.7

Матеріал покриття (основи)	Температура конденсації T_k , К	Швидкість конденсації покриття V_k , мкм/хв	Товщина покриття, мкм	Рекомендована область використання покриття
Цинк (сталь)	373-393 (з попереднім підігріванням сталі)	10-20 10-15 10-15	20-25 - 20	Атмосферна корозія Хлорвмісні середовища Атмосфера з домішками оксиду сірки
Свинець (сталь)	523-833	1-2	10-50	Захист від корозії при температур і навколишнього середовища до 313 К
Кадмій (сталь)	343-373	8-10 1,7- 17,0	20	Атмосферна корозія Середовище хлорвмісне з домішками діоксиду сірки
Мідь (сталь)	693-1000	2-10 4-6 4-10	5-50 20-30 20-50	Волога тропічна атмосфера Морська атмосфера Хлорвмісне середовище (без-пористі покриття)
Хром (сталь)	773-823	1-2	5-18 5-25 15-20 15 15-20	Морська атмосфера та атмосфера з домішкою діоксиду сірки Волога тропічна атмосфера без агресивних складових Морська атмосфера приекваторіальної Атлантики Хлорвмісні рідинні середовища Атмосфера північних морів
Мідь-цинк (сталь)	523-573	2-6	5-50 Більше 20	Волога тропічна атмосфера агресивних складових Морська тропічна атмосфера

Продовження табл. 2.7

Залізо-хром (сталь)-вакуумні покриття	1073-1273	3-10	Більше 25-30 20 і більш 5-50	Хлорвмісні рідинні середовища Атмосфера морська промислова, хлорвмісні рідинні середовища Волога тропічна атмосфера без агресивних складових
Олово-свинець (сталь)	383-403	5-20	10-20 20-25 15-20	Волога тропічна атмосфера без агресивних складових Камера сольового туману, морська тропічна атмосфера Рідинні хлорвмісні середовища, атмосфера з домішками діоксиду сірки
Залізо-хром (сталь)-іонні покриття	603-733	5-20	До 40 Більше 40 Більше 30 (безпористі)	Промислова волога тропічна атмосфера Водяні розчини солей, неорганічних кислот Водяні розчини сірчаної, азотної та соляної кислот різної концентрації
Сплав Fe-Cr-Y (жаростійкі сплави)	-	-	75-120	Високотемпературна корозія
Олово-цинк та олово-кадмій (сталь)	383-473	-	15-25 (з підігріванням олова 1,0-1,5 мкм) 15-25	Морська субтропічна і тропічна атмосфера Камера сольового туману та 3%-й розчин NaCl
Fe-Ni-Cr (сплав на базі титану)	-	-	5-20	Рідинний кисень

ТЕМА 3 ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБІВ НАПЛАВЛЕННЯ ТА ПЛАКУВАННЯ. ОБРОБКА НАПЛАВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ

Наплавлення - це нанесення шару металу на поверхню заготовки або виробу за допомогою зварювання плавленням. У випадку зварювання тиском використовується термін наварювання (плакування).

Виготовлювальне наплавлення (наварювання) служить для отримання нових біметалевих (багатошарових) виробів. Такі вироби складаються з основи (основний метал), яка забезпечує необхідну конструкційну міцність, і наплавленого робочого шару (наплавлений метал) з особливими властивостями (зносостійкістю, термостійкістю, корозійною стійкістю та ін.).

Відновлювальне наплавлення (наварювання) використовується для відновлення початкових розмірів спрацьованих або пошкоджених деталей. У цьому разі наплавлений метал за складом і властивостями може бути близьким до основного (відновлювальне розмірне наплавлення) або відрізнитися від них (відновлювальне зносостійке наплавлення).

Формування валиків. У більшості випадків нанесення шару металу на поверхню заготовки або виробу реалізується наплавленням валиків, формування яких здійснюється кристалізацією розплавленого основного і електродного матеріалів теплом джерела нагрівання, що переміщається відносно поверхні виробу.

3.1 Характеристика способів наплавлення та плакування

Способи наплавлення, як і способи зварювання, класифікуються за трьома ознаками - фізичними, технічними, технологічними.

Найбільш поширена та зручна класифікація за *фізичними ознаками* (використане джерело нагрівання). За цими ознаками основні способи наплавлення та наварювання можна поділити на три

групи:

- *термічні* (електродугова, електрошлакова, плазмова, електронно-променева, лазерна (світлова), індукційна, газова, пічна);
- *термомеханічні* (контактна, прокаткою, екструдкуванням);
- *механічні* (вибухом, тертям).

Нижче наведені характеристики основних способів наплавлення, їх сфери застосування, переваги та недоліки.

Ручне дугове наплавлення покритим електродом - спосіб, універсальний, придатний для наплавлення деталей різної конфігурації у всіх просторових положеннях.

Основна відмінність наплавлення від зварювання - необхідність забезпечити мінімальну глибину проплавлення при високій продуктивності розплавлення присадного матеріалу. Тому, звичайно, ручне дугове наплавлення здійснюється “кутом вперед”, оскільки в цьому випадку забезпечується і мінімальне проплавлення основного металу.

Легування наплавленого металу проводиться через осердя електрода і (або) через покриття. При товщині наплавленого шару не меншій, ніж 2 мм, застосовують електроди діаметром 3 мм, при більший - діаметром 4-6 мм. Густина струму дорівнює 11-12 А/мм².

Основні переваги: простота і доступність обладнання та технології. Можливість отримання наплавленого металу будь-якої системи легування.

Недоліки: низька продуктивність; важкі умови праці; нестійкість якості наплавленого шару; велике проплавлення основного металу.

Напіваавтоматичне та автоматичне дугове наплавлення - механізоване під флюсом одним дротом (суцільним чи порошковим) або стрічкою (холоднокатаною, порошковою або спеченою). Легування наплавленого металу виконується, як правило, крізь електродний метал; легуючі флюси застосовують рідко.

Багатоелектродне наплавлення під шаром флюсу - під час наплавлення одна головка здійснює наплавлення кількома дротами, що подаються одночасно, утворюється єдина ванна значної ширини. Однією з основних проблем при здійсненні багатоелектродного наплавлення є забезпечення надійності та рівномірності подавання електродних дрітків.

Дугове наплавлення в середовищі захисного газу - легування

можливе лише за допомогою присадного металу (суцільний дріт, стрічка, порошковий дріт) або заздалегідь нанесеної шихти.

Способи наплавлення в середовищі захисного газу, як і способи зварювання, можна класифікувати за кількома ознаками:

- наплавлення електродом, що плавиться чи не плавиться;
- наплавлення суцільним дротом, холоднокатаною стрічкою, порошковим дротом, порошковою стрічкою, спеченою стрічкою;
- наплавлення в середовищі активних інертних газів, у суміші газів, самозахисними дротами і стрічками.

Дугове наплавлення самозахисними порошковими дротами та стрічками забезпечує стабільність дуги, легування і захист розплавленого металу за допомогою компонентів осердя електродного матеріалу. При дуговому напавленні внаслідок більшого пропавлення основного металу необхідний склад напавленого металу вдасться одержати тільки в третьому-п'ятому шарах. Електродугове напавлення (його різні способи) використовується практично в усіх галузях виробництва.

Основні переваги: універсальність, велика продуктивність, можливість отримання напавленого металу будь-якої системи легування.

Недоліки: велике пропавлення основного металу, особливо при напавленні дротом.

Вібродугове напавлення - це різновид електродугового напавлення металевим електродом. Вібрація електрода та охолодна рідина визначають істотні кількісні та якісні відмінності процесів при вібродуговому напавленні і характеризують його як окремий своєрідний спосіб напавлення.

Електрошлакове напавлення. В основу електрошлакових технологій покладено процес виділення теплоти в розплавленому шлаку при проходженні крізь нього електричного струму. Електрошлакове напавлення здійснюється в горизонтальному, вертикальному або нахиленому положенні, як правило, з примусовим формуванням напавленого шару. Електроди можуть бути нерухомими, і їх розплавлення буде здійснюватися внаслідок постійного підйому шлакової і металевої ванн. Якщо ж електроди рухомі, то їх в міру розплавлення безперервно подають у шлакову ванну. Можлива також комбінація цих засобів.

Електроди, що плавляться, виготовляються у вигляді дротів і

стрічок суцільного перерізу, або порошкових, пластин, дротиків, труб та ін. Електроди, що не плавляться, як правило, виготовляються з міді, графіту, вольфраму або використовують з них різноманітні комбіновані конструкції.

До присадних матеріалів напругу не підводять, і вони служать лише для формування наплавленого шару. Присадні матеріали мають, як правило, таку саму форму, що й електродні. Крім того, при ЕШН застосовуються зернисті і рідинні присадні матеріали. У деяких випадках використовують комбінації різноманітних типів присадних матеріалів.

Цей спосіб застосовується в металургійному виробництві для наплавлення прокатних валків, у виробництві заготовок для прокатки біметалу, в гірничорудному виробництві, відновлення зубів великогабаритних шестерень, у машинобудуванні для наплавлення штамів. Антикорозійне наплавлення стрічками застосовується в ядерному, енергетичному і нафтохімічному машинобудуванні.

Основні переваги: стійкість процесу в широких межах густини струму (від 0,2 до 300 А/мм²); висока продуктивність; можливість наплавлення сплавів із підвищеною схильністю до утворення тріщин; можливість наплавлення за один прохід шарів великої товщини; можливість надавати наплавленому металу необхідної форми та поєднувати з електрошлаковим зварюванням.

Недоліки: велика погонна енергія процесу викликає перегрівання основного металу і зони термічного впливу; неможливість отримання наплавлених шарів малої товщини (крім способів горизонтального наплавлення стрічками); багато часу витрачається на підготовчі операції.

Плазмове наплавлення - механізований процес, при якому джерелом теплоти є плазмова дуга, а присадними чи електродними матеріалами - суцільні чи порошкові дроти, нерухома присадка у вигляді литих чи спечених кілець, гранульовані порошки. Завдяки можливості регулювання в широкому діапазоні співвідношення між тепловою потужністю дуги і подачею присадного (електродного) матеріалу більшість способів плазмового наплавлення забезпечують досить високу продуктивність при мінімальному проплавленні основного металу.

Наплавлений виріб може бути нейтральним (наплавлення плазмовим струменем) або ввімкненим в електричне коло джерела

живлення дуги (наплавлення плазмовою дугою). Найбільшого поширення отримало плазмово-порошкове наплавлення, оскільки порошки можна виготовляти практично з кожного придатного для наплавлення сплаву. Завдяки характерному для плазмового наплавлення малому проплавленню основного металу необхідна твердість і заданий хімічний склад напавленого металу забезпечується вже на відстані 0,3-0,5 мм від поверхні наплавлення, що дає можливість обмежитися одношаровим наплавленням там, де електродуговим способом необхідно наплавити 3-4 шари.

Плазмове наплавлення використовується для наплавлення клапанів та сідел ДВЗ, деталей нафтохімічної, енергетичної та загальнопромислової запірної арматури, різального інструмента різноманітного призначення.

Основні переваги: висока якість напавленого металу; мала глибина проплавлення основного металу при високій міцності зчеплення; можливість наплавлення відносно тонких шарів.

Недоліки: невелика продуктивність; складне обладнання.

Індукційне наплавлення - полягає в тому, що деталь поміщують в індуктор, який живлять змінним струмом високої частоти (СВЧ). У масі металу деталі чи компактної присадки індукуються вторинні змінні струми тієї ж частоти, що розподіляються в поверхневому шарі металу, і нагрівають цей шар. Чим вища частота струму, тим тонший шар металу, що нагрівається. Після того як метал нагріється вище за точку Кюрі, глибина проникнення індукованих струмів збільшиться в 10-20 разів (залежно від частоти), завдяки цьому розподіл температури в металі, що нагрівається, стане рівномірнішим. Деталі чи компактні присадки нагрівають до температури плавлення металу і з'єднують. Для запобігання окисненню і поліпшенню сплавлення основного і напавленого металів застосовують флюси.

Найчастіше присадним матеріалом є шихта з металевих порошків і флюсових домішок. Металеві гранули ізольовані одна від одної частинками флюсу, внаслідок чого електропровідність порошкового шару і виділення в ньому енергії не значні. З цієї причини нагрівання і розплавлення порошкової шихти відбувається переважно внаслідок теплопередачі від основного металу.

Індукційне нагрівання СВЧ зараз застосовують у таких способах наплавлення.

Армування розплавленого поверхневого шару основного металу

тугоплавкою і важкорозчинною присадкою. При використанні цього способу як присадку застосовують зернистий реліт (карбід вольфраму) чи здрібнені металокерамічні сплави. Присадку разом із флюсом (борна кислота) наносять на поверхню деталі, що підлягає наплавленню. Потім деталь вводять в індуктор, в якому поверхневий оплавляється. Зерна присадного матеріалу при цьому не розплавляються і занурюються в оплавлений поверхневий шар. Закріплення зерен реліту в матриці відбувається внаслідок їх часткового розчинення і змочування розплавом. Армований поверхневий шар являє собою литу сталеву матрицю з вплавленими в неї зернами тугоплавкого компонента.

Заливання рідкого присадного металу на підігрітий основний метал. Після нагрівання деталі до потрібної температури у своєрідну форму заливають порції металу, розплавленого в індукційній печі чи в іншому плавильному агрегаті. Метод наплавлення рідким присадним матеріалом досить широко використовують для наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного зношування.

Розплавлення брикетованого або монолітного матеріалу на основному металі. Метод можна проілюструвати на прикладі наплавлення клапанів двигунів внутрішнього згорання. Присадним матеріалом у цьому випадку служить лите кільце з жаростійкого сплаву, який укладають у виточку на опорній поверхні клапана. Нагрівання і плавлення сплаву здійснюється в кільцевому індукторі, що охоплює ділянку, де відбувається наплавлення. Температура нагрівання на 50-100 °С перевищує температуру плавлення сплаву. Наприкінці процесу поверхня клапана, протилежна тій, що наплавляється, змочується водою зі спреєра, що забезпечує спрямовану кристалізацію сплаву і його підвищені експлуатаційні властивості.

Занурення підігрітої деталі у форму-тигель з розплавленим сплавом. При цьому способі підігріту в індукторі деталь занурюють у керамічну форму з розплавленим металом. Керамічна форма повторює контури поверхні, що зміцнюється. Розплавлення присадного матеріалу здійснюється індуктором. У цьому випадку не має значення співвідношення температур плавлення основного і присадного металів. Спосіб застосування обмежений, незважаючи на зовнішню простоту.

Відцентрове наплавлення деталей циліндричної форми.

Найбільшого поширення цей спосіб одержав при виготовленні різних біметалевих втулок. Відомі два варіанти реалізації цього способу наплавлення, що розрізняються між собою застосовуваним присадним матеріалом. Можна використовувати присадний матеріал у твердому стані у вигляді металевих порошків, стружки тощо. У першому варіанті плавлення присадки відбувається завдяки теплопередачі від основного металу, що нагрівається, СВЧ. За другим варіантом присадний метал плавлять в окремій місткості і заливають у розплавленому стані всередину обертового циліндра, що наплавляють.

Особливим є формування наплавленого металу під дією відцентрових сил, що, з одного боку, сприяють більш рівномірному розподілу розплаву на основному металі і видаленню шкідливих домішок, а з іншого, - збільшують ліквідаційні явища. Тому при напавленні необхідно застосовувати спеціальні технологічні прийоми: регламентувати кількість металу, що заливається, температуру і тривалість нагрівання, число обертів відцентрової машини, швидкість охолодження металу й ін. Прикладами реалізації цього способу є відцентрове наплавлення гільз автомобільних двигунів, гільз гідроциліндрів і коліс черв'ячних машин.

Основні переваги: мала глибина проплавлення основного металу; можливість наплавлення тонких шарів; висока ефективність в умовах серійного виробництва.

Недоліки: низький ККД процесу; перегрівання основного металу; необхідність використання для наплавлення тільки тих матеріалів, які мають температуру плавлення нижчу за температуру плавлення основного металу.

Лазерне (світлове) наплавлення. Розроблено три способи лазерного наплавлення: з подачею порошку в зону плавлення, оплавлення попередньо нанесених порошкових паст (шлікерних покриттів); оплавлення напилених шарів.

Лазерне наплавлення з транспортуванням до зони лазерної плями порошку за допомогою газу називається *газопорошковим лазерним наплавленням* (ГПЛН).

Формування валика при цьому відбувається нарощуванням від основи до поверхні валика. Процес характеризується мінімальним тепловим впливом на матеріал основи. Для транспортування

порошку в зону обробки застосовуються повітря, азот, гелій, аргон, вуглекислий газ. При наплавленні самофлюсівних порошків тип газу практично не впливає на процес формування покриттів. При використанні несамофлюсівних порошків необхідно застосовувати інертні гази, оскільки на повітрі відбувається окиснення порошків і як наслідок - пороутворення і несплавлення частинок у валиках. При цьому найкращі технологічні властивості мають гранульовані порошки з розміром частинок 40-160 мкм.

Потрібний склад і властивості наплавленого металу можна отримати вже в першому шарі невеликої товщини. Лазерно-порошковим методом наплавляють колінчасті та розподільні вали ДВЗ, клапани і деякі інші деталі.

При лазерному наплавленні з оплавленням шлікерних покриттів чи, інакше, шлікерного лазерного наплавлення найбільш важливим є вибір зв'язувальної речовини для готування пасти. Якщо необхідне накладання поряд наступного валика, то у більшості випадках потрібно відновити шар пасти. Тому процес лазерного наплавлення з оплавленням шлікерних покриттів перспективний при нанесенні одиничних валиків.

Лазерне переплавлення напилених покриттів дозволяє одержання товстих поверхневих шарів із перекриттям смуг. Перевагами цього методу над лазерним шлікерним наплавленням є: відсутність вигоряння шару по боках від оплавленого об'єму, повніше використання порошку, відсутність кіптяви і сажі. Одночасно в цьому випадку вдається поліпшити властивості напилених покриттів, особливо їх міцність зчеплення з основою, що після напилення не перевищує 70 МПа.

Основні переваги лазерного наплавлення: мале і контрольоване проплавлення при високій міцності зчеплення; можливість отримання тонких (не менше, ніж 0,3 мм) шарів; невеликі деформації наплавлених деталей; можливість наплавлення важкодоступних поверхонь.

Недоліки: низька продуктивність; невеликий ККД; складне обладнання, яке дорого коштує.

Електронно-променеве наплавлення використовує для наплавлення електронний промінь і дає можливість регулювати нагрівання і плавлення основного і присадного матеріалів, а також зводити до мінімуму їх перемішування. Наплавлення виконується з

присадкою суцільним або порошковим дротом. Оскільки наплавлення виконується у вакуумі, то шихта порошкового дроту може складатися з одних легуючих компонентів.

Основні переваги: мале та контрольоване проплавлення основного металу; можливість наплавлення шарів малої товщини.

Недоліки: складність обладнання, яке дорого коштує; необхідність біологічного захисту персоналу.

Газове наплавлення. При такому напавленні метал нагрівається і розплавляється полум'ям газу, який спалюється в суміші з киснем у спеціальних пальниках. Горючий газ - ацетилен або його замінники: пропан-бутанова суміш, природний газ, водень та ін. Відоме газове наплавлення з присадними дротиками або з удуванням порошку в газове полум'я. Воно широко використовується при ремонті сільськогосподарської та автомобільної техніки, а також для наплавлення релітом бурових долотів і деталей гірничорудної техніки, яка швидко спрацьовується.

Основні переваги: мале проплавлення основного металу; універсальність технології; можливість наплавлення тонких шарів.

Недоліки: низька продуктивність; нестабільність якості напавленого шару.

Пічне наплавлення композиційних сплавів засноване на просочуванні твердих тугоплавких частинок (карбідів) зв'язувальним сплавом в умовах автовакуумного пічного нагрівання. Деталь розміщують у робочій камері, між стінкою якої і поверхнею основи створюється зазор, що дорівнює товщині нанесеного шару. Зазор заповнюють зернами наповнювача. У верхній частині камери встановлюється бункер із подрібненими кусками зв'язуючого. Камера герметизується зварюванням і завантажується в піч, де в умовах безокиснювального нагрівання до 1150 °С проходить плавлення зв'язуючого і його фільтрацію крізь пористе середовище наповнювача. Заповнений простір зазору відповідає отриманому покриттю.

Як зносостійку складову сплаву найчастіше використовують карбід вольфраму (реліт) гранулюванням 0,4-2,5 мм або подрібнені відходи спечених твердих сплавів типу WC-Co. Зв'язувальний сплав містить у собі приблизно 20 % Mn, 20 % Ni, 60 % Cu. Використовується він переважно для відновлення і зміцнення зрівноважувальних клапанів, для виготовлення універсальних футерованих

елементів, за допомогою яких потім зміцнюються різноманітні деталі, що швидко зношуються.

Основні переваги: можливість наплавлення виробів складної форми.

Недоліки: необхідність виготовлення металовмісного оснащення, яке після закінчення процесу викидається в металобрухт; багато часу витрачається на підготовчі операції.

Електроконтактне наплавлення. Суть процесу відновлення електроконтактним наварюванням полягає в приварюванні потужними імпульсами струму до поверхонь деталей сталльної стрічки, порошоків чи дроту. З'єднання основного і присадного металу здійснюється внаслідок їх спільної пластичної деформації, яка супроводжується протіканням крізь місце контакту імпульсів струму.

Для електроконтактного приварювання металевих шару розроблено спеціалізоване обладнання, але за необхідності для цього можна використовувати переоснащені машини для шовного зварювання. Електроди виготовляють зі спеціальних мідних сплавів БрХ1, БрВНТ1,9 та ін. Присадні матеріали - сталева стрічка, дріт, порошки та їх суміші. Використовується наплавлення при ремонті і відновленні валів, осей, штоків, фланців, барабанів із зношуванням за діаметром приблизно 1,0-1,5 мм.

Основні переваги: відсутність проплавлення основного металу; мінімальні деформації наплавлених деталей; можливість наплавлення шарів малої товщини.

Недоліки: низька продуктивність процесу; обмежена номенклатура наплавлених деталей.

Плакування прокатуванням полягає в спільній деформації смуг чи стрічок, зібраних у пакет. Прокатування застосовують і для одержання фасонних біметалевих профілів, труб, дротиків і дроту. При цьому деформація може здійснюватися як у гарячому, так і в холодному стані.

Гаряча прокатка є основним промисловим способом виробництва широкого класу біметалів, плакований метал виготовляють зі спеціальних багат шарових зливків.

Плакування використовується переважно для виготовлення товстих та тонких листів, смуг, складних профілів, дротиків і дротів. Виготовляють біметалеві листи (конструкційна сталь + нержавіюча сталь), зносостійкий плакований прокат для металургійної,

гірничодобувної промисловостей, сільськогосподарського машинобудування.

У даний час найбільш ефективним способом виробництва біметалів невеликої товщини є ролонна прокатка.

При одержанні біметалевих дротиків використовують прокатку складеної заготовки в калібрах системи ромб-квадрат і коло-овал. Одержана прокаткою круга заготовка відправляється на подальше волочіння дроту для електротехнічної, хімічної й інших галузей промисловості. Як основу біметалу використовують вуглецеві і низьколеговані сталі, а як плакувальний шар - Cu, Al, Ni та інші метали і сплави.

Плакування екструдуюнням.

Екструзія - це продавлювання матеріалів крізь отвір в інструменті. При виробництві круглих і фасонних біметалевих профілів широко використовують метод гарячого пресування, який базується на спільному витіканні металів, що з'єднуються, крізь матрицю. При плакуванні за допомогою екструзії як матеріали використовують порошки, гранули, матеріал суцільного перерізу.

Основні переваги: висока продуктивність; відсутність перемішування основного і плакованого металів; широкий діапазон співвідношення товщин основного і плакованого шарів; можливість отримання спецпрофільів із місцевим плакуванням; відносно невеликі залишкові деформації.

Недоліки: обмеженість сортаменту матеріалів для плакованих шарів біметалу; багато часу займають підготовчі операції; обмеженість номенклатури деталей, які можуть виготовлятися з плакованого прокату.

Плакування з використанням енергії вибуху. Джерелом енергії при плакуванні вибухом служать вибухові речовини (ВР). При вибуху хімічна енергія ВР частково перетворюється в механічну енергію метання пластини, а частково витрачається на нагрівання продуктів детонації і навколишнього середовища зі створенням у них ударних хвиль. Механічна енергія частково витрачається на нагрівання металу пластин, що з'єднуються, унаслідок пластичної деформації, явища кумуляції, створення в металі хвиль напружень і частково розсіюється.

Усі схеми плакування вибухом передбачають рух пластини, що метається, вбік нерухомої пластини чи взаємний зустрічний рух

елементів, які зварюються.

Для безпосереднього плакування деталей або отримання багатошарових заготовок широко використовується вибухове плакування пластичними корозійностійкими сталями та сплавами. Застосування особливих способів підготовки плакованих листів дало змогу використовувати енергію вибуху для плакування низьковуглецевих сталей малопластичними інструментальними сталями Х6Ф1, Х12, Р6М5 та виготовляти бі- та триметали для нафтохімічного та сільськогосподарського машинобудування.

Основні переваги: можливість з'єднання металів, зварювання яких іншими способами складне або неможливе; відсутність проплавлення основного металу; мінімальна деформація при зварюванні.

Недоліки: необхідність у спеціальних майданчиках; багато часу займають підготовчі операції.

Напавлення тертям можна здійснювати як на поверхню обертання (циліндричну, конічну, фасонну), так і на плоску поверхню заготовки. Матеріал, що наплавляють, у вихідному стані, може бути або монолітним (у вигляді литого чи прокатного дротика), або гранульованим (у вигляді спресованого брикету, стружки, порошку).

Суть способу напавлення монолітним матеріалом полягає в тому, що при терті торця дротика матеріалу, що наплавляється, об поверхню заготовки відбувається їх розігрівання до пластичного стану й утворення металевих зв'язків між ними.

При напавленні гранульованим матеріалом (стружка, порошок) під впливом тиску відбувається відносне переміщення гранул матеріалу, що наносяться, гранульований метал ущільнюється, швидко нагрівається, здійснюється його спікання і формування напавленого шару.

Основними технологічними параметрами процесу напавлення тертям є колова швидкість V і тиск P на поверхні тертя. Значення цих параметрів здебільшого визначаються фізичними характеристиками основного матеріалу, і особливо коефіцієнтом тертя та температурою плавлення матеріалу, що наноситься. Наприклад, при напавленні кольорових сплавів типу бронз і латуней на сталеві і чавунні заготовки оптимальні значення основних параметрів режиму напавлення: швидкість відносного руху на поверхні тертя $V = 2,5-6$ м/с; тиск на торцевій поверхні тертя $P = 20-60$ МПа.

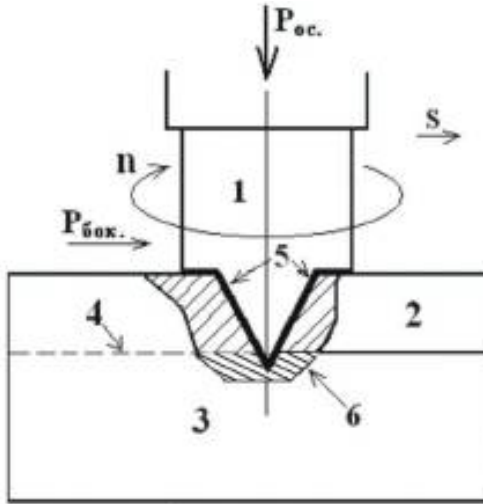
Основні переваги: можливість наплавлення тонких шарів; відсутність перемішування основного і наплавленого металів; низькі затрати електроенергії.

Недоліки: низька універсальність; необхідність для наплавлення кожної деталі присадних матеріалів, визначених геометричних розмірів і спеціалізованого обладнання або оснащення; мала продуктивність; відсутність виробництва матеріалів для наплавлення; дефекти наплавленого шару; крайові несплавлення і несплавлення в місцях сусідніх валиків.

Наплавлення тертям з перемішуванням відбувається без об'ємного плавлення в зоні зварювання за рахунок тепла, що виділяється при терті, тому більшість металів і сплавів можуть бути зварені між собою практично без втрати міцності.

Ускладнення у випадку застосування такої технології виникають при напавленні металевих матеріалів, з неметалевими включеннями, зокрема, сталей, що містять сірку.

При напавленні, поверхні деталі попередньо шліфують для видалення дефектів та одержання рівної площини. На шліфовану поверхню деталі (3) накладають мідну або нікелеву плиту необхідної товщини (2). Інструмент (1) спеціальної конструкції закріплюється в шпинделі верстата, аналогічного фрезерному, рис. 3.1. Під час роботи він заглиблюється в зварювану плиту та поверхню кристалізатора з осьовою силою $P_{ос}$, здійснює обертальний та поступальний рух з боковою силою $P_{бок}$. Під час руху інструменту накладена мідна пластина і пластина кристалізатора нагріваються до температури пластичного стану останньої (6). Пластифікований тепловиділенням метал за рахунок сил тертя закручується відносно осі обертання інструменту, що має спеціальну конструкцію робочої поверхні, змішує в зоні шва обидва матеріали та «закидає» у вільний простір, що утворився за інструментом. Під час руху інструменту стиком зварюваних поверхонь відбувається перемішування та перенесення металу з утворенням зварного шва. Робоча поверхня (5) інструмента працює в умовах тертя при високих температурах, напруженнях згину.



1 – інструмент, 2 – матеріал, що наплавляється, 3 – деталь 4 – шов з'єднання, 5 – робоча поверхня інструменту, 6 – зона наплавлення

Рисунок 3.1 – Схема процесу наплавлення перевішуванням матеріалу на плиту

Основні переваги технології наплавлення тертям з перемішуванням:

– відмінні якість та властивості зварного шва за рахунок значно нижчої температури процесу (0,6 Тпл.) та однорідності структури наплавленого матеріалу (наплавлення у твердій фазі);

- низька деформація зварної конструкції;
- висока стабільності розмірів та повторюваності процесу;
- немає «вигорання» легуючих елементів;
- високі механічні властивості зварного шва;
- дрібнозерниста структура металу зварного шва;
- відсутність тріщин усадки;
- висока швидкість наплавлення;
- не вимагає додаткової термообробки шва;
- широкий спектр матеріалів.
- не обов'язково використання захисних газів;
- мінімальні вимоги для чищення поверхонь зварювання;
- не вимагає флюсів;
- нульовий рівень викидів.
- низька споживана потужність (2,5% енергії, що споживається

у лазерному зварюванні, 10% енергії, що споживається при дуговому зварюванні);

- зниження ваги конструкцій;
- не вимагає зварювальних матеріалів;
- швидкої окупності завдяки низьким енергоспоживанням і відсутності витратних матеріалів;

Технологічні показники способів наплавлення наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Технологічні показники способів наплавлення

Спосіб наплавлення	Продуктивність, кг/год	Частка основного металу в наплавленому, %	Товщина наплавленого шару, мм (один прохід)
Ручний, дуговий, покритими електродами	0,8-3,0	20-50	2,0-5,0
Напівавтоматичний і автоматичний дуговий	0,8-3,0	20-50	2,0-5,0
Електрошлаковий	10-200	5-20	1,5-50,0
Плазмовий	0,8-6,0	5-15	0,3-6,0
Індукційний	2-15	5-15	0,4-3,0
Лазерний (світловий)	1,0-2,0	0,1-1,5	0,1-3,0

Продовження табл.3.1

Спосіб наплавлення	Продуктивність, кг/год	Частка основного металу в наплавленому, %	Товщина наплавленого шару, мм (один прохід)
Електронно-променевий	1,0-2,0	3,0-10,0	0,5-3,0
Газовий	0,5-3,0	1-3	0,3-3,0
У печах	-	-	-

композиційних сплавів			
Електроконтактний	0,5-1,5 м ² /год	-	0,2-1,5
Плакування прокатуванням і екстрадуванням	-	-	0,5-30,0
Плакування вибухом	-	-	-
Наплавлення тертям	-	-	0,3-0,5

3.2 Підготовка поверхні до наплавлення.

Під час підготовки деталей до наплавлення проводиться їх очищення та підготовка поверхні деталей до наплавлення.

Для якісного і продуктивного очищення деталей при зменшених енерговитратах використовують розчинно-емульгувальні засоби (РЕЗ) типу АМ-15, ДВП-1, Термос, РИТМ, РИТМ-76. Температура розчину для перших засобів - від 20 до 40 °С, а для РИТМ - 20 °С.

Стару фарбу видаляють змивками марок СД і АФТИ, продукти корозії - кислотними та лужними розчинами.

Від нагару і накипу деталі очищають у розплаві солей та лугів при температурі 390-410 °С. Нагар, іржу та стару фарбу часто видаляють газополумєновими методами та металевими щітками, пневматичним інструментом металевим піском з розміром частинок 0,5-0,8 мм, який подають повітрям під тиском 0,5-0,6 МПа.

Для отримання якісного зчеплення напавленого шару з основою в деяких випадках потрібно зняти поверхневий шар основного металу, властивості якого під час експлуатації суттєво змінилися. Ця операція виконується за допомогою металорізальних верстатів та ручного механізованого інструмента або вирубкою зубилами.

При відновленні деталей, які мають дефекти у вигляді місцевого зношування, іноді потрібно зробити канавку чи вибірку для подальшого наплавлення. Дуже важливо, щоб глибина канавки

була достатньою для видалення всього поверхневого шару металу зі зміненими властивостями. У виборках та канавках не повинно бути гострих внутрішніх кутів, що при наплавленні стають концентраторами напружень. На бокових стінках канавок та виборок бажано, щоб були зовнішні кути нахилом 30-50°.

3.3 Обробка наплавлених поверхонь

3.3.1 Механічна обробка

Поверхні деталей, відновлені наплавними процесами, мають по перерізу неоднорідні фізико-механічні властивості, хімічний склад і мікроструктуру. Механічні властивості наплавленого шару (міцність, твердість і ін.) найчастіше значно вищі, ніж у матеріалі самої деталі. Товщина покриття, яке наносять, набагато більша за величину зношування. Так, для компенсації зношування 0,2-0,5 мм наплавляють шар до 1,0-1,2 мм. Ці фактори істотно впливають на технологію і трудомісткість обробки різанням наплавлених на деталі шарів.

Для правильного вибору товщини наплавленого шару треба враховувати припуски на механічну обробку.

Припуск - шар матеріалу, що видаляється з поверхні заготовки з метою досягнення заданих властивостей поверхні, що обробляється.

Проміжний припуск - припуск, що видаляється при виконанні одного технологічного переходу.

Допуск припуску - різниця між найбільшим і найменшим значеннями розміру припуску. Допуск необхідно враховувати при визначенні припуску, тому що одержання заготовки точно встановлених розмірів неможливе. Припуск на обробку і допуски на розміри заготовок залежать від багатьох факторів: заготовки, її конфігурації, розмірів, типу і способу виготовлення; висоти мікронерівностей, що залишилися від попередньої обробки; товщини дефектного поверхневого шару; сумарного значення просторових відхилень; похибки установки заготовок при виконанні операцій.

Практично припуск перерозподіляють між попередньою й остаточною чи чорною і чистовою, обробками. Рекомендується на чорнову обробку залишати до 60 % сумарного припуску, а на

чистову - до 40 % чи припускають 45 % - на чорнову обробку, 30 % - на напівчистову і 25 % - на чистову обробку. Припуски задають з врахуванням термічної обробки, результатом якої може бути деформація деталей.

Правильний вибір характеристик абразивного інструмента і режимів шліфування визначає якість і продуктивність обробки. Вибір матеріалу і марки абразивного інструмента залежить від матеріалу деталей, що шліфуються.

У ремонтному виробництві при абразивній обробці деталей, відновлених наплавними методами, застосовують електрокорундовий інструмент.

Нормальний електрокорунд марок 13А, 14А, 15А використовують головним чином для шліфування незагартованих сталей, а білий електрокорунд марок 22А, 23А, 24А - для загартованих вуглецевих і легованих сталей. Зв'язуюче в обох випадках - кераміка.

При шліфуванні деталей із чавуну і кольорових сплавів застосовують чорний карбід кремнію марок 53С і 54С. Застосування електрокорунду на операціях обдирного і чистового шліфування наплавлених поверхонь зумовлено його високою крихкістю і схильністю до самозагострювання з утворенням нових гострих різальних крайок.

Значно вища різальна здатність і стійкість інструмента при обробці зносостійких покриттів досягається при *електроалмазному шліфуванні* кругами на струмопровідних металевих зв'язуючих. Так, при електроалмазному шліфуванні покриття кругами 100 % середня об'ємна здатність до різання становить $6,8 \text{ мм}^3/\text{с}$, а при обробці абразивними кругами - $1,9 \text{ мм}^3/\text{с}$.

Для шліфування покриттів, отриманих електроконтактним припіканням порошків ПЖ-4, ПЖ-5, рекомендується застосовувати круги з титанистого електрокорунду на керамічному зв'язуючому зернистості 16-40.

При відновленні деталей гірничошахтного і металургійного устаткування, що швидко зношується, товщина наплавленого шару досягає 10 мм і більше. Для обробки таких поверхонь ефективно обдирне шліфування на спеціальних верстатах з регульованою силою притиску круга до деталі.

Основною вимогою до процесу обдирного шліфування є

досягнення найбільшої швидкості знімання металу при мінімальному зношуванні інструмента. Для цих цілей використовують грубозернисті круги з нормального чи цирконієвого електрокорунду на бакелітовому зв'язуючому, міцність кругів на якому дає змогу працювати із силою притиску круга до деталі до 10 кН.

Для обробки внутрішніх циліндричних наплавлених поверхонь часто використовують хонінгування. Нові хонінгувальні бруски певний час припрацьовують на бракованих деталях. Для прискорення процесу припрацьовування застосовують абразивний порошок, змішаний із солідолом. Зернистість порошку має бути на один-два номери більша, ніж зернистість брусків. Припрацьовування роблять на робочих режимах хонінгування, але без подачі мастильно-охолодної рідини (ЗОР) припиняють, коли площа контакту брусків з оброблюваною поверхнею досягне 65-75 %.

Як ЗОР при хонінгуванні на ремонтних підприємствах найчастіше використовують суміш гасу з машинним мастилом, але ця суміш вогнебезпечна і токсична, тому рекомендується використовувати мастильну рідину (температура спалаху не менша, ніж 94 °С). При обробці чавунних деталей ЗОР і гасо-мастильна суміш практично еквівалентні за всіма показниками; при обробці сталевих загартованих деталей ЗОР збільшує швидкість знімання металу до 1,5 разів і зменшує питому витрату алмазів у два рази.

Використання грубозернистих брусків дозволяє замінити хонінгуванням внутрішнє шліфування, розточування, зенкерування і розгортання.

При обдирному хонінгуванні, що заміняє операцію розточування, рекомендується використовувати бруски з полікристалічних алмазів - 50 %.

Досить широко застосовують *полірування еластичними інструментами*. Інструментальна промисловість випускає алмазні еластичні скінченні і нескінченні стрічки, а також еластичні диски. Алмазний еластичний інструмент складається з рифленого алмазовмісного шару і несучої основи з просоченої лавсанової тканини. Між цими шарами знаходиться шар гуми, що підвищує еластичність інструмента і поліпшує його експлуатаційні властивості.

Вибір зв'язуючого визначається шорсткістю оброблюваної поверхні. Так, особливо еластичне зв'язуюче Р1 застосовують для

тонких полірувальних операцій ($Ra = 0,02-0,4$ мкм), напівтверді зв'язуючі P9 і P11 - для звичайного полірування ($Ra = 0,16-0,32$ мкм), тверді зв'язуючі P14 і P18 - для чистового шліфування ($Ra = 0,164-0,63$ мкм).

Для підвищення продуктивності процесу полірування при обробці довговимірних деталей застосовують стрічково-полірувальні пристрої з двома-трьома стрічками.

Режими полірування сталевих загартованих деталей (49-53 HRC): швидкість деталі 0,4-0,6 м/с; швидкість стрічки 12-18 м/с; поздовжня подача 0,24-0,35 мм/об; зусилля притиску 80-100 Н.

Полірування на зазначених режимах стрічкою забезпечує знімання металу 3-5 мкм і зниження шорсткості поверхні від $Ra = 0,64-7-0,4$ до $Ra = 0,3-7-0,2$ мкм.

Порівняно з процесом полірування абразивними стрічками машинний час при обробці еластичним інструментом зменшується в три-чотири рази, і значно скорочується час, що витрачається на заміну інструмента, оскільки стійкість алмазних стрічок у сотні разів вища, ніж абразивних.

У тих випадках, коли необхідно зняти товстий шар металу, доцільно застосовувати точіння і фрезерування, оскільки ці процеси мають вищу продуктивність порівняно зі шліфуванням.

Точіння наплавлених поверхонь твердістю до 41,5-46 HRC можна здійснити інструментом із твердих сплавів Т15К6, Т5К10, ВК6, ВК8 зі зниженням швидкості різання на 15-20 %. Для чорнового точіння поверхонь, наплавлених дротом 30ХГСА, електродом ЕН-60М та іншими дротами твердістю 46-61,5 HRC, рекомендується інструмент із дрібнозернистих твердих сплавів ВК3М і ВК6М. Обов'язковою умовою для чоргової обробки є застосування різців із зовнішніми кутами, які забезпечують підвищену міцність робочої частини різця при точінні.

Для чистової обробки наплавлених деталей із підвищеною твердістю рекомендується інструмент з ельбору-Р і гексаніту-Р.

При обробці деталей використовують інструмент із безвольфрамових матеріалів, у тому числі з надтвердих матеріалів (НТМ) на основі синтетичних алмазів і композитів на основі нітриду бору. Інструмент з НТМ має досить високу твердість, температурну і розмірну стійкість, здатність тривалий час зберігати крайку, що ріже. Це дозволяє одержувати необхідні шорсткість і точність поверхні при чистовій обробці деталей.

3.3.2 Термічна обробка

У багатьох випадках більш доцільною є термічна обробка загартованих при наплавленні поверхонь і потім обробка їх на металорізальних верстатах на форсованих режимах. Після розмірної обробки проводять кінцеву термообробку. Крім того, термообробку проводять для зниження залишкових напружень та підвищення ударної в'язкості наплавлених деталей. Далі наведено дані щодо термообробки наплавлених деталей.

Загартування аустенітних сталей полягає в нагріванні до температури 1050-1200 °С залежно від складу сталі з подальшим охолодженням на повітрі, в мастилі чи воді. При такій обробці в аустеніті розчиняються карбіди, і сталь стає більш гомогенною, однорідною, часто чисто аустенітною. Таку обробку називають *ауθενізацією*.

Загартування конструкційних сталей полягає в нагріванні до температури, яка на 50-100 °С вища, ніж температура завершення переходу фериту в аустеніт, невеликої витримки для забезпечення завершення цього переходу й охолодження зі швидкістю, більшою за критичну. Тривалість витримки після прогрівання приблизно 20 хв. Загартування на мартенсит є операцією проміжної термічної обробки.

Високий відпуск загартованих конструкційних сталей полягає в нагріванні до температури, нижчої за температуру переходу перліту в аустеніт. Звичайно, для сталей різного складу температура високого відпуску різна (550-650 °С). При високому відпуску загартованих конструкційних сталей відбувається розпад мартенситу з утворенням дрібної феритно-цементитної суміші - сорбіту.

Старіння з виділенням нової фази в дисперсному вигляді з твердого розчину приводить до блокування руху дислокацій і відповідно до підвищення міцності сплаву та деякого зниження його пластичності й ударної в'язкості. Така обробка використовується переважно для жароміцних аустенітних, низьковуглецевих високолегованих мартенситно-старіючих і низьковуглецевих низьколегованих конструкційних сталей. Температура старіння може становити від 300 до 650 °С.

Нормалізація - це нагрівання до температури, дещо вищої за температуру нагрівання під загартування (на 100-150 °С вище, ніж температура завершення переходу фериту в аустеніт) та наступне охолодження на повітрі. Така операція здійснюється для нормалізації зерна в сталі. При цьому забезпечуються перекристалізація і подрібнення зерна перегрітої сталі. Нормалізація застосовується як операція термічної обробки заготовок перед їх механічною обробкою, як підготовча операція перед відпуском для забезпечення рівномірності властивостей після цих операцій.

Цей вид термічної обробки використовується, як правило, для вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей. Для конструкційних сталей з підвищеним вмістом легуючих елементів (2-4 % Ni, 3-5 % Cr, >1,5 % Mn) застосування нормалізації неефективне, оскільки для цих сталей охолодження на повітрі після нагрівання до аустенітного стану може привести до часткового чи повного утворення мартенситу.

Відпуск для знімання напружень не потребує змін фазового чи структурного стану сталі, однак ці зміни дуже часто супроводжують такий відпуск. Метою розглянутої операції є зниження мікро- чи макронапружень в обробленому виробі.

Термомеханічна обробка (ТМО) сталі полягає в пластичній деформації, проведеній з метою створення підвищеної щільності дислокацій. При подальшій термічній обробці ця щільність успадковується, що є фактором додаткового підвищення міцності.

При високотемпературній термомеханічній обробці (ВТМО) деформація металу відбувається при температурі, вищій, ніж температура рекристалізації. Відразу ж після такої деформації йде загартування, а потім відпуск чи старіння.

При низькотемпературній термомеханічній обробці (НТМО) деформація здійснюється при температурі, нижчій, ніж температура рекристалізації, потім відбувається загартування і відпуск (чи старіння). При НТМО щільність дислокацій і міцність вищі, однак пластичність сталі нижча, ніж при ВТМО.

ВТМО можна використовувати з метою підвищення міцності наплавлених шарів переважно з вуглецевих і низьколегованих сталей. Для цього доцільно застосовувати проковування чи прокатування наплавленого шару, нагрітого до 850-950 °С.

ТЕМА 4. ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ КОНЦЕНТРОВАНИМИ ПОТОКАМИ ЕНЕРГІЇ

4.1 Закономірності лазерного зміцнення та легування

Фізичні основи лазерного випромінювання. Лазерне випромінювання має подвійну природу. З одного боку, воно являє собою електромагнітні хвилі, тобто коливання електричного і магнітного полів, з іншого - має корпускулярні властивості. Хвильові властивості випромінювання характеризуються частотою ν (кількість періодів коливань електричного чи магнітного поля за одну секунду) і довжиною хвилі λ (відстань між максимумами хвиль).

Хвиля поширюється зі сталою швидкістю $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Для всіх типів електромагнітного випромінювання справедливе співвідношення $\lambda \nu = c$, з якого випливає, що зі збільшенням частоти зменшується довжина хвилі випромінювання.

На рис. 4.1 зображено електромагнітний спектр і діапазон довжини хвиль випромінювання найбільш поширених нині лазерів. Після зони радіохвиль (довгохвильовий діапазон), у міру зростання частоти, розміщена мікрохвильова зона (надвисоких частот), потім інфрачервона, видима, ультрафіолетова, рентгенівська і область гамма-випромінювання.

Корпускулярна природа світла полягає у випромінюванні потоком дискретних квантів енергії - фотонів.

Кожен фотон несе певну кількість енергії, яка визначається зі співвідношення:

$$E = h\nu = hc/\lambda, \quad (4.1)$$

де h - стала Планка; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с.

Лазери, які найбільш широко використовуються, генерують випромінювання в діапазоні від 0,3 (ультрафіолетове) до 10 мкм (інфрачервоне).

Поглинання і передавання енергії. Поглинальна здатність неокисненої металевої поверхні при довжині хвилі лазерного випромінювання $\lambda = 10,6$ мкм (інфрачервоні промені технологічних CO₂-лазерів) визначається з рівняння Хагена-Рубенса:

$$A = 112,2(\sigma_0 - 1)^{1/2}, \quad (4.2)$$

де $A = 1 - R$;

R - коефіцієнт відбиття;

σ_0 - питома електропровідність металу для постійного струму, Ом/м.

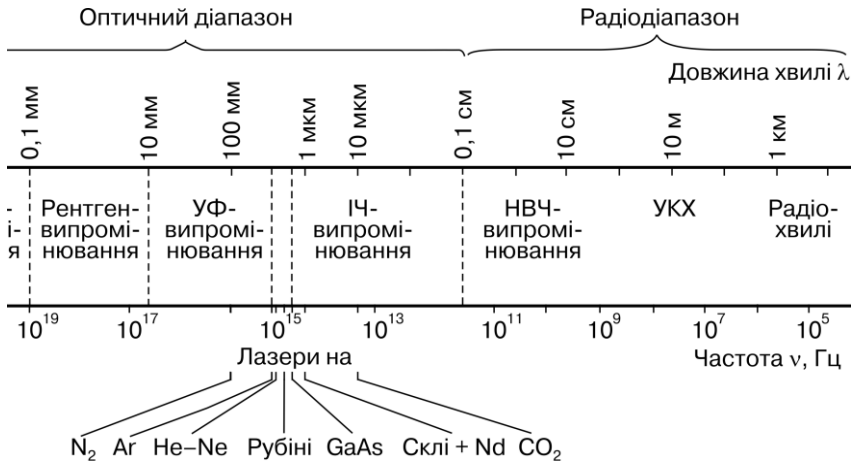


Рисунок 4.1 - Електромагнітний спектр і діапазон довжини хвиль лазерного випромінювання: УКХ - ультракороткі хвилі

Інтенсивність поглиненого випромінювання з глибиною x змінюється за експонентою відповідно до закону Бугера:

$$I(x) = I_0 A \exp(-\alpha x), \quad (4.3)$$

де I_0 - інтенсивність лазерного випромінювання, яке підводиться до поверхні матеріалу;

A - поглинальна здатність матеріалу;

α - коефіцієнт поглинання світла в даному середовищі.

Механізм поглинання лазерної енергії і переходу її в теплову енергію залежить від природи матеріалу. Для металів, оптичні властивості яких можуть бути описані за допомогою моделі вільних електронів, характерне переважно поглинання квантів світла електронами провідності (вільні електрони). Внаслідок цього підвищується енергія електронів, яка передається кристалічній ґратці

та іншим електронам. Цей процес розвивається на глибині до 10^{-7} - 10^{-6} мм за дуже короткий проміжок часу ($\sim 10^{-11}$ - 10^{-10} с).

Поступово, приблизно через 10^{-9} - 10^{-8} с, відбувається вирівнювання температури електронного газу і кристалічної ґратки, тобто можна ввести поняття загальної температури металу T .

У найбільш поширеному в практиці лазерної обробки температурному діапазоні (від сотень до кількох тисяч градусів) основний механізм передавання енергії від поверхні вглиб матеріалу - електронна теплопровідність. Променевою теплопровідністю, як правило, нехтують, оскільки вона характерна для температур поверхневого шару, більших, ніж 10^4 °С.

Глибина і швидкість проплавлення залежать від коефіцієнта температуропровідності:

$$\alpha = K/\rho c, \quad (4.4)$$

де K - коефіцієнт теплопровідності; ρ - густина матеріалу; c - питома теплоємність.

Теплова стала часу t_q визначає тривалість імпульсу, яка необхідна для забезпечення потрібної глибини проникнення теплового потоку:

$$\delta = \sqrt{4 \alpha t_q}. \quad (4.5)$$

У табл. 4.1 наведені значення коефіцієнта температуропровідності і теплової сталої часу для матеріалів різної товщини.

Із табл. 4.1 видно, що з підвищенням товщини зразка від 0,01 до 0,1 см теплові сталі настільки різко зростають (на два порядки), що теплота не встигає проникнути вглиб зразка під час імпульсу.

Для матеріалів із низькою температуропровідністю (титан, нержавіюча сталь) тепла стала часу значно більша від тривалості лазерного імпульсу.

Розглянуті обмеження на підведення теплового потоку при імпульсному випромінюванні практично відсутні, коли використовується безперервне випромінювання. Тому лазери безперервного випромінювання дедалі ширше застосовуються в

технологічних процесах термічної обробки та легування поверхні, оплавлення покриттів, зварюванні.

Таблиця 4.1 - Коефіцієнт температуропровідності і теплова стала часу для металевих матеріалів

Матеріал	α , см ² /с	t_4 , мс, при товщині матеріалу, см			
		0,01	0,02	0,05	0,10
Алюміній (Al)	0,19	0,029	0,118	0,74	2,94
Мідь (Cu)	1,14	0,022	0,088	0,55	2,19
Залізо (Fe)	0,21	0,124	0,495	3,09	12,37
Нікель (Ni)	0,24	0,114	0,454	2,84	11,36
Титан (Ti)	0,08	0,593	-	14,8	-
Вольфрам (W)	0,62	0,969	-	1,5	-
Бронза	0,213	0,117	0,470	2,93	11,74
Нержавіюча сталь	0,056	0,446	1,786	11,16	44,64
Вуглецева сталь	0,119	0,210	0,840	5,25	21,01

Закономірності лазерного зміцнення. Лазерне термозміцнення сталей за аналогією з іншими видами загартування полягає у формуванні на етапі нагрівання аустенітної структури і її подальшому перетворенні на мартенсит на етапі охолодження.

Високотемпературне нагрівання, характерне для процесу лазерного загартування, змінює кінетику утворення аустеніту. Теплова енергія, яка підводиться, перевищує енергію, необхідну для перебудови кристалічної ґратки, а сама перебудова відбувається з деякою скінченною швидкістю. Внаслідок цього перетворення здійснюється не ізотермічно, а в деякому інтервалі температур від $A_{c1}^{\text{поч}}$ до $A_{c1}^{\text{кін}}$, тобто відбувається зміцнення закінчення аустенітного перетворення в область високих температур (рис. 4.2, область 1). При досить високій температурі нагрівання або при відносно тривалому часі впливу можливе формування однорідного аустеніту.

Зниження температури нагрівання і скорочення часу впливу внаслідок підвищення критичних точок і уповільнення процесу гомогенізації приводить до збільшення неоднорідності аустеніту в сталі, особливо за вуглецем. Крім того, в цих умовах при високій температурі можливе існування нерозчинних карбідів.

Ступінь неоднорідності структури, утвореної внаслідок лазерного нагрівання, залежить від дисперсності вихідної структури: чим більше подрібнена вихідна структура, тим менша неоднорідність

аустеніту.

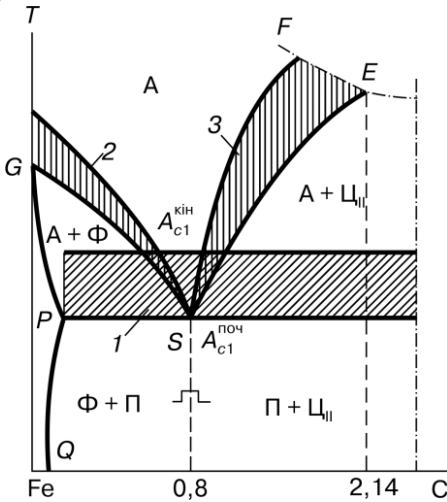


Рисунок 4.2 - Ділянка діаграми стану Fe-Fe₃C з особливостями структурних перетворень при високошвидкісному нагріванні (А - аустеніт; Ф - ферит; Ц - цементит; П - перліт)

Для отримання мартенситу в сплавах залізо-вуглець в інтервалі температур мінімальної стійкості аустеніту (673-873 К) необхідно забезпечити швидкості охолодження, більші, ніж критичні, які для сплавів заліза знаходяться в інтервалі 50-200 К/с. Охолодження при лазерному термозміцненні без оплавлення характеризується значно більшими швидкостями.

При лазерному термозміцненні в сталях отримують ті ж фази і структури, що й при звичайному загартуванні: мартенсит, цементити (карбіди, залишковий аустеніт), але високі швидкості охолодження спричиняють більшу неоднорідність структури, пов'язану з негомогенністю аустеніту. Виникає підвищена дефектність структури внаслідок посилення фазового наклепу, уповільнення процесів відпочинку і рекристалізації. При цьому спостерігається подрібнення блоків, збільшення щільності дислокацій і зростання напружень у кристалічній ґратці. Утворений мартенсит більш дисперсний, ніж за звичайного загартування.

Поверхня металу в центрі плями нагрівання ($r = 0$, $Z = 0$) на момент закінчення імпульсу випромінювання лазера має найвищу температуру:

$$T_{\text{пов}} = T(0, \tau) = \frac{2 q_s \sqrt{a \tau}}{\sqrt{\pi \lambda}}. \quad (4.6)$$

Швидкість нагрівання в загальному випадку в зоні дії променя лазера без істотного порушення поверхні металу можна отримати з виразу

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q_s \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\tau}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-Z^2/4 a \tau}, \quad (4.7)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності;

λ - коефіцієнт теплопровідності;

q_s - питома теплова потужність імпульсу випромінювання.

Наприклад, для сталі 45 при $q_s = 10^5$ Вт/(см · К), $\tau = 1$ мс, $a = 0,1$ см²/с, $\lambda = 0,335$ Вт/(см · К) на глибині $Z = 10^{-3}$ см швидкість нагрівання становить $\frac{\partial T}{\partial t} = 1,7 \cdot 10^6$ К/с, а на поверхні ($Z = 0$) -

$\frac{\partial T}{\partial t} = 1,6 \cdot 10^6$ К/с. Зі збільшенням глибини за сталої тривалості випромінювання лазера швидкість нагрівання матеріалу зменшується, оскільки для глибини $Z = 5 \cdot 10^{-2}$ см маємо $\frac{\partial T}{\partial t} = 3,38 \cdot 10^3$ К/с, а для $Z = 10^{-1}$ см - $\frac{\partial T}{\partial t} \approx 0$.

Залежність глибини загартування від ефективного розміру, швидкості пересування і потужності променя лазера запишеться у вигляді

$$Z = \sqrt{8 a r / \pi w - \pi a c r^2 \rho T_0 / A P}, \quad (4.8)$$

де r - ефективний розмір плями нагрівання;

P - потужність променя;

w - швидкість відносного пересування лазера та виробу.

Для випадку одновимірного нагрівання напівнескінченного

середовища необмеженим поверхневим джерелом зі сталою інтенсивністю потоку $q = AP_0/(\pi r^2)$ протягом часу $t = 2r/v$ (при виконанні умови $r \gg \sqrt{at}$) рекомендовані формули для визначення низки технологічних параметрів лазерного поверхневого зміцнення залізовуглецевих сплавів безперервним випромінюванням лазера на CO₂ (тут A - коефіцієнт поглинання оброблюваного матеріалу; P_0 - потужність випромінювання лазера).

Формули справедливі за умови, що глибина загартування досягає максимального значення $Z_{\max}$ при встановленні на поверхні температури плавлення $T_{\text{пл}}$. Для цього інтенсивність теплового джерела має становити:

$$q_{\text{пл}} = T_{\text{пл}} \lambda (\pi / 4at), \quad (4.9)$$

час загартування:

$$t_{\text{заг}} = \frac{\pi Z_{\text{заг}}^2}{4a} (T_{\text{пл}} / (T_{\text{пл}} - T_{\text{заг}})), \quad (4.10)$$

необхідна швидкість загартування:

$$w_{\text{заг}} = \frac{8a(T_{\text{пл}} - T_{\text{заг}})^{3/2}}{\pi T_{\text{пл}}^2 Z_{\text{заг}}^{3/2}}. \quad (4.11)$$

Глибину зміцнення можна визначити з виразу:

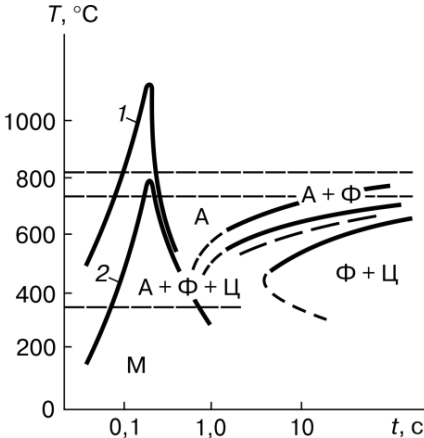
$$Z_{\text{заг}} = (4at/\pi)^{1/2} (T_{\text{пл}} - T_{\text{заг}}) / T_{\text{пл}}. \quad (4.12)$$

Процес зміни структури сплаву ілюструє рис. 4.3.

Залізовуглецевий сплав (сталь) з аустенітного стану, в якому він перебуває при високій температурі, має охолоджуватися зі швидкістю, більшою, ніж критична швидкість загартування. При цій швидкості весь аустеніт охолоджується до температури початку мартенситного перетворення, тобто забезпечується отримання мартенситних структур.

Криві 1 і 2 (рис. 4.3) являють собою розрахункові залежності

температури відповідно на поверхні і на глибині 0,5 мм, що накладені на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту на мартенсит. Праворуч розміщені області існування інших структур. Загартування відбувається приблизно за 1 с при поглиненому потоці $3 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$. У загартованій структурі наявний у переважній кількості мартенсит.



1 - крива зміни температури на поверхні зразка завтовшки 10 мм; 2 - крива зміни температури на глибині 0,5 мм (A - аустеніт, Φ - ферит, Ц - цементит, M - мартенсит)

Рисунок 4.3 - Діаграма ізотерм фазових переходів у вуглецевій сталі (густина поглиненого потоку випромінювання - $3 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$, час взаємодії - 0,2 с)

Взагалі ступінь загартування при різних швидкостях охолодження (тобто, законах зміни температури металу від часу), як видно з рис.4.3, можна якісно оцінити шляхом порівняння кривих охолодження і термкінетичних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту.

Інша особливість лазерного загартування полягає в можливості безперервного керування процесом.

Швидкість охолодження значно впливає на будову, структуру і властивості закристалізованої ділянки поверхні. Однорідність хімічного складу об'єму, який кристалізується, також визначається швидкістю охолодження.

При швидкостях охолодження 10^3 - 10^6 К/с спостерігається дендритна ліквіація, коли центральні осі дендритів збагачені

тугоплавкими елементами, а межові ділянки зерен - легкоплавкими. При забезпеченні надвисоких швидкостей охолодження можливе утворення аморфних структур, коли не встигають утворюватися центри кристалізації, і об'єм металу твердне, як склоподібна маса, в якій існує ближній порядок.

Залежно від ступеня виявлення вказаних умов у матеріалах розрізняють кілька видів лазерного зміцнення (модифікації структури матеріалу). Їх реалізація здебільшого визначається густиною потужності випромінювання.

У табл. 4.2 наведені види лазерного зміцнення і деякі їх характеристики.

Зміцнення без фазового переходу передбачає структурні зміни в матеріалі при такому рівні густини потужності випромінювання, який не зумовлює розплавлення опроміненої зони. Вихідна шорсткість обробленої поверхні не змінюється.

Зміцнення з фазовим переходом передбачає плавлення матеріалу в опроміненій зоні. Такий вид зміцнення потребує більшої густини потужності випромінювання. Плавлення матеріалу порушує вихідну шорсткість поверхні.

Таблиця 4.2 - Види і характеристики лазерного зміцнення

Зміцнення	Густина потужності, Вт/см ²	Швидкість охолодження, К/с	Глибина зони термічного впливу h , мм
Без фазового переходу	10^3 - 10^4	10^4 - 10^5	0,02-0,5
З фазовим переходом	10^4 - 10^5	10^4 - 10^6	0,2-3
Лазерне легування	10^4 - 10^6	10^4 - 10^6	0,2-2
Лазерне наплавлення	10^4 - 10^6	10^4 - 10^6	0,2-1 (товщина шару)
Аморфізація поверхні	10^8 - 10^{10}	10^6 - 10^{10}	0,01-0,1

При лазерному легуванні для насичення поверхневого шару легуючими елементами потрібне спеціальне середовище (газове, рідке, тверде). На оброблюваній поверхні утворюється новий сплав, який відрізняється за складом і структурою від матричного матеріалу.

Аморфізація поверхні в умовах швидкісного опромінення - новий різновид лазерного зміцнення. Надвисокі швидкості відведення тепла забезпечують своєрідне заморожування розплаву,

створення металевого скла чи аморфного стану поверхневого шару. При аморфізації поверхні матеріали набувають високої твердості, корозійної стійкості, поліпшених магнітних характеристик й інших специфічних властивостей.

При лазерному термозміцненні окремі шари ділянки, яка обробляється, прогриваються вглиб до різних температур, внаслідок чого зона термічного впливу (ЗТВ) лазерного випромінювання має шарову будову. Залежно від мікроструктури і мікротвердості в сталях розрізняють три шари.

Перший шар - зона оплавлення; властива при загартуванні з розплавленого стану. Зона оплавлення характеризується стовпчастою будовою з кристалами, які витягнуті в напрямку відведення тепла. Основна структурна складова - мартенсит, карбіди, як правило, розчиняються. При лазерному загартуванні без оплавлення перший шар відсутній.

Другий шар - зона загартування з твердої фази. Його нижня межа визначається температурою нагрівання до A_{c1} .

У цьому випадку разом з повним загартуванням спостерігається і неповне. Структура шару за глибиною неоднорідна. Ближче до поверхні знаходяться мартенсит і залишковий аустеніт, а ближче до вихідного металу разом з мартенситом - елементи вихідної структури (ферит в доевтектоїдній сталі і цементит - у заевтектоїдній).

Третій шар - перехідна зона, в якій метал нагрівався нижче від точки A_{c1} . Для загартованої чи відпущеної сталі результатом лазерного зміцнення є структури троостит і сорбіт, які мають знижену мікротвердість.

У доевтектоїдних вуглецевих сталях із вмістом $C < 0,3 \%$ в зоні оплавлення утворюється дрібноголковий маловуглецевий мартенсит. Мікротвердість у цій зоні невелика (5000-6000 МПа). Зона загартування з твердої фази в цих сталях характеризується великою структурною неоднорідністю, яка залежить від режимів лазерного зміцнення.

У верхній області цієї зони на окремих невеликих площах колишнього перліту може виникати мартенсит з мікротвердістю до 6000 МПа. У нижній області зони загартування з твердої фази структура складається з великих зерен фериту.

Збільшення вмісту вуглецю до $0,6 \%$ в середньовуглецевих сталях призводить до значного зростання твердості мартенситу

(7000-8500 МПа). Зона загартування без оплавлення у верхній області має мартенсит з такою мікротвердістю, як у зоні оплавлення. У нижній області по глибині спостерігається неоднорідність структури в послідовності: мартенсито-троостит, мартенсит і трооститна сітка, яка переходить в троостито-феритну, а на межі з вихідною структурою - у феритну структуру.

В евтектоїдних і заевтектоїдних вуглецевих сталях лазерне зміцнення з оплавленням характеризується наявністю в зоні оплавлення, крім дрібнодисперсного мартенситу, залишкового аустеніту, вміст якого сягатиме 40 %. Нерозчинений цементит відсутній, тому мартенсит і аустеніт значною мірою насичені вуглецем. Завдяки цьому мікротвердість мартенситу підвищується і в сталях із вмістом С від 1 до 1,2 % становить 12 000-13 000 МПа.

У зоні загартування з твердої фази виділяють верхню область, розташовану ближче до поверхні, де є розчинені карбіди, і нижню, де є нерозчинені карбіди. У верхній області твердий розчин насичений вуглецем, що сприяє утворенню підвищеної кількості залишкового аустеніту. У нижній його значно менше і метал має максимальну твердість. Тому заевтектоїдні сталі зміцнюються з якнайвищою швидкістю для отримання структур з нерозчиненими карбідами.

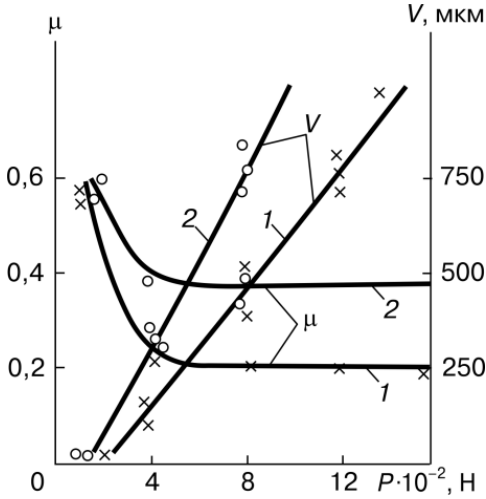
Властивості зміцнених матеріалів. Лазерне зміцнення підвищує зносостійкість пар тертя, які працюють в умовах сухого тертя і в абразивно-мастильному середовищі. При цьому спостерігається підвищення зносостійкості не тільки зміцненої поверхні, а й контртіла.

Найбільш ефективним є лазерне зміцнення для деталей, що працюють у вузлах тертя з мастилом.

Підвищення зносостійкості спостерігається внаслідок значного зменшення (іноді до 2 разів) коефіцієнта тертя. На рис. 4.4 наведені залежності швидкості зношування V і коефіцієнта тертя μ сталі 40Х.

У парах тертя “інструментальний матеріал-сталь” процес тертя є однією зі складових механічного зношування металорізальних інструментів.

Можливість поліпшення і керування в широкому діапазоні триботехнічними властивостями визначається тим, що ділянки з литою структурою (опромінені) не схильні до сколів, відшарування і мають достатню механічну міцність, а пористі (неопромінені) є своєрідним демпфером і “мастильним акумулятором”.



1 - сталь 40X, яка зміцнена лазерним опроміненням; 2 - сталь 40X, загартована за стандартною методикою

Рисунок 4.4 - Залежність швидкості зношування V і коефіцієнта тертя μ від тиску

Механічні властивості матеріалів, такі, як границя міцності σ_b , границя плинності $\sigma_{0,2}$, ударна в'язкість a_n , також змінюються внаслідок лазерного опромінення. Ступінь їх зміни залежить від режиму обробки, типу матеріалу. Так, для інструментальних сталей зі збільшенням густини потужності випромінювання спостерігається деяке зниження границі міцності і ударної в'язкості, в той час як на зміну границі плинності лазерне зміцнення практично не впливає. Для загартованої сталі ударна в'язкість знижується після лазерної обробки від 5 до 1,32 МДж/м².

При лазерному зміцненні *титанових сплавів* з оплавленням утворюються дві зони: зона оплавлення і зона термічного впливу. У структурі зони оплавлення всіх сплавів є нітрид титану.

Утворення мартенситної α' -фази, яка насичена азотом і киснем, разом із наявністю нітриду титану є причиною значного підвищення твердості в зоні оплавлення.

Зона термічного впливу має багатшарову будову, що пов'язано насамперед із нагріванням до різних температур. У верхній частині зони термічного впливу на межі зони оплавлення утворюється голчаста структура, яка орієнтована в межах зерен β -фази. Під

голчастим шаром розміщується світлий шар з напіврозчиненими частинками β -фази. Цей шар має найбільші розміри. Мікротвердість на цій ділянці є перехідною від структури голчастого мартенситу до вихідної.

У табл. 4.3 наведені показники термозміцнення титанових сплавів, які отримані при загартуванні на повітрі та в інертному середовищі.

Таблиця 4.3 - Показники термозміцнення титанових сплавів

Сплав	Зміцнення CO ₂ -лазером ($N = 2$ кВт)			Мікротвердість H_{μ} , МПа		
	Швидкість, мм/с	Середовище	Глибина обробки, мм	вихідна	зони оплавлен ня	зони термічного впливу
BT6	14	Повітря	0,77	3280-3660	7700-16 500	3960-4660
	14	Гелій	0,43	3280-3660	5570-7520	3660-4660
BT3-1	4,2	Повітря	1,1	3400-3810	5320-10 100	3280-5080
	14	Повітря	0,89	3400-3810	7520-13 100	3660-5570
	14	Гелій	0,3	3400-3810	5080-7520	4120-5320
BT16	4,2	Повітря	1,02	3530-3960	6440-8900	2960-4290
	14	Повітря	0,85	3530-3960	5080-6440	3400-4290
	14	Гелій	0,4	3530-3960	4570-5830	3280-4290

Подібні результати щодо розміщення основних зон спостерігаються і при лазерному загартуванні цирконієвих сплавів.

Алюмінієві сплави. Зона лазерної дії при термозміцненні алюмінієвих сплавів відрізняється від зони для сталей і чавунів наявністю лише одного шару, отриманого загартуванням з рідкого стану. Зона термічного впливу практично відсутня. Інші результати спостерігаються при лазерному зміцненні силумінів. Їх вихідна структура являє собою первинні зерна α -твердого розчину і

евтектику $\alpha + \text{Si}$. Внаслідок зміцнення структура силумінів у зоні оплавлення суттєво змінюється і характеризується дрібнодисперсністю фаз. Її мікротвердість значно підвищується.

Одним із засобів покращення властивостей напилених покриттів, пов'язаних з підвищенням міцності зчеплення з основою і щільності напиленого матеріалу, є їх оплавлення.

Оплавлення висококонцентрованими джерелами енергії є найбільш перспективним. Якість лазерної обробки залежить від ступеня оплавлення, який визначається питомою погонною енергією опромінення.

Лазерне легування є одним із видів лазерного зміцнення (поверхневої обробки), при якому підвищення твердості та інших експлуатаційних характеристик поверхневого шару матеріалу досягається внаслідок не лише структурних і фазових перетворень у зоні лазерної дії, а й створення нового сплаву, який відрізняється від матричного матеріалу хімічним складом. Основою цього нового сплаву є матричний матеріал.

Ступінь зміцнення залежить як від типу легуючого елемента (елементів), так і від властивостей матричного матеріалу. Так, при імпульсному опроміненні заліза, на поверхню якого наносились шари різних вуглецевмісних сполук (в тому числі і графіт), досягається значне підвищення концентрації вуглецю в залізі з утворенням твердого розчину залізо-вуглець. Оброблена ділянка поверхні являє собою білий шар із рівномірною мікротвердістю, яка досягає 1400 МПа. За ним йде термооброблений шар із мікротвердістю 1000 МПа.

При легуванні армко-заліза тугоплавкими металами Ni, Mo, V, Nb, Ta в умовах імпульсного опромінення спостерігається значна зміна мікротвердості, однак для різних легуючих елементів закономірності зміни мікротвердості різні (рис. 4.5). У зоні дії лазерного випромінювання наявні тверді розчини на основі заліза.

Однорідність розподілу легуючого металу в твердому розчині залежить не тільки від теплофізичних характеристик складових двокомпонентної системи, а й від режиму обробки. Кількість легуючого елемента в зоні дії лазерного випромінювання значно перевищує границі розчинності при однакових умовах.

Якщо на чистому залізі існує одна чітко локалізована зона, яка за своїми властивостями відрізняється від матричного матеріалу, то

на сталі ШХ15 в області дії лазерного випромінювання спостерігається утворення трьох чітко виражених зон. Одна з цих зон (найбільша за об'ємом) є твердим розчином легуючого елемента на основі заліза, далі послідовно розміщені зона загартування і зона відпуску. Глибина зони легування досягає 300-400 мкм. Тип легуючого елемента впливає на твердість легованого шару (рис. 4.5). У зоні лазерної дії вона вища при легуванні молібденом і титаном, ніж при легуванні ніобієм.

Якщо легуючими елементами є легкоплавкі метали або сполуки, то ефективність лазерного легування знижується. Так, внаслідок лазерної обробки алітованих зразків зі сталі 45 відбувається значне випаровування алюмінію, який був нанесений електроіскровим способом. У розплав потрапляє лише невелика його частина.

При лазерному наплавленні, на відміну від легування, матричний матеріал може знаходитися лише в невеликому примежовому шарі між матрицею і наплавленим шаром, який є зв'язувальним середовищем. Склад і структура наплавленого шару суттєво відрізняються від матеріалу матриці.

В умовах лазерного легування для низки систем пересичених твердих розчинів можна отримати різні метастабільні фази і структурні стани. Так, легування при імпульсному опроміненні технічного заліза молібденом змінює концентрацію легуючого елемента (молібдену) за масою від 28 до 36 %. Це в 5-6 разів перевищує рівень концентрації, характерної для рівноважних умов систем залізо-молібден при температурах не вищих, ніж 500 °С.

Лазерне легування дає змогу в широких межах змінювати триботехнічні характеристики поверхонь деталей. Наприклад, вдування частинок карбіду титану в розплавлену зону покращує антифрикційні властивості матричного матеріалу - титанового сплаву $Ti + 6Al + 4V$. При цьому відбувається часткове розчинення частинок TiC з наступним виділенням при охолодженні дрібнодисперсних карбідів. Внаслідок цього коефіцієнт тертя титанового сплаву в парі зі сталевим контртілом зменшується від 0,40-0,45 (для необробленої поверхні) до 0,18 (для легованої TiC -поверхні).

Лазерне випромінювання підвищує зносостійкість поверхонь тертя, які мають газотермічні покриття. Під дією лазерного випромінювання газотермічне покриття на сталі У8 переходить у

литий стан. На ступінь зносостійкості впливає співвідношення площ опромінених і неопромінених ділянок. При оптимальному співвідношенні цих площ (2 : 1) зносостійкість поверхні тертя підвищується в 2-3 рази.

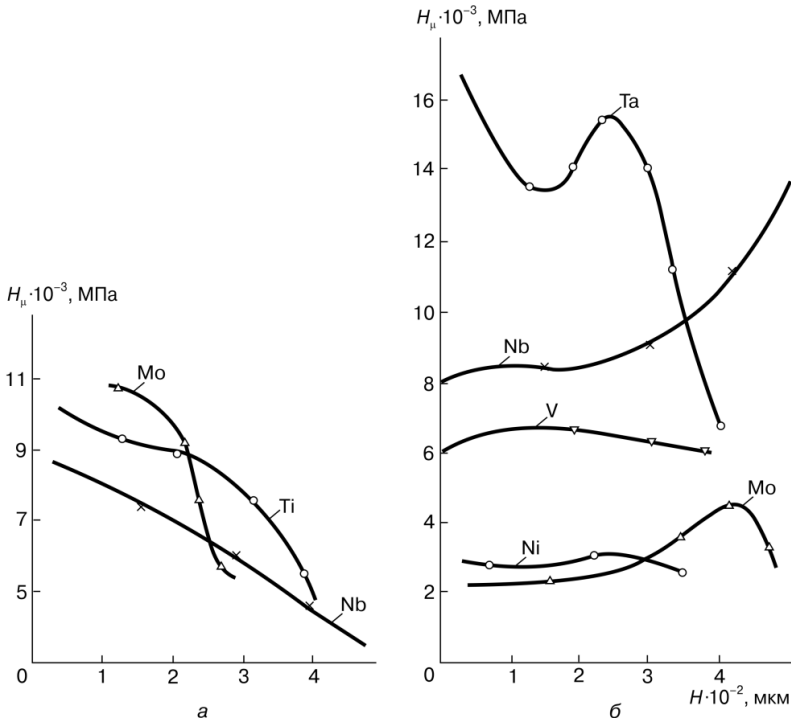


Рисунок 4.5 - Вплив типу легуючого елемента і матричного матеріалу на мікротвердість легованого шару

При лазерному легуванні технічно чистого заліза, вуглецевих сталей 12ХН3А, ШХ15, 9ХС, Р18, Р6М5 поверхневі шари зразків насичувались Ti, V, Cr, Ni, Nb, Mo, Ta, W. При цьому в зоні оплавлення під дією конвективної дифузії і в умовах наступного швидкого охолодження (автозагартування з рідкого стану) фіксуються тверді розчини на основі заліза з високою концентрацією легуючих елементів (36 % Mo, 45 % Ni та ін.), яка значно перевищує їх рівноважну розчинність в α -залізі. Усі перелічені легуючі елементи, за винятком нікелю, підвищують твердість поверхневих шарів.

Найчастіше як легуючий елемент в сталях різних класів і призначень використовується хром. При лазерному легуванні він також застосовується - лазерне хромування різноманітних матеріалів (сталей, чавунів, технічного заліза) досить широко.

Так, при лазерному легуванні хромом вуглецевої сталі У10 і сірого чавуну СЧ 24-44 для обох сплавів при всіх вивчених концентраціях хрому (до 40 %) у поверхневому шарі не виявлено його перерозподілу між різними фазами. Така висока однорідність концентрації хрому забезпечується не лише дифузією, а й конвекцією в розплавленому об'ємі. Вважається, що в умовах високої швидкості охолодження розплаву відбувається частково бездифузійна кристалізація. Вуглець, який має малий атомний радіус і утворює із залізом тверді розчини вкорінення, встигає перерозподілитися, і його вміст у різних фазах виявляється різним. Хром, який утворює із залізом твердий розчин заміщення, не встигає перерозподілитися, і таким чином, виникає унікальний фазовий стан, а саме, всі фази, які спостерігаються в дифузійному шарі (ферит, мартенсит, аустеніт і карбіди як цементитного типу, так і спеціальні, типу Me_7C_3), мають однакову концентрацію хрому.

Найчастіше легування здійснюється опалвленням за допомогою імпульсного чи безперервного випромінювання компонентів, заздалегідь нанесених на поверхню. Як правило, при лазерному легуванні в зону обробки подають присадковий матеріал у вигляді порошку. Внаслідок лазерного легування в структурі зони обробки створюються пересичені тверді розчини, а в деяких випадках й інтерметаліди. Якщо легування залізовуглецевих сплавів здійснюється тугоплавкими і карбідоутворювальними компонентами, це приводить до підвищення мікротвердості.

Лазерне легування чавуну і сталі хромом підвищує як корозійну стійкість, так і ударну в'язкість і зносостійкість.

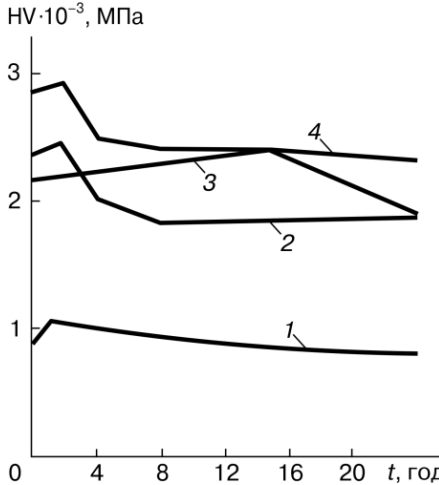
Перспективним є легування кольорових металів і сплавів, особливо алюмінієвих і титанових.

Для легування алюмінієвих сплавів використовують Fe, Ni, Ti, ферованадій і сплави Ni-Cr-B-Si, Co-Cu та ін. Легована зона має структуру твердого розчину легуючого елемента в алюмінії з відповідними інтерметалідними фазами $FeAl_3$, VAl_3 , $TiAl_3$, $CoAl_3$, $NiAl_3$ та ін.

Внаслідок лазерного легування інтерметаліди набувають майже

кулеподібної форми, що забезпечує високі експлуатаційні властивості обробленої поверхні. Мікротвердість зон легування алюмінієвих сплавів підвищується до 3000 МПа, а в скупченнях інтерметалідів досягає 8000-10 000 МПа.

Лазерне легування алюмінієвого сплаву АЛ30 (рис. 4.6) забезпечує твердість на 1000-1500 МПа більшу, ніж лазерне загартування без легування. Найбільші значення твердості отримані при легуванні сплавом Ni-Cr-B-Si.



1 - лазерне загартування без легування; 2 - лазерне легування; 3 - лазерне легування Ni; 4 - лазерне легування сплавом Ni-Cr-B-Si

Рисунок 4.6 - Залежність твердості алюмінієвого сплаву АЛ30 в процесі витримування при температурі нагрівання 250 °С від часу

Лазерне легування титанових сплавів хромом, який є для них β -стабілізатором, забезпечує отримання структури у вигляді β -фази. Мікротвердість титанового сплаву ОТ4 внаслідок такого легування підвищується від 2800 до 6400 МПа, що поліпшує зносостійкість.