С.О. ЛУЗАН

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

Курс лекцій

Харків
2021

УДК 621.79:621.787:621.81.004.67
Л 83

Л 83 Лузан С.О. Інженерія поверхні. Курс лекцій / С.О. Лузан, – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 187 с.

Запропановано курс лекцій, що містят у собі базовий матеріал з дисципліни «Інженерія поверхні». У конспекті розглянуто методи, які використовує інженерія поверхні. Проаналізовано процеси в потоці газу і частинок, на поверхні основи, які виникають при створенні покриття різними методами, а також модифікування структури та легування поверхні висококонцентрованими потоками енергії та інші методи нанесення покриття. Наведена методологія управління якістю поверхні та вибору технології відновлення деталей. Розглянуто перспективи застосування наноструктурованих матеріалів у машинобудуванні.

Іл. 134. Табл. 19. Бібліограф. 13 назв.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....4

Лекція 1. Вступ. Будова твердої речовини.....6

Лекція 2. Методи інженерії поверхні……32

Лекція 3. Газотермічне напилення …..……..……40

Лекція 4. Процеси в потоці газу и на поверхні основи.....60

Лекція 5. Способи газотермічного напилення та матеріали покриттів……..…….....79

Лекція 6. Наплавлення та електроіскрове легування. 101

Лекція 7. Модифікування поверхні та інші методи нанесення покриття.....138

Лекція 8. Управління якістю поверхні та вибір технології відновлення деталей.....173

Список літератури.....185

ПЕРЕДМОВА

Розвиток конструкцій машин відбувається при постійному прагненні до збільшення їх продуктивності, що майже завжди супроводжується підвищенням механічної і теплової напруженості рухомих сполучень деталей. При цьому ставляться задачі досягнення високої надійності і довговічності машини, зниження її маси, скорочення витрати дефіцитних матеріалів.

Рішення задачі підвищення ресурсу деталей машин і устаткування за рахунок застосування високоміцних нержавіючих сталей і сплавів приводить до великих витрат, як на дорогі матеріали, так і на металоріжучий і штампувальний інструмент. Причому, не дивлячись на те, що із збільшенням змісту легуючих елементів міцність, твердість і зносостійкість зростають, в той же час вірогідність крихкого руйнування підвищується. Для запобігання цьому необхідне застосування нових конструкційних матеріалів, що поєднують міцну, зносостійку і тверду поверхню з пластичною, в'язкою і тріщиностійкою основою. Цим пояснюється все зростаючий в даний час інтерес до покриттів, модифікації структури або легування поверхневого шару. Таким чином механічна міцність деталей забезпечується матеріалом основи, а спеціальними властивостями матеріалом покриття або формуванням нової структури, а також хімічного складу пріповерхневого шару матеріалу деталі. Ці задачі можливо вирішити методами інженерії поверхні.

Інженерія поверхні (surface engineering) відноситься до одного з нових напрямів в науці і технології, яке включає традиційні і інноваційні процеси нанесення захисних покриттів, модифікації поверхні деталей для отримання спеціальних властивостей, відмінних від основного матеріалу.

Метою викладання навчальної дисципліни «Інженерія поверхні» є - навчити магістрів застосовувати на практиці комплексний підхід при виборі найбільш раціонального способу відновлення або зміцнення деталей машин.

Вивчення дисципліни грунтується на знаннях загальнотехнічних та загальнотеоретичних дисциплін, а також повинно проводитись після вивчення студентом курсів «Технологія машинобудування», «Технологічні системи ремонтного виробництва», «Тертя, мащення та дефектація деталей машин».

В результаті вивчення даної дисципліни магістри одержать знання про методи інженерії поверхні, будову твердої речовини, властивості поверхні твердого тіла, видах зношування поверхонь, технологічні можливості газотермічних методів нанесення покриттів і процеси, що відбуваються на поверхні основи при формуванні покриттів, їх структурі і властивостях , способах наплавлення, структурі

і властивості наплавленого металу, електроіскрове легування, гальванічні процеси відновлювання, методи хімічного осадження, дифузійне насичення, принципи управління якістю поверхні та вибір технології відновлення деталей.

При підготовці даного курсу лекцій основною метою авторів було підібрати і систематизувати матеріал по роботах, присвячених нанесенню захисних покриттів, модифікації поверхні деталей для отримання спеціальних властивостей, та узагальнити його з вимогами навчальної літератури. Матеріал викладено у відповідності навчальної програми з дисципліни "Інженерія поверхні".

Запропонований курс лекцій складається з 8 лекцій, що містят у собі базовий матеріал з дисциплін навчального плану підготовки фахівців за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування».

Курс лекцій може бути корисним не тільки для магістрів і викладачів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації, а також аспірантів, інженерно-технічних працівників машинобудівних і ремонтних підприємств та майстерень технічного сервісу.

ЛЕКЦІЯ 1

ВСТУП. БУДОВА ТВЕРДОЇ РЕЧОВИНИ.

1. Задачі, які вирішує інженерія. 2. Кристалічні структури. 3. Поверхня твердого тіла. 4. Поверхнева енергія. 5. Адсорбція. 6. Окиснення. 7. Сегрегаційні явища на поверхні. 8. Зношування поверхонь. 9. Підготовка поверхонь.

1. Задачі, які вирішує інженерія поверхні

Залежно від умов експлуатації до робочих поверхонь деталей і конструкцій ставляться певні вимоги щодо різних властивостей (зносостійкості, жаростійкості, антифрикційності, корозійної стійкості та ін.). Властивості поверхонь саме і визначають експлуатаційну надійність деталей і конструкцій.

Довговічність можна підвищувати створенням на поверхні виробів покриття (рис. 1.1) з високим рівнем властивостей, які вимагаються, або модифікацією структури, чи легуванням поверхневого шару.

Рисунок 1.1 – Фрагмент деталі з плазмовим покриттям

Механічна міцність деталей і конструкцій забезпечується одним матеріалом, а спеціальні властивості – іншим, тобто матеріалом покриття або нового структурного чи хімічного стану приповерхневих шарів матеріалу деталі. Ці задачі розв'язуються *методами інженерії поверхні*.

2. Кристалічні структури.

Тверда речовина існує у двох основних формах: *кристалічній* і *аморфній.*

Характерна риса *кристалів* – фіксована температура плавлення. При нагріванні кристалічна речовина залишається твердою до визначеної температури, а потім починає плавитися, переходячи в рідкий стан.

Аморфні речовини при нагріванні поступово розм'якшуються і потім плавляться. Вони мають однакові властивості в усіх напрямках, і їх називають *ізотропними.* У цьому відношенні вони подібні до рідин та газів.

Найбільш важливою особливістю кристалічної речовини є *упорядковане розміщення* її атомів. Такі конфігурації мають нижчу енергію і тому більш стійкі, ніж при хаотичному розміщенні атомів.

Будови кристала і аморфної речовини того самого складу майже однакове: найближчі сусіди розміщуються на вершинах правильного трикутника при кристалічному стані (рис. 1.2) і майже правильного – при аморфному (рис. 1.3).

Для аналітичного опису упорядкованого середовища вико-ристовуються *кристало-графічні індекси* точок, прямих та площин у кристалі. При цьому *точки* – це атоми, *прямі* – напрямки, вздовж яких розміщені атоми, *площини* – атомні площини (рис. 1.4).

Для знаходження кристалографічних координат точки необхідно знайти декартові координати точки у вибраній системі кристалографічних осей. Наприклад, для зафарбованого атома (див. рис. 1.4) це |a|, |b| , |c|. Потім координати перераховуються в одиницях періодів ґратки по кристалографічних осях (для даної точки відповідно 1,1,1).

Отримані числа називаються *кристалографічними координатами* точки. Їх записують у вигляді трійки чисел (у двовимірному випадку – двійки) у подвійних квадратних дужках – [[111]].

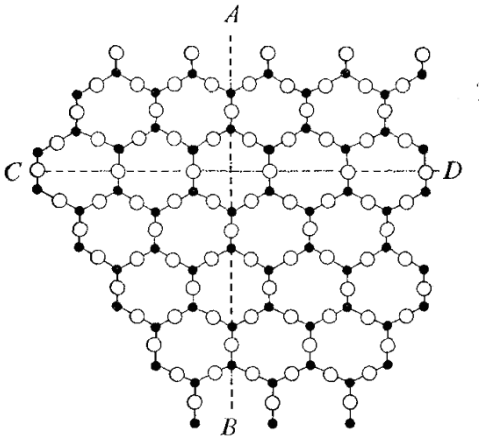


Рисунок 1.2 – Кристалічний стан

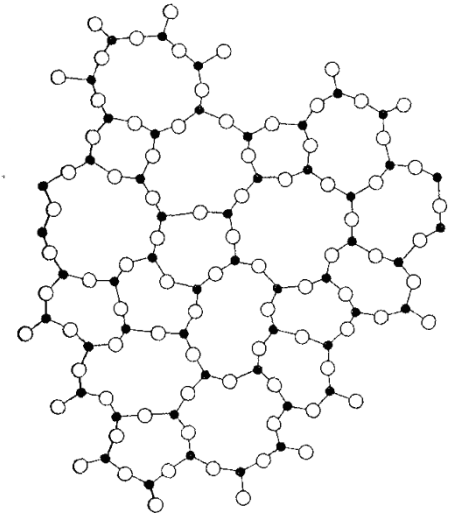


Рисунок 1.3 – Аморфний стан

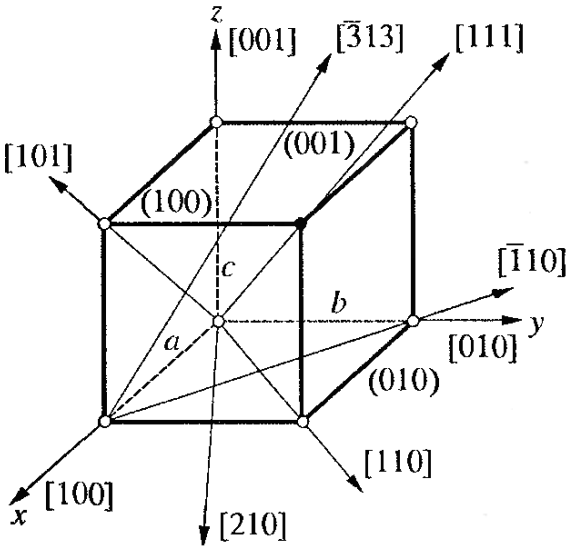


Рисунок 1.4 – Основні площини та кристалографічні напрямки в кубічному кристалі

Кристалографічні координати прямої задаються кристалографічними індексами найближчого до початку координат атома, якій знаходиться на цій прямій. Координати позначаються трійкою цілих чисел у квадратних одинарних дужках, наприклад [111] для діагоналі в кубічній ґратці.

Орієнтація площин характеризується *індексами Міллера.* Для цього визначаються точки перетину площини з трьома осями, і координати отриманих точок виражаються у відносних одиницях, що відповідають параметрам ґратки *a, b, c.* Потім визначаються величини, обернені до отриманих чисел.

Якщо є хоча б одна дробова величина, то всі числа замінюються трьома найменшими числами, що співвідносяться між собою в тій же пропорції. Індекси Міллера для площини даються в круглих дужках.

У твердих кристалічних матеріалах розміщення атомів чи молекул є структурою, яка періодично повторюється в

трьох вимірах. Найпростішою структурою є *проста кубічна* (ПК) ґратка (рис. 1.5).

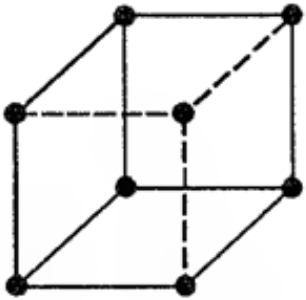


Рисунок 1.5 – Проста кубічна ґратка

В елементарному кубі такої структури атоми розміщені лише у вершинах куба. Тому атоми торкаються один одного вздовж ребер куба. Ця структура має нещільне упакування. Кожен атом має всього шість найближчих сусідів.

Така структура трапляється дуже рідко, однак за її допомогою більш складні кристалічні структури можна зображати як набір вставлених одна в одну простих кубічних підґраток.

У металів часто зустрічається *гексагональна щільноупакована* (ГЩУ) структура (рис. 1.6)

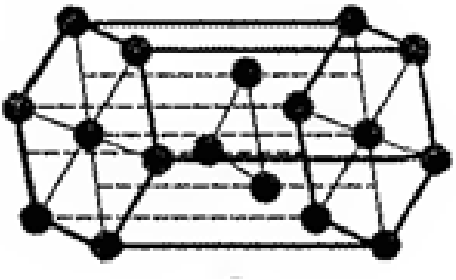


Рисунок 1.6 – Кристал із гексагональною щільноупакованою структурою

Кожний атом оточений дванадцятьма найближчими сусідами: шість знаходяться в тій же площині, три – у верхній, і три – у нижній.

Відстань між центрами сусідніх атомів *називається атомним діаметром (а).*

Кожний атом оточений дванадцятьма найближчими сусідами: шість знаходяться в тій же площині, три – у верхній, і три – у нижній.

Відстань між центрами сусідніх атомів *називається атомним діаметром (а).*

У *гранецентричній кубічній* (ГЦК) ґратці атоми займають усі вершини куба і центр кожної грані (рис 1.7).

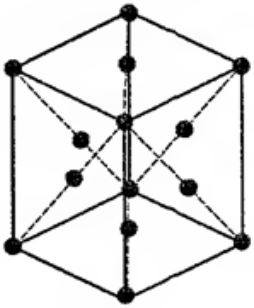


Рисунок 1.7 – Гранецентрична кубічна (ГЦК) ґратка

Атоми торкаються один одного вздовж діагоналей граней. ГЦК структура також щільноупакована, кожен атом має дванадцять найближчих сусідів.

Методи укладання щільноупакованих площин, що приводять до побудови кристалічних структур ГЩУ і ГЦК, практично вичерпують усі найпростіші способи укладання.

Однак багато матеріалів мають структури, що утворюються із нещільноупакованих площин. Одна з таких структур – *об'ємоцентричний куб* (рис. 1.8).

Такий елементарний осередок є кубом з атомами в кожній вершині і центрі куба. Структура не має щільного упаку-

вання, оскільки кожний атом оточений лише вісьмома сусідами. Зіткнення атомів відбувається вздовж діагоналей куба.

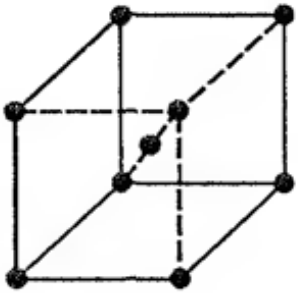


Рисунок 1.8 – Об'ємоцентрична кубічна ґратка

Усі хімічні сполуки мають інші, більш складні, структури. Багато з них є комбінаціями однієї з тільки що розглянутих основних кубічних структур. У таких комбінаціях одні ґратки проникають усередину інших.

Наприклад, структура алмаза є сполученням двох ГЦК підґраток, вставлених одна в одну (рис. 1.9, 1.10).

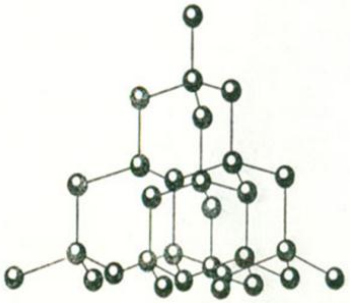


Рисунок 1.9 – Структура алмазу

Рисунок 1.10 – Алмаз

Така структура є нещільноупакованою, тому що кожний атом оточений лише чотирма найближчими сусідами.

Практичний інтерес становлять такі характеристики атомної будови:

1. Координаційне число, тобто кількість найближчих сусідніх атомів;

2. Атомний радіус, що дорівнює половині відстані між найближчими сусідами в кристалі (ця відстань дається в частинках ребра куба а);

3. Відносна щільність упакування, що є відношенням об'єму, зайнятого сферичними атомами, до об'єму, який зайнятий структурою.

У таблиці 1.1 приведені розрахункові формули для визначення характеристик атомної будови основних типів кристалічних структур.

Таблиця 1.1 – Формули для визначення характеристик атомної будови основних типів кристалічних структур

Тип структури	Координаційне число	Атомний радіус	Кількість атомів в елементарному кубі	Щільність упаковки	Кількість атомів в у другій координаційній сфері
ПК	6	$a/2$	1	$\pi/6$	12
ОЦК	8	$a\sqrt{3/4}$	2	$\pi\sqrt{3/8}$	6
ГЦК	12	$a\sqrt{2/4}$	4	$\pi\sqrt{2/6}$	6
Гратка алмазу	4	$a\sqrt{3/8}$	8	$\pi\sqrt{3/16}$	12

Внаслідок обміну кінетичною енергією атоми з підвищеною енергією долають потенціальні бар'єри, що їх оточують, переходять із вузлів кристалічної ґратки у міжвузля або навколишній простір.

Атом, який вийшов із рівноважного положення в міжвузля, прийнято називати *дислокованим,* а порожнє місце у вузлі ґратки, яке залишене атомом, – *вакансією* чи *діркою.*

У більшості випадків атоми домішок розміщуються у вузлах кристалічної ґратки, заміщуючи в них атоми металу основи. Такі розчини прийнято називати *розчинами заміщення* (позиція *c* на рис. 1.11).

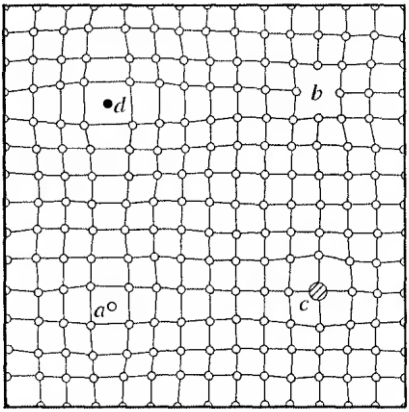
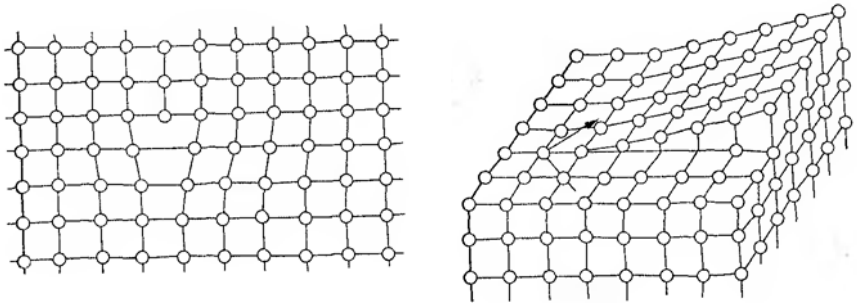


Рисунок 1.11 – Спотворення кристалічної ґратки навколо дислокованого атома *(a)* та вакантного місця *(b)* в розчині заміщення *(c)* і вкорінення *(d)*

У сучасних уявленнях про фізичну природу міцності головна роль відводиться дефектам особливого типу, які називають дислокаціями.

Розрізняють два основних види дислокацій: *крайові* (або *лінійні)* і *гвинтові.* (рис. 1.12)



а б

Рисунок 1.12 – Види дислокаій:
а - крайові (або лінійні) і б – гвинтові

Під *крайовою дислокацією* розуміють лінію спотворення, що проходить по краю зайвої атомної площини.

Лінія спотворень, що проходить вздовж краю розрізу, називається *гвинтовою дислокацією.* Переміщення гвинтової дислокації по поверхні приводить до утворення сходинки.

Дефекти атомної структури поверхні є хімічно активними центрами, тобто місцями переважної адсорбції атомів і молекул із газової фази, а також атомів, що дифундують з об'єму матеріалу.

Дислокації впливають не тільки на такі механічні властивості твердих тіл, як пластичність і міцність, для яких наявність дислокацій є визначальною, а й на інші фізичні властивості кристалів.

Щільність дислокацій зазвичай коливається від 10^3 на 1 см^2 у найбільш досконалих монокристалах і до 10^{11}-10^{12} на 1 см^2 у дуже деформованих металах.

Наприклад, зі збільшенням числа дислокацій зменшується щільність кристала, зростає внутрішнє тертя, змінюються оптичні властивості, підвищується електроопір. Дислокації збільшують середню швидкість дифузії в кристалі і прискорюють старіння й інші процеси, що відбуваються за участю дифузії.

3. Поверхня твердого тіла.

Будь-яка обробка твердого матеріалу приводить до нерівноважного стану поверхні. Перехід поверхні в рівноважний стан супроводжується різними процесами: адсорбцією газів, пари і рідин, окисненням чи утворенням різних твердих плівок, дифузійним проникненням, т. ін.

Навіть в ідеальному кристалі властивості поверхневих і припо-верхневих шарів істотно відрізняються від об'ємних власти-востей матеріалу. Це зумовлено двома причинами: 1) несиметричністю сил, що діють на частинки в поверхневому шарі; 2) некомпенсованістю зв'язків цих частинок (рис. 1.13).

Усередині кристала на будь-яку частинку діють сили з боку частинок, що її оточують. Рівнодійна цих сил дорівнюватиме нулю, наприклад частинка *1*. На частинку кристала, розміщену в поверхневому шарі, діють несиметричні сили, рівнодія яких напрямлена всередину кристала, наприклад частинка *2*.

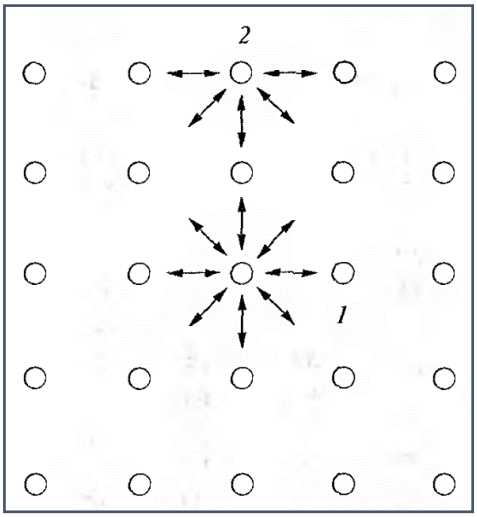


Рисунок 1.13 – Сили, які діють на частинки, розміщені в середині кристала ***1*** і в поверхневому шарі кристала ***2.***

Внаслідок розглянутих вище явищ поверхня твердого тіла зазвичай розглядається разом із шаром атомів, прилеглих до неї, тобто з приповерхневим шаром атомів.

Виникнення поверхні істотно впливає на розподіл вільних електронів у металі. На поверхні відбувається згладжування електронної щільності. З поверхні починається емісія електронів – так звана екзоелектронна емісія.

Видалення електронів із поверхні викликає появу позитивного заряду в шарах, прилеглих до поверхні, що призводить до появи негативного заряду на поверхні, тобто з'являється *поверхневий подвійний заряджений шар.*

Дефекти бувають на будь-якій реальній поверхні твердого тіла. *При нанесенні покриття взаємодія починається насамперед на дефектах поверхні,* оскільки розміщені поблизу них атоми виве дені з рівноважних, стійких положень і мають високу потенціальну енергію і, отже, є хімічно активнішими.

Якщо умовно рухатися від об'єму твердого тіла до його поверхні, то будову поверхневого шару схематично можна зобразии як: *неушкоджену основу; перехідну зону; зону орієнтованих кристалів з величиною зерна, меншою, ніж біля основи; зону дрібних неорієнтованих кристалів; оксидну плівку і розміщені на ній адсорбовані гази.* Товщина такого шару залежить від природи металу та умов його обробки, але, як правило, перевищує 50 мкм.

Особливо зростає кількість дефектів поверхні при абразивно-струминній обробці, що застосовується при підготовці поверхонь виробів під покриття.

4. Поверхнева енергія.

Мінімальна енергія, необхідна для утворення одиниці площі поверхні поділу фаз в умовах сталого об'єму і сталої температури, називається *поверхневою енергією* чи *енергією поверхні* поділу.

У зв'язку з тим, що в атомах на поверхні з одного боку немає сусідніх атомів, їх енергія більша, ніж енергія атомів усередині ґратки.

Надлишок енергії атомів на поверхні зумовлює виникнення поверхневої енергії.

Поверхнева енергія відіграє значну роль у процесах нанесення покриття. Поверхнева енергія твердої кристалічної основи, на яку наносять покриття, характеризується анізотропією.

Теоретичне та експериментальне визначення поверхневої енергії є складною задачею. Найбільш достовірні результати дає визначення її за допомогою рівнянь, що пов'язують теплоту сублімації з ближнім порядком у кристалі.

Ця теорія використовується здебільшого для оцінки поверхневої енергії металів і оксидів.

Мірою сил міжатомного зчеплення твердого тіла може служити *енергія зв'язку,* або, що те саме, *енергія атомізації* E_S. Енергія зв'язку – це енергія, необхідна для поділу твердого тіла на нейтральні атоми. Прийнято вважати, що для металів енергія зв'язку E_S дорівнює *теплоті сублімації* металу ΔH_S.

Поверхнева енергія – важлива характеристика, від якої залежить протікання багатьох процесів.

Вона визначає змочування і адгезію матеріалів у рідкофазних процесах, таких, як наплавлення, паяння, оплавлення покриття і його просочення розплавами.

Від поверхневої енергії залежать міцність зчеплення, зародження і ріст покриття при його нанесенні вакуумними методами. Вона визначає імовірність утворення зародків нової фази при фазових переходах у хімічних реакціях і при кристалізації.

5. Адсорбція.

Адсорбція – це здатність твердого тіла *(адсорбенту)* утримувати на своїй поверхні атоми і молекули іншої речовини – *адсорбату.*

Адсорбція відбувається під дією некомпенсованих сил міжатомної взаємодії в поверхневому шарі адсорбенту, які притягають молекули адсорбату з приповерхневої області. Адсорбція зменшує поверхневу енергію адсорбенту і є почат-

ковою стадією процесу взаємодії між твердою речовиною та газом.

У середньому на 1 $см^2$ чистої металевої поверхні припадає приблизно 10^{15} адсорбційних позицій. Із кінетичної теорії газів випливає, що при тиску 133,3 • 10^{-6} Па і температурі 20 °С чиста металева поверхня вкриється мономолекулярним шаром адсорбованого газу приблизно через 2 год.

Прийнято розрізняти *фізичну* і *хімічну* адсорбцію.

При *фізичній* адсорбції адсорбований шар зв'язаний з поверхнею твердого тіла силами Ван-дер-Ваальса, а при *хімічній* адсорбції (скорочено *хемосорбції)* – силами хімічних сил зв'язку, що виникають внаслідок хімічної взаємодії адсорбату з поверхнею твердого адсорбенту.

Існує кілька ознак, за якими прийнято відрізняти хімічну адсорбцію від фізичної. Звичайним критерієм є розходження в теплоті адсорбції. Теплота фізичної адсорбції зазвичай не перевершує 40 кДж/моль. Оскільки хімічні зв'язки міцніші, теплота хемосорбції досягає н окремих випадках 400 кДж/моль і більше.

6. Окиснення.

Речовини і матеріали, навіть дуже чисті, завжди містять у собі деяку кількість чужорідних атомів. Ці домішкові атоми, з'являючись на поверхні, відіграють роль хімічних дефектів.

Особливо велика роль хімічних дефектів у процесах окиснення металів. Оскільки перебудова поверхні і приповерхневого шару металу не приводить до повної втрати її хімічної активності, в умовах навколишнього середовища метали швидко вкриваються тонким шаром оксидів товщиною від кількох десятків до кількох сотень ангстремів.

Блиск металевої поверхні не зникає до товщини плівки оксидів 100 А. Оксидна плівка на "свіжій" металевій поверхні утворюється при звичайній температурі протягом кількох годин, а іноді і днів.

Лише золото, платина, срібло не мають на поверхні оксидних плівок при звичайних температурах (рис. 1.14).

Вони покриті так званим *комплексом адсорбції кисню,* якій відрізняється від оксиду структурою і міцністю хімічних зв'язків і може бути повністю вилучений нагріванням твердого тіла.

Властивості металевої поверхні, вкритої шаром адсорбованого кисню, відрізняються від властивостей поверхні металу, вкритої оксидом.

а б в

Рисунок 1.14 – Золото (а), серебро (б), платина (в)

Будова адсорбованої плівки двовимірна, тобто атоми кожного виду мають кількість сусідів, що відрізняється від їх кількості в оксидній плівці.

Плівку хемосорбованого кисню необхідно розглядати як хімічну речовину з певною структурою і термодинамічними константами, здатну до участі в рівноважних процесах. Дуже важливою особливістю цієї плівки є те, що вона зв'язана з металевою основою.

Адсорбована плівка містить у собі не тільки атоми адсорбованої речовини, а й поверхневі атоми металу. Ці атоми зв'язують тверде тіло з адсорбованою речовиною і тому перебувають у зовсім іншому стані, ніж атоми в об'ємі твердого тіла. З боку атмосфери плівка вкрита фізично адсорбованим киснем.

Хімічний зв'язок між киснем і атомами поверхні металу - іонний. Передача електронів від металу до кисню при утворенні зв'язку призводить до появи негативного заряду на плів-

ці і позитивного заряду - на її внутрішній поверхні.

Зв'язок між адсорбованим киснем і основою значно сильніший за зв'язок між киснем і металом в оксиді. Дослідження енергії зв'язку металів із киснем при окисненні вказують на зменшення теплоти адсорбції із зростанням товщини адсорбованого газу. Найміцніше зв'язані з металом перші шари оксиду.

Плівка оксиду утворюється і проходить різні адсорбційні стани, характерні для хемосорбції на металевій поверхні. Наприклад, для систем W-CO і $W-N_2$ хемосорбція на кожній грані кристала може бути поділена на такі стадії, які протікають послідовно:

1. Хемосорбція на непорушеній металевій поверхні;

2. Атомне перегрупування, при якому поверхневі атоми металу залишають свої місця. Цю стадію називають *корозійною хемосорбцією;*

3. Адсорбція додаткових молекул газу на іонах металу, що виникають внаслідок процесів перебудови при атомному перегрупуванні за п. 2.

Схематично появу плівки оксиду на поверхні металу з хемосорбованого кисню (рис. 1.15, *а*) можна подати як результат перебудови атомів металу і кисню поблизу поверхні таким чином (рис. 1.15, *б*), щоб просторовий розподіл цих двох видів атомів був близьким до того, що спостерігається в оксиді.

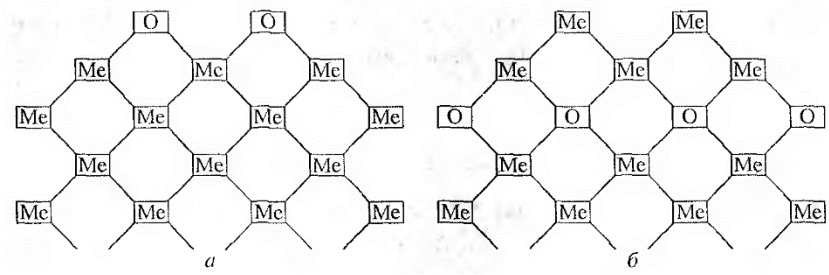


Рисунок 1.15 – Схема процесу появи плівки оксиду на поверхні металу:
а – стадія хемосорбції; *б* – стадія перебудови

При зміні взаємного розміщення атомів відбувається збільшення кількості найближчих сусідів для атомів як металу, так і для кисню. Внаслідок цього структура упорядковується, зменшується асиметричність зв'язків метал-кисень в адсорбованій плівці і відновлюється іонний характер зв'язків, який є в оксиді.

7. Сегрегаційні явища на поверхні.

При нагріванні чи деформації твердого тіла атоми виду А, розчинені в матриці з атомів В, можуть дифундувати і збиратися поблизу поверхні твердого тіла. Це явище має назву *поверхневої сегрегації* (рис. 1.16).

Сегрегація змінює поверхневу енергію, що впливає на фрикційні та адгезійні властивості твердого тіла. Поверхнева сегрегація може дуже змінити взаємодію поверхні з навколишнім середовищем, наприк-лад, з мастильними матеріалами.

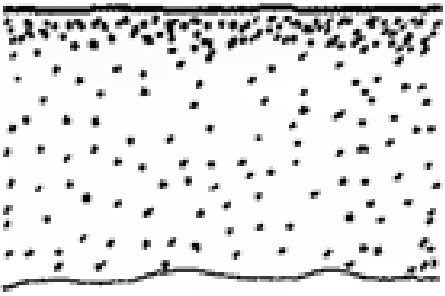


Рисунок 1.16 – Поверхнева сегрегація.

У сталі, навіть при невеликій добавці кремнію, формування захисних мастильних плівок визначається взаємодією молекул мастильних речовин з атомами кремнію, а не заліза.

Іноді спостерігається явище, зворотне поверхневій сегрегації – *збідніння* приповерхневої зони атомами легуючої домішки. Механізм цього явища може бути різним (рис. 1.17).

Якщо атоми домішки мають велику леткість, то вони залишають поверхню при нагріванні. Таке явище часто спосте-

рігається при розчиненні газів у металі.

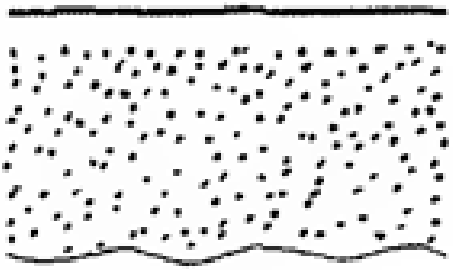


Рисунок 1.17 – Збіднення поверхні

Можлива дифузія домішкових атомів з поверхневого шару в об'єм матеріалу. У цьому випадку властивості поверхні визначаються, насамперед, властивостями атомів основного матеріалу, а не розчинника.

Можлива ситуація, коли домішкові атоми скупчуються поблизу поверхні. На відміну від сегрегації зона високої концентрації атомів не локалізується на самій поверхні (рис. 1.18).

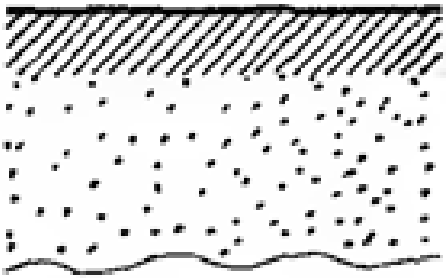


Рисунок 1.18 – Скупчення домішок поблизу поверхні

Прикладом може бути азотування. Насичення азотом приповерхневого шару заліза приводить до його зміцнення внаслідок виділення нітридів заліза.

Азот не локалізований на поверхні, а в складі хімічної сполуки із залізом розміщується в приповерхневому шарі.

Зміна складу поверхневого шару може бути зумовлена також утворенням на поверхні вторинної фази (рис. 1.19).

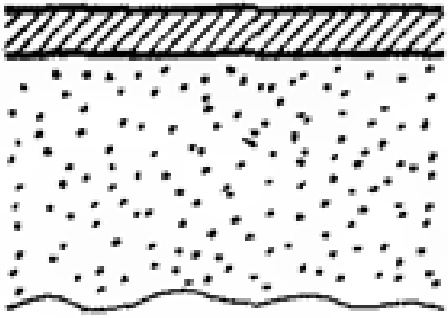


Рисунок 1.19 – Утворення вторинних фаз

Така ситуація можлива, якщо елементи А і В сплаву утворюють між собою хімічну сполуку. За умови, коли концентрація домішкових атомів А зростає і, зрештою, починає перевищувати границю розчинності, утворюється сполука чи вторинна фаза.

Сполука може виникати на самій поверхні, що надає їй нові властивості, які відрізняються від об'ємних властивостей матеріалу. Прикладом може бути утворення нової фази при розчиненні вуглецю в залізі. При досягненні досить високої концентрації вуглецю в сталі з'являється нова фаза – карбід заліза.

Поширеним дефектом кристалічних поверхонь є межі зерен. З ними пов'язана наявність надлишкової енергії, і найінтенсивніше сегрегація відбувається саме поблизу меж (рис. 1.20).

Інтенсивна сегрегація домішкових атомів поблизу межі зерна також впливає на поверхневі, у тому числі фрикційні, властивості.

При терті ковзання домішка, локалізована поблизу міжзернової межі, розосереджується на всій контактній поверхні, а самі межі відіграють роль своєрідних резервуарів для домішкових атомів.

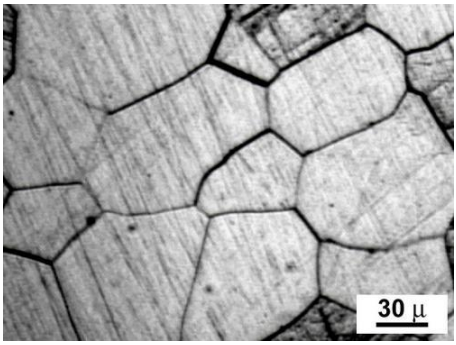


Рисунок 1.20 – Межі зерен в кристалі

8. Зношування поверхонь.

Види зношування визначаються умовами експлуатації деталей і конструкцій. Різні види зношування можна об'єднати в чотири основні групи:

1. Механічну
2. Молекулярно-механічну
3. Корозійно-механічну
4. Кавітаційну

Основну групу механічного виду зношування становить *абразивне зношування,* тобто зношування поверхні деталі внаслідок різання чи дряпання її твердими частинами.

Механізм цього виду зношування полягає у видаленні матеріалу з поверхні у вигляді дуже дрібної стружки або фрагментів металу, видавленого по боках пластично-деформованої подряпини, або у вигляді дисперсних частинок, що крихко відокремлюються при однократній чи багаторазовій діях.

Абразивне зношування (рис. 1.21) характерне для механізмів і конструкцій у яких робочі органи безпосередньо стика-

ються з породами, ріжуть ґрунт, а також, коли тверді частинки, які захоплюються потоком води, повітря, газів, зі значною швидкістю стикаються з поверхнею деталей та конструкцій.

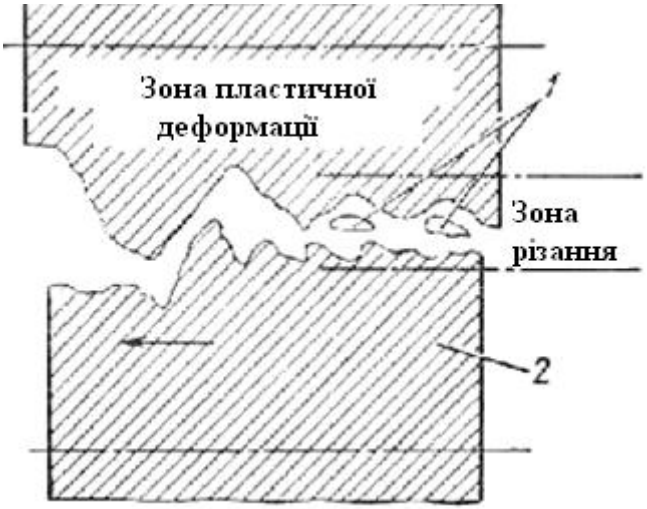


Рисунок 1.21 – Схема абразивного зносу:
1 – абразивні частинки; 2 – відносно твердіший гребінець

Зношування від утомленості здійснюється при повторних досить високих напруженнях, які сприймаються матеріалом поверхні, особливо при чергуванні знака напружень.

Внаслідок цього в поверхні виникають мікротріщини, які призводять до місцевого руйнування, викришування у вигляді ямок (рис. 1.22).

Цей вид зношування виявляється лише через деякий період роботи деталі. До такого виду зношування призводить і малоциклова втома, що виникає при повторних пластичних деформаціях тих самих об'ємів металу.

Основним видом *молекулярно-механічного зношування* є адгезійне зношування, яке полягає в схоплюванні металів при терті внаслідок виривання і перенесення частинок із поверхні

однієї деталі, та налипання їх на сполучену деталь (рис. 1.23).

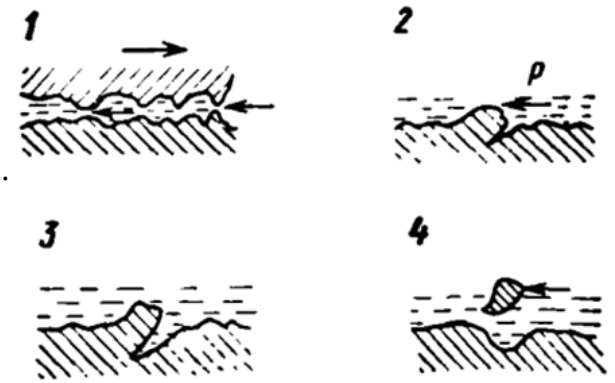


Рисунок 1.22 – Схема втомного зношування поверхні:
1 – початковий період; 2 – зародження мікротріщини; 3 – розвиток мікротріщини; 4 – відділення частинки від поверхні

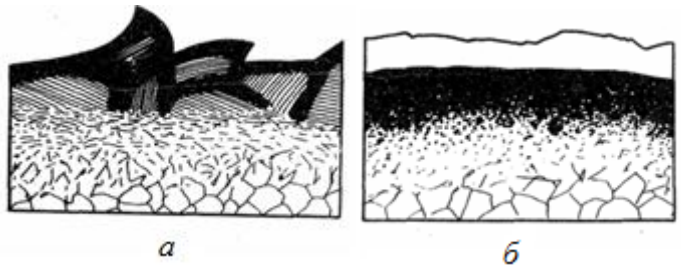


Рисунок 1.23 – Молекулярно-механічне зношування:
а – схоплювання I роду; *б* – схоплювання II роду

Це призводить до появи на поверхні рисок і задирок, заїдання сполучених деталей і в результаті до різкого пошкодження поверхні. У цих випадках виявляється молекулярна взаємодія між зближеними поверхнями деталей.

Необхідна умова для схоплювання – це безпосереднє зі-

ткнення "ювенільних" поверхонь, які виникають у процесі спільного пластичного деформування. Зношування здійснюється внаслідок утворення металевих зв'язків між поверхнями деталей.

Корозійно-механічне зношування – це механічне зношування, ускладнене явищами корозії. Поверхня металу, вступаючи у взаємодію з киснем чи іншим окиснювальним середовищем, утворює оксидну плівку, яка, внаслідок її неметалевої природи, не здатна до схоплювання й у початковий момент ізолює поверхні сполучених деталей від безпосереднього контакту (рис. 1.24).

Рисунок 1.24 – Корозійно-механічне зношування.

При терті оксидні плівки поступово стираються і, відриваючись, видаляються з поверхні контакту. Потім така плівка утворюється знову, після чого руйнується при терті. Таким чином, зношування являє собою видалення безупинно відновлювальних оксидних плівок.

Посилення зношування при терті відбувається у випадку наявності агресивних середовищ.

Фретінг-корозія - особливий вид зношування в місцях сполучених деталей, що перебувають під навантаженням, яке виникає при дуже малих повторних відносних переміщеннях,

наприклад, при поздовжніх вібраціях (рис. 1.25).

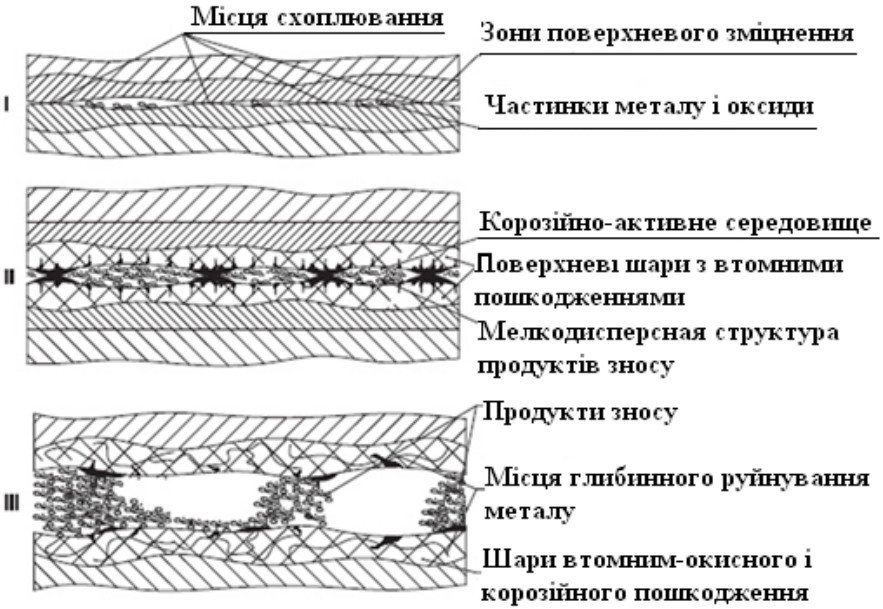


Рисунок 1.25 – Механизм разрушения металлов при фреттинг-коррозии:
I – упрочнение сопряженных поверхностей; II – формирование коррозионно-активной среды; III – развитие глубинных разрушений металла

Можна виділити три основні стадії розвитку фретинг-корозії металів в умовах сухого тертя.

На першій стадії спостерігається зміцнення контактуючих поверхонь контакту. Виступи взаємодіють один з одним пластично. Цьому сприяє схоплювання ювенільного металу в дотичних мікронерівностей після руйнування природних оксидних плівок. Зруйновані внаслідок втоми виступи і срезавшиеся вузли схоплювання створюють первинні продукти руйнування, з яких частина окислюється. Однак більшу частину продуктів зносу на цій стадії фретинг-корозії становлять не-

металеві частинки.

На другій стадії в поверхневих шарах продовжують накопичуватися втомні пошкодження, і в зоні тертя формується корозійно-активне середовище внаслідок адсорбції на оксидах кисню і вологи. Швидкість зносу на цій стадії невелика, і знос пов'язаний з руйнуванням утворюються на поверхні тертя оксидних плівок, причому кількість продуктів зносу в зоні тертя досягає рівноважного значення. Утворюються оксиди високої дисперсності надають процесу каталітичний характер. При цьому між контактуючими поверхнями формується реакційна електролітична середовище.

Третя стадія пов'язана з остаточним руйнуванням зон пошкоджуваності контактних поверхонь, попередньо вже розпушених усталостными і корозійними процесами. У цей період швидкість зношування поверхневих шарів металу збільшується.

Кавітаційне зношування відбувається в потоці рідини, яка рухається зі змінною швидкістю в закритому каналі по ділянках істотно зниженого тиску, наприклад, при обтіканні перешкод, де виникають місцеві розриви цілісності з утворенням з міхурів (рис. 1.26).

Потрапляючи з потоком в область більш високого тиску, міхури схоплюються, і, якщо це відбувається на поверхні деталі, рідина з великою швидкістю вдаряється об стінку.

Багаторазові повторні удари рідини об ту саму ділянку металу через якийсь час приводять до його місцевого руйнування й утворення поглиблень (рис. 1.26).

9. Підготовка поверхонь.

Попередня підготовка поверхні має важливе значення при будь-якому методі нанесення покриття – газотермічному чи вакуумному. Метою підготовки є підвищення активності атомів поверхні і полегшення їх з'єднання з атомами покриття.

Рисунок 1.26 – Кавітаційний знос на гільзі циліндра двигуна та утворення поглиблень.

Виходячи з розглянутих уявлень про будову поверхні твердих тіл, можна виділити такі методи активації основи:

1. Хімічна активація
2. Фізична активація
3. Термічна активація

Контрольні питання

1. В яких основних формах існує речовина? Що відрізняє кожну із форм?
2. У чому полягає суть фізичної і хімічної неоднорідності?
3. Що є основною структурною ознакою поверхні? Чим розрізняються зміщені і перебудовані поверхні?
4. Як схематично можна зобразити будову поверхневого шару?
5. Що є причиною виникнення поверхневої енергії?
6. Що є мірою сил міжатомного зчеплення у твердому тілі?

7. Що визначає змочування і адгезію матеріалів у рідкофазних процесах?

8. У чому полягає суть явища адсорбції?

9. Яка різниця між фізичною і хімічною адсорбцією?

10. На які стадії може бути поділена хемосорбція?

11. Як схематично можна зобразити появу плівки оксиду на поверхні металу з хемосорбованого кисню?

12. У чому суть і які різновиди поверхневої сегрегації?

13. Які основні види зношування поверхонь і умови їх прояву?

14. Які застосовуються основні види попередньої підготовки поверхонь?

ЛЕКЦІЯ 2

МЕТОДИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ.

1. Основні поняття та визначення. 2. Класифікація методів інженерії поверхні

1. Основні поняття та визначення

В останні роки в розвинених країнах був введений і поширений, подібно до терміна *"інженерія матеріалів"*, термін *"інженерія поверхні"*.

Інженерія поверхні металів охоплює всі наукові і технічні аспекти виготовлення поверхневих шарів і нанесення більшості покриттів.

Використовуються такі визначення:

"поверхневий шар металу" – шар металевого матеріалу, обмежений поверхнею оброблюваної деталі, що містить у собі об'єм матеріалу з властивостями, відмінними від властивостей матеріалу основи;

"покриття" – шар металу, сплаву, керамічного матеріалу, пластмаси чи інших матеріалів, або їх композиції, стійко нанесений на поверхню металевого матеріалу;

Термін *"інженерія поверхні"* не охоплює лакофарбових покриттів, покриття тимчасового захисту і деяких інших. Мета зміни властивостей поверхні в обох випадках – підвищення експлуатаційної стійкості (підвищення міцності, корозійно- і зносостійкості), відновлення геометричних розмірів деталей або покращення їх декоративних властивостей, створення виробів унікального функціонального призначення.

Таким чином *інженерія поверхні металів* є новим науковим напрямком, який займається розробкою методів обробки поверхневих шарів і нанесення покриттів із заданими властивостями, дослідженням їх структури й експлуатаційних властивостей.

На рис. 2.1 показані типи структури поверхневих шарів. У загальному випадку обробка поверхневого шару може викликати зменшення або збільшення розмірів деталі; покриття завжди збільшують його розміри.

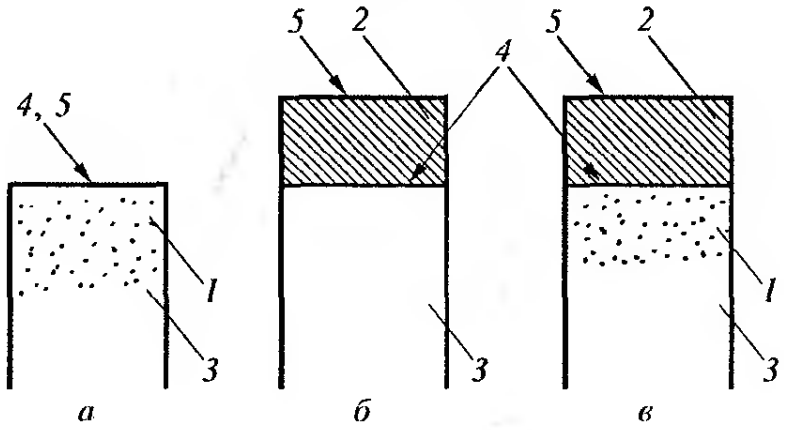


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення поверхневих шарів:
а – тільки поверхневий шар; б – тільки покриття;
в – поверхневий шар + покриття; 1 – поверхневий шар;
2 – покриття; 3 – основа; 4 – первинна поверхня деталі;
5 – остаточна поверхня деталі

2. Класифікація методів інженерії поверхні.

Методи керування властивостями поверхні умовно можна поділити на такі основні групи:

– нанесення покриттів;

– легування поверхні;

– модифікація структури поверхневого шару.

При нанесенні покриття на поверхні виробу габаритні розміри деталі збільшуються на товщину шару покриття, що дає можливість використовувати методи нанесення покриттів не тільки при виготовленні нових, але й при відновленні спрацьованих деталей і конструкцій.

При легуванні поверхні або модифікації її структури зміна властивостей поверхні відбувається внаслідок зміни хімічного складу поверхневого шару матеріалу деталі чи зміни його структурного стану (аморфизація, створення метастабільних структур та ін.). Розміри виробу при цьому не змінюються.

При нанесенні покриттів, як правило, забезпечується нова якість деталі (підвищується довговічність, покращуються особливі тепло- і електрофізичні властивості, набувається привабливий зовнішній вигляд тощо). При цьому практично не існує обмежень на сполучення матеріалів у системі основа-покриття.

Залежно від виду енергії, яка використовується для обробки, всі методи обробки (створення) поверхневих шарів умовно можна поділити на шість груп (рис. 2.2).

Методи кожної з груп дають можливість одержати певний вид поверхневого шару визначеної товщини та призначення і поділяються на кілька способів, причому ті самі способи можуть бути реалізовані при використанні різних процесів (рис 2.3).

Механічні методи використовують енергію тиску інструментів або частинок для холодного зміцнення поверхневого шару:

Рисунок 2.2 – Методи обробки (створення) поверхневих шарів

– обкочування, тобто прикладання постійного чи змінного тиску до поверхні деталі, що обробляється, інструментом із гладкою поверхнею (без крайок) у формі ролика, кульки чи диска з метою зміцнення холодним деформуванням поверхневого шару;

– наклепу, тобто використання кінетичної енергії сталевих, керамічних чи скляних частинок у вигляді кульок чи дробу, які викидаються відцентровою силою, тиском стиснутого повітря (наклеп дробом) чи кінетичною енергією інструмента з гладкою поверхнею (молотка), що вдаряє по поверхні деталі, яка обробляється, з метою холодного зміцнення поверхневого шару.

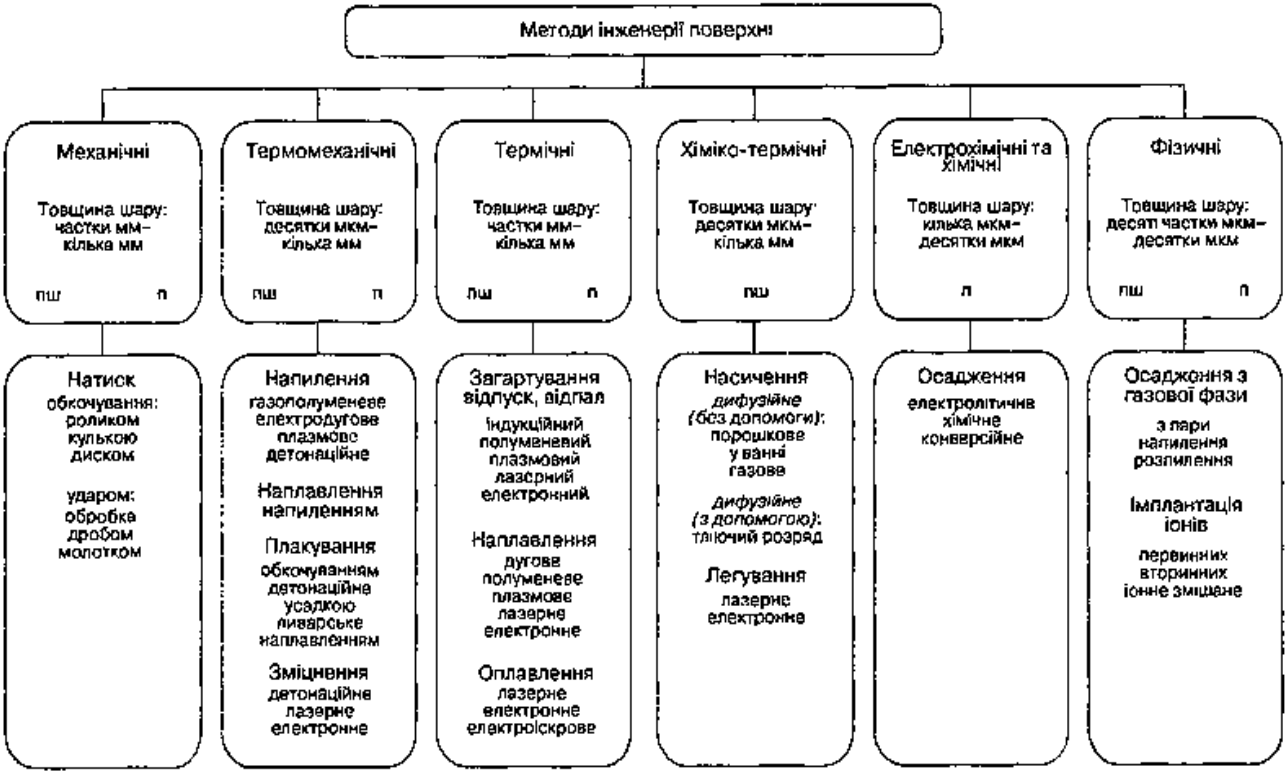


Рисунок 2.3 – Класифікація методів за способом утворення шару та покриття:
пш - поверхневий шар; п - покриття

Термомеханічні методи використовують спільний вплив теплової і кінетичної енергії з метою одержання покриттів, рідше поверхневих шарів, шляхом:

– напилення (газотермічного), тобто формування на поверхні деталі шару матеріалу шляхом взаємодії з основою потоку частинок, нагрітих і прискорених у струмені високотемпературного газу;

– плакування поверхні, тобто покриття металу основи іншим металом чи сплавом за допомогою тиску на матеріал покриття (наприклад, прокаткою, детонацією, усадкою) при відповідно підвищеній температурі; у випадку нагрівання основи до температури, значення якої нижче, ніж температура змін у твердому стані – процес можна віднести до механічних методів;

– зміцнення металу чи сплаву ударною хвилею, що виникає внаслідок надшвидкого випаровування матеріалу основи завдяки дії сильно концентрованого потоку електронів (зміцнення електронами) чи фотонів (лазерне зміцнення).

Термічні методи використовують явища, пов'язані з впливом теплової енергії на матеріали (переважно метали) з метою зміни:

– структури металевих матеріалів у твердому стані (загартування, відпуск, відпал);

– стану (перехід із твердого стану в рідкий і назад у твердий) металу, який піддається поверхневому переплавленню чи покриттю - наплавленню, оплавленню.

Хіміко-термічні методи використовують спільний вплив теплової енергії і хімічно активного середовища на метал з метою насичення його іншою речовиною для одержання необхідних властивостей поверхневого шару зі зміненим хімічним складом та структурою:

– дифузійне насичення без участі додаткових факторів, що прискорюють перебіг процесу, дуже довготривале за часом (кілька десятків годин) і називається неактивованим;

– дифузійне насичення, що відбувається за участю фактора, який прискорює і активізує процес дифузії, триває дещо

менше (до кількох годин) і називається активованим, а метод – CVD (Chemical Vapour Deposition – хімічне осадження з газової фази);

– процес насичення, під час якого відбувається змішування легуючих компонентів з основою, включаючи і плавлення, а також часткова дифузія, називається легуванням (лазерне, електронне) і триває частки секунди.

Електрохімічні і хімічні методи використовуються для одержання металевих чи неметалевих покриттів на металевій поверхні шляхом осадження. Ці методи охоплюють електрохімічне (електролітичні і конверсійні покриття) і хімічне (хімічні і конверсійні покриття) відновлення;

– електролітичне (гальванічне) осадження дає можливість одержати покриття з металу чи сплаву на іншому металі (на катоді) за допомогою електричного струму іонів металів;

– хімічне осадження дає можливість одержати покриття з металу чи сплаву внаслідок хімічного відновлення і застосовується для нанесення покриттів на поверхні, на які важко наносити електролітичні покриття (деталі складної форми, глибокі отвори малого діаметра та ін.);

– конверсійне осадження дозволяє хімічною чи електрохімічною обробкою одержати на поверхні металу чи сплаву покриття із сполук металу основи: хроматів, фосфатів, оксидів та ін.

Фізичні методи використовують для осадження на поверхні металів чи неметалів покриттів, зв'язаних з основою адгезійно (у меншій мірі – дифузійно), чи для обробки поверхневого шару за допомогою різних фізичних ефектів, що протікають при зниженому тиску, у більшості випадків за участю іонів (осадження з пари, напилення, розпилення, імплантація іонів металевих і неметалевих речовин):

– осадження з газової фази (методи PVD – Physical Vapour Deposition) речовин чи їх іонів здійснюється перетворенням тугоплавкого матеріалу в пару і осадженням пари на поверхні холодної чи мало підігрітої основи. У випадку подавання газу та використання електричних явищ можливе оса-

дження сполук металу з газом (наприклад, нітридів, карбідів, боридів, силіцидів, оксидів);

– імплантація іонів металів і неметалів здійснюється іонізацією пари металів чи газів, прискоренням позитивних іонів за допомогою електричних полів до швидкостей, при яких досить кінетичної енергії іона для того, щоб проникнути в метал чи неметал на глибину кількох атомних шарів.

Контрольні питання

1. Яка суть поняття "інженерія поверхні"?
2. Які основні напрямки інженерії поверхні, їх суть?
3. За якими ознаками класифіковано методи інженерії поверхні?
4. У чому полягає суть механічних методів обробки (створення) поверхневих шарів?
5. У чому полягає суть термомеханічних методів обробки (створення) поверхневих шарів?
6. У чому полягає суть термічних методів обробки (створення) поверхневих шарів?
7. У чому полягає суть хіміко-термічних методів обробки (створення) поверхневих шарів?
8. У чому полягає суть електрохімічних і хімічних методів обробки (створення) поверхневих шарів?
9. У чому полягає суть фізичних методів обробки (створення) поверхневих шарів?

ЛЕКЦІЯ 3.

ГАЗОТЕРМІЧНЕ НАПИЛЕННЯ.

1. Історія створення способу напилення металу. 2. Джерела енергії

1. Історія створення способу напилення металу

Найважливіших напрямком сучасної інженерії поверхні є

газотермічне напилення покриттів (ГТН), початок історії якого відноситься до 1909 р., коли перший винахідник способу напилення металу на поверхню Макс Ульріх Шооп, розпилюючи свинець з допо-могою стаціонарної тигельної установки, отримував покриття на різних матеріалах (рис. 3.1).

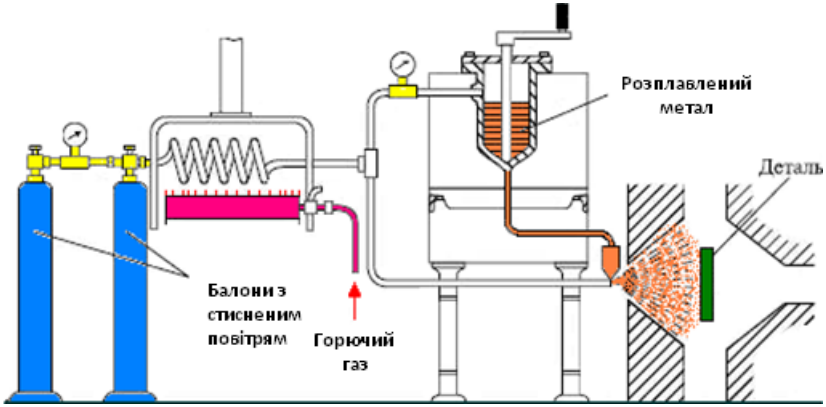


Рисунок 3.1 – Установка тигельного розпилення

На основі його технології в Цюріху в 1909 році був відкритий завод з металізації. У 1913 році М. У. Шооп запатентував конструкцію газополуменевого розпилювача, в якій матеріал для розпилення подавався в полум'я газового пальника у вигляді дроту.

Газотермічне нанесення покриттів – отримання покриття з нагрітих і прискорених частинок матеріалу з використанням високотемпературного газового струменя. При співударі частинок з основою або напиленим матеріалом відбувається їх сполучення внаслідок зварювання, адгезії і механічного зчеплення.

За енергетичною ознакою методи газотермічного нанесення покриттів поділяються на плазмовий, газополуменевий, електродуговий і детонаційний, а також газодинамічний (рис. 3.2).

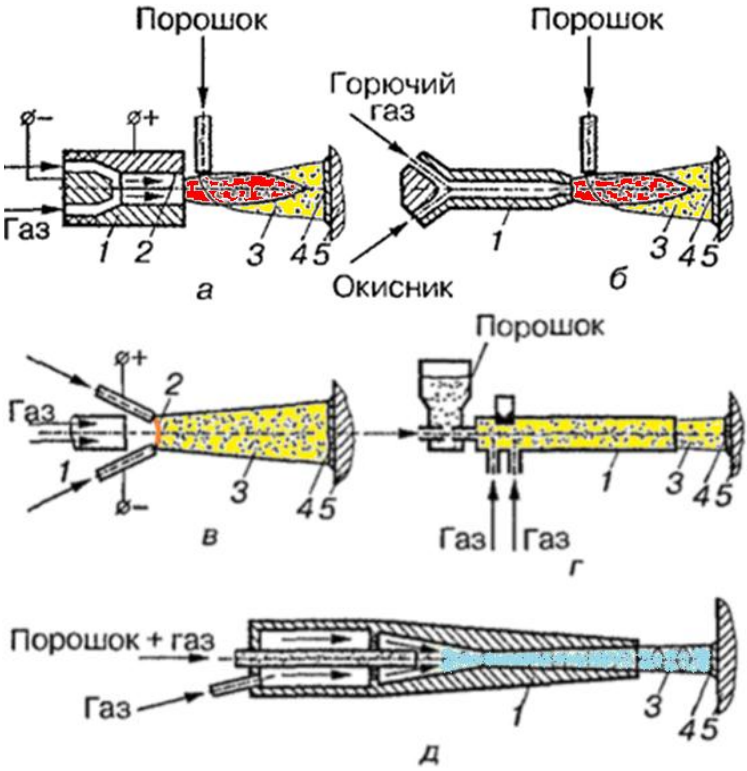


Рисунок 3.2 – Принципові схеми методів газотермічного нанесення покриття:
а – плазмовий; *б* – газополуменевий; *в* – електродуговий;
г – детонаційний; *д* – газодинамічний, де *1* – розпилювач;
2 – дуга; *3* – газопорошковий потік; *4* – покриття; *5* – основа

Ці методи розрізняються типом джерела енергії, яка витрачається на нагрівання та прискорення матеріалу, що створює покриття.

2. Джерела енергії.

Газополуменевий струмінь.

Як джерело енергії для нагрівання та прискоре-ння частинок матеріалу, який утворює покриття, найчастіше використ-

товується енергія горіння *газів* і *пари* рідких пальних у суміші з киснем або повітрям.

Переважно застосовуються вуглеводневі гази типу C_xH_y або їх суміш, і найбільш поширений серед них – ацетилен (C_2H_2).

Ацетилен у суміші з киснем має найвищу температуру полум'я – 3100-3200°С; технічний пропан – 2700-2800°С; бутан – 2400-2500°С; метан – 2400°С; природний газ – 2000-2200°С; водень – 2600°С.

Повне згоряння ацетилену відбувається за реакцією:

$$C_2H_2 + 2{,}5O_2 = 2CO_2 + H_2O + Q \qquad (3.1)$$

де C_2H_2 – ацетилен;

O_2 – кисень;

CO_2 – вуглекислий газ;

H_2O – вода;

Q – теплота реакції згоряння ацетилену.

Теплота реакції згоряння ацетилену Q складається з теплоти реакції екзотермічного розпаду ацетилену і суми теплот первинних реакцій згоряння вуглецю і водню.

Форма, будова ацетилено-кисневого полум'я та діаграма розподілу температури в зонах (рис.3.3)

Процес горіння ацетилену має кілька стадій:

– стадія підготовки пального до згоряння характерна наявністю пірогенного (теплового) розкладення ацетилену в рівновазі з киснем, який протікає в ядрі 1 полум'я.

– пальне розкладається на складові елементи: вуглець і водень (C і H_2). Кінцевим продуктом пірогенного розкладення ацетилену за наявності кисню, який називається первинним, є CO і H_2.

Для пірогенного розкладення на один об'єм ацетилену потрібний один об'єм кисню. Полум'я з таким складом газової суміші називається нормальним.

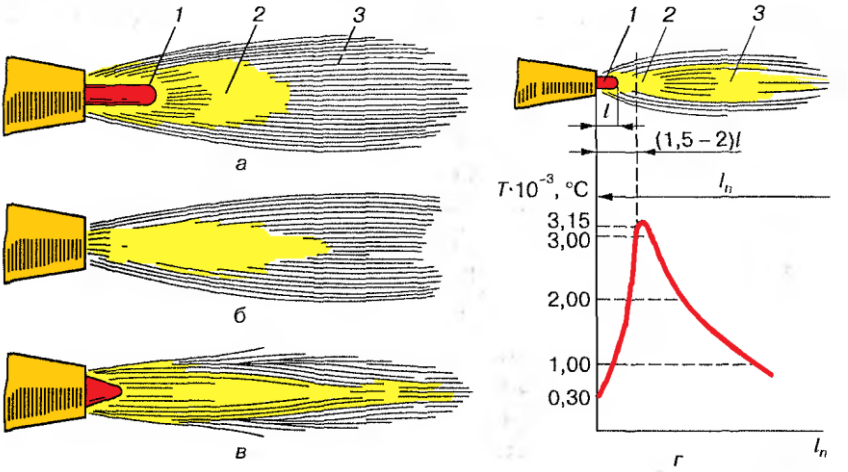


Рисунок 3.3 – Форма, будова ацетилено-кисневого полум'я та діаграма розподілу температури в зонах,
де *а* – нормальне полум'я; *б* – вуглецеве; *в* – окиснювальне;
г – діаграма розподілу температури

Практично через те, що невелика кількість водню згоряє з утворенням водяної пари внаслідок кисню горючої суміші і через деяку забрудненість кисню, який надходить із пальника, співвідношення між об'ємами кисню і ацетилену практично дещо більше за одиницю:

$$\beta = \frac{V_к}{V_a} = 1{,}15 - 1{,}20 \qquad (3.2)$$

де $V_к$ – об'єм кисню, м^3; Va – об'єм ацетилену, м^3.

Стадія займання проходить у середній зоні *2* полум'я і характеризується процесом активного окиснення CO і H_2 до вуглекислого газу CO_2 і водяної пари H_2O. Момент переходу процесу в стадію активного окиснення і є процесом горіння.

Стадія догоряння проходить у зоні *3* факела полум'я і характеризується процесом окиснення продуктів пірогенного розкладення ацетилену в кінцеві продукти CO_2 і H_2O. Процес догоряння відбувається з вторинним киснем, тобто внаслідок

кисню навколишнього середовища.

Стадії процесу горіння характеризуються також зміною темпе-ратурного стану суміші. На першій стадії, яка проходить в ядрі *1* полум'я, підвищується температура займання. На другій стадії (середня зона *2* полум'я) температура різко підвищується від температури займання до максимальної (приблизно 3150 °С) температури полум'я. На третій стадії (факел *3*) відбувається зниження температури.

Полум'я суміші ацетилену і кисню прийнято поділяти на:

– нормальне полум'я (β = 1,1 - 1,2) інтенсивно протидіє окисненню;

– окиснювальне;

– вуглецеве (полум'я з надлишком ацетилену) не відновлює метал, а насичує його вуглецем.

Детонаційна хвиля.

Детонація – це процес хімічного перетворення горючої суміші при поширенні в ній зони горіння у вигляді детонаційної хвилі. Остання рухається з максимально можливою для даних умов швидкістю, яка перевищує швидкість звуку в даній речовині.

Для ацетилено-кисневих сумішей швидкість детонації становить приблизно 2000-3000 м/с. Детонаційна хвиля являє собою комплекс ударної хвилі та зони хімічної реакції, і її швидкість стала для даних геометричних розмірів ствола і складу газу.

В ударній хвилі газ стискається до кількох десятків атмосфер, температура підвищується до кількох тисяч градусів і стає значно більшою за критичну температуру, при якій газова суміш вступає в реакцію.

За зоною хімічної реакції перебувають продукти детонації, які мають високий тиск і температуру. Вони йдуть слідом за детонаційною хвилею зі швидкістю, яка менша за швидкість детонаційної хвилі на швидкість звуку.

Після досягнення детонаційною хвилею відкритого кінця ствола вона руйнується. Загасаюча ударна хвиля може переміщуватися і поза стволом, але на відстані, більшій, ніж 100

мм, її амплітуда близька до нуля.

Продукти детонації починають витікати зі ствола у вигляді надзвукового нерозрахункового струменя; температура і тиск продуктів детонації у стволі зменшуються. Витікання відбувається доки тиск продуктів на виході зі ствола не зрівняється з атмосферним (рис. 3.4).

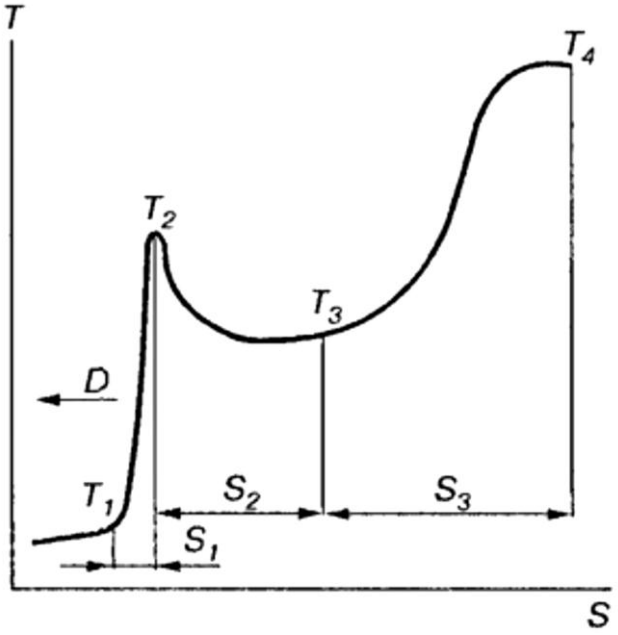


Рисунок 3.4 – Структура детонаційної хвилі

Перед ударною хвилею знаходиться незбурена газова суміш із температурою T_1. За фронтом ударної хвилі, який має протяжність S_1 температура набагато вища (T_2), а газ дуже стиснутий.

У зоні протяжністю S_2 відбувається релаксація обертальних і коливальних ступенів вільності, тобто взаємні переходи енергії ступенів вільності поступального руху, обертання і коливання молекул при їх співударі.

У зоні релаксації температура знижується до величини T_3 внаслідок зменшення енергії поступального руху, але при цьому значно збільшується енергія коливального руху, що полегшує проходження хімічних реакцій. Потім температура в зоні протяжністю S_3 знову збільшується і досягає максимального значення T_4.

Після формування детонаційної хвилі швидкість її поширення збільшується доки не досягне значення для даної суміші в даних умовах. Детонаційна хвиля поширюється далі і має фіксовані параметри: тиск, густину, температуру тощо. Швидкість детонаційної хвилі для різних газів дорівнює від 1500 до 3500 м/с.

Швидкість детонації залежить від швидкості звуку в продуктах детонації і теплоти, яка виділяється внаслідок хімічної реакції.

Аналіз властивостей різних сумішей газів показує, що найбільш прийнятною для детонаційного напилення є суміш ацетилену з киснем. Вона і знайшла широке практичне використання. Розподіл температури, тиску, густини і концентрації речовини в зоні реакції представлені на рис. 3.5.

Ширина зони реакції залежить від тривалості реакції в детонаційній хвилі:

$$b_p = (D - w)t_p, \tag{3.3}$$

де b_p – ширина зони реакції;

D – швидкість руху детонаційного фронту хвилі відносно стінок ствола, м/с;

w – швидкість продуктів детонації, м/с;

$t_р$ – середній час реакції, с.

Швидкість продуктів детонації w безпосередньо за детонаційною хвилею менша за швидкість детонації на швидкість звуку в даному середовищі.

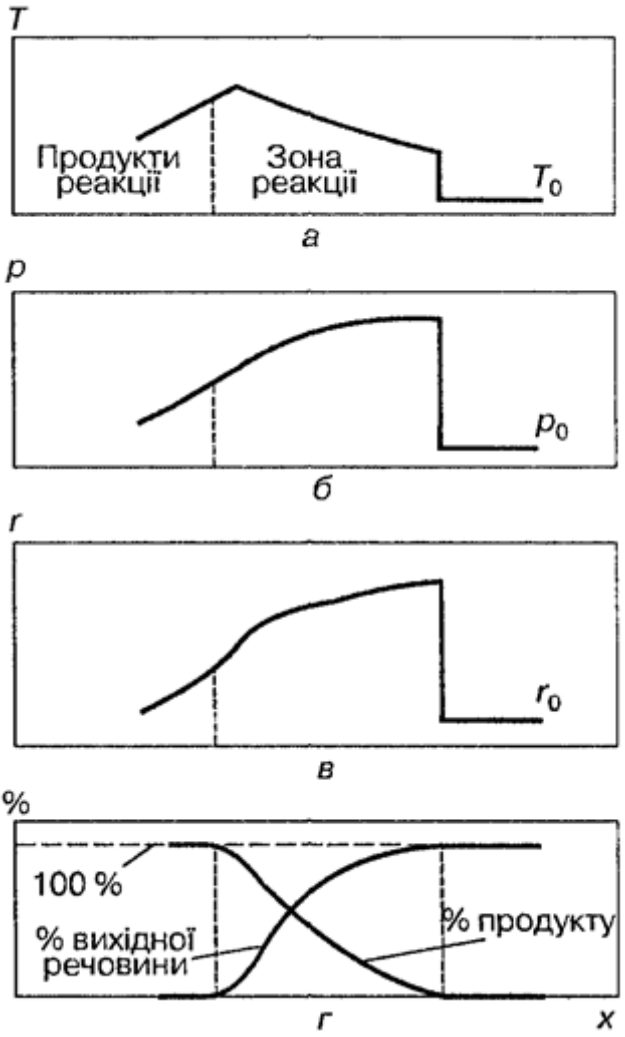


Рисунок 3.5 – Розподіл у зоні реакції детонаційної хвилі:
а – температури; б – тиску; в – густини;
г – концентрації вихідної речовини

У таблиці 3.1 наведені значення початкових швидкостей витікання продуктів детонації зі ствола.

Таблиця 3.1 – Початкові швидкості витікання продуктів детонації зі ствола

Склад детонаційной суміші	Швідкість, м/с
C_2H_2	1280
$C_2H_2 + 2{,}5O_2$	1050
$C_2H_2 + O_2+N_2$	1240
Природний газ + O_2	600

Зміни швидкості на осі струменя узгоджується із загальною картиною витікання вільних надзвукових струменів. Розподіл газодинамічних параметрів вздовж надзвукового струменя, а також його структура залежать від ступеня нерозрахунковості $n_н = p_а / p_н$, де $p_а$ - тиск на зрізі ствола; $p_н$ – тиск навколишнього середовища; $n_н < 1$ – недорозширений, $n_н = 1$ – розрахунковий; $n_н > 1$ – перерозширений струмінь. При детонаційному напиленні $n_н$ змінюється при витіканні приблизно від 50 до 1.

Електрична дуга називається дугою через характерну вигнуту форму, яка виникає завдяки впливу конвекційних потоків нагрітого газу, в якому горить дуга, та від взаємодії заряджених часток дуги з магнітним полем самой дуги.

Дуговий розряд відрізняється від інших видів електричних розрядів у газах наступними параметрами:

– висока температура $T \approx 40\,000…50\,000$ К;

– значна сила струму $I \approx 50…10\,000$ А;

– низька напруженість електричного поля $E \approx 10…60$ В/см.

Залежність величині падіння напруги між електродами від величини струму $U = f(I)$ називається вольт-амперною характеристикою дугового розряду.

В міжелектродному просторі дуги спостерігається дуже нерівномірний по довжині розподіл електричного поля (стри-

бки потенціалу в приелектродних областях) і, відповідно, нерівномірне падіння напруги по довжині дуги (рис. 3.6)

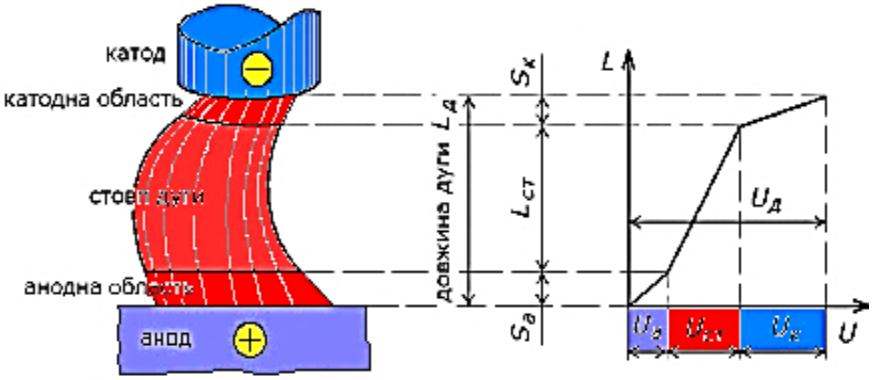


Рисунок 3.6 – Зони дугового розряду

Стовп дуги займає практично всю довжину дуги, за винятком дуже малих за розмірами приелектродних областей. Приелектродні області вирізняються насамперед значними величинами напруженості електричного поля: $E = \Delta U/\Delta I$, яка може сягати мільйонів вольт на сантиметр.

Стовпом дуги називають простір між приелектродними областями, заповнений електрично-нейтральним іонізованим газом.

Розрізняють:

– катодне падіння напруги (U_K);

– анодне падіння напруги (U_A);

– падіння напруги стовпа дуги ($U_{СТ}$)

З огляду на малу довжину катодної та анодної областей (10^{-5}…10^{-4} см), падіння напруги стовпа дуги часто подають як функцію повної довжини дуги ($L_Д$) і напруженості електричного поля в стовпі дуги ($E_{СТ}$):

$$U_{\text{ст}} = E_{\text{ст}} \cdot L_{\text{д}} \qquad (3.4)$$

Загальне падіння напруги на дузі прийнято подавати як

суму трьох складових по областям дуги:

$$U_д = U_к + U_А + U_{ст} \qquad (3.5)$$

В загальному вигляді вольт-амперна характеристика дуги має форму (рис. 3.7)

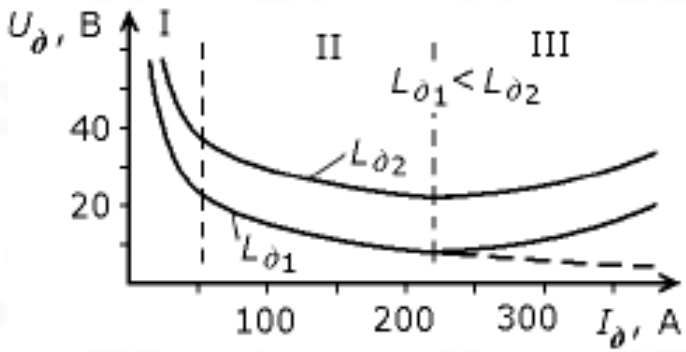


Рисунок 3.7 – Вольт-амперна характеристика дуги

Отже, залежно від величини струму вольт-амперна характеристика дуги може бути спадаючою, полого-спадаючою (або просто: пологою) і зростаючою.

Відповідно до різних кутів нахилу розрізняють три ділянки вольт-амперної характеристики:

I – круто-спадаюча;

II – полого-спадаюча;

III – зростаюча.

Пунктирна лінія на ділянці III показує, якою могла б бути амперна характеристика дуги при необмеженому діаметрі електродів, між якими горить дуга.

Фізичні процеси в катодній області дуги

Електрони покидають поверхню катода і рухаються до анода. Шлях, який вони проходять до першого зіткнення з атомами газів стовпа дуги, обмежує катодну область (складає $\approx 10^{-5}$см) (рис.3.8).

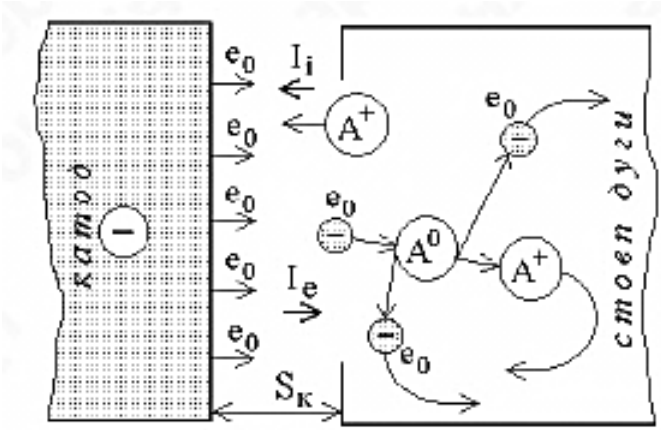


Рисунок 3.8 – Фізичні процеси в катодній області дуги:
e_0 – електроні; A^0 – нейтральні атоми; A^+ – позитивні іони;
$S_к$ – довжина катодної області; I_e – електронний струм;
I_i – іонний струм.

Тому: катодною областю називають простір вільного пробігу електрона від поверхні катода до першого зіткнення з нейтральним атомом, та саму поверхню катода.

У стовпі дуги головним механізмом іонізації є *термічна іонізація.* Існуюче між електродами дуги електричне поле передає енергію електронам і іонам. Наявність у стовпі дуги важких частинок – атомів і іонів – дає можливість електронам при зіткненнях з ними перетворювати свою кінетичну енергію в енергію хаотичного теплового руху газу.

Термічна іонізація практично стає помітною вже при температурі приблизно 2000 К. Заряджені частинки в стовпі дуги рухаються під дією дифузії та електричного поля. Рухливість заряджених частинок *b* визначається відношенням швидкості зарядженої частинки в дузі *V* до напруженості поля *E: b=V/E,* звідки *V=bE*. Внаслідок різної рухливості, а отже, і коефіцієнтів дифузії ($\lambda_e > \lambda_i$ і $V_e >> V_i$) електрони при спільній дифузії з іонами випереджають іони. Іони, зі свого боку, при-

тягують електрони, які рухаються, і гальмують їх рух. Такий вид дифузії називається *амбіполярною дифузією*.

Важливою характеристикою плазми стовпа дуги є електропровідність ρ (питома провідність дуги).

$\rho = e n_e b_e$, де e – заряд електрона; n_e – кількість електронів; b_e – рухливість електронів.

Якщо не враховувати іонну складову струму, то густина струму в стовпі дуги становить:

$j = n_e b_e E$, де E – напруженість поля.

Температура стовпа дуги тим вища, чим більша потужність jE, яка підводиться до дуги, і чим менша втрата тепла в навколишнє середовище.

Протяжність зони анодного спаду напруги більша, ніж протяжність катодної зони. Анодний спад менший за катодний і оцінюється в кілька вольт.

Анодний спад напруги виникає внаслідок того, що металеві аноди не емітують позитивних іонів. Тому біля анода електричний струм утворюється лише електронами. Відсутність позитивних іонів приводить до утворення негативного просторового заряду поблизу анода, що викликає появу анодного спаду потенціалу.

В області анодного спаду напруги відбувається перехід від високої температури стовпа дуги до порівняно низької температури металевого анода. У цій області утворюються позитивні іони матеріалу анода, які прискорюються анодним спадом потенціалу і потім під дією електричного поля дифундують крізь стовп дуги до катода.

Електрична дуга як джерело енергії використовується при електродуговому нанесенні покриттів (застарілий термін "металізація"). Дуга плавить електроди, а розплавлений метал видаляється і розпилюється із зони плавлення потоком газу (рис. 3.9).

Дроти подаються назустріч один одному спеціальними механізмами подачі і, таким чином, компенсується збільшення завдяки плавленню відстані між ними. Швидкість подавання дроту визначається режимом горіння дуги.

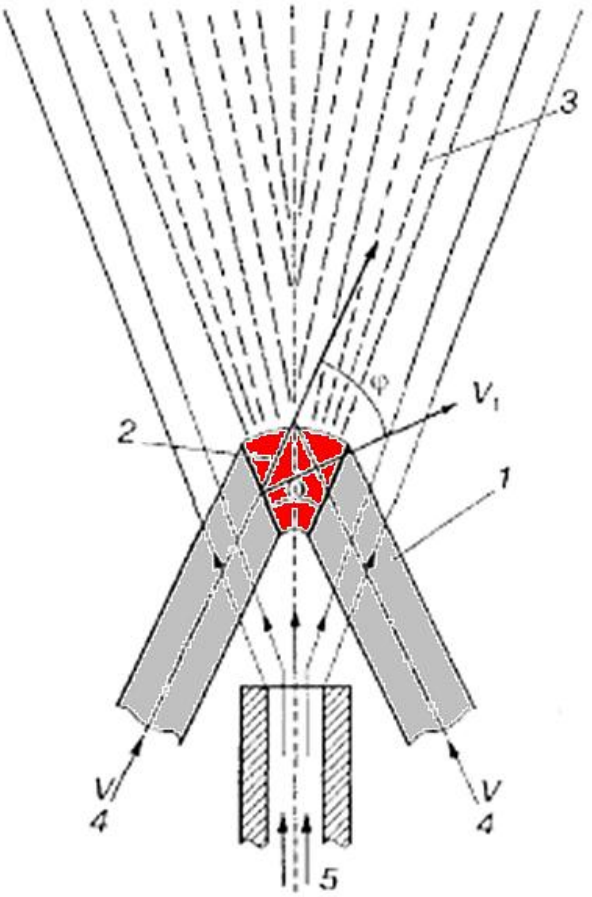


Рисунок 3.9 – Схема плавлення електродів при електродуговому розпиленні:
1 – електроди; *2* – дуга; *3* – двофазний потік; *4* – напрямок подавання електродів зі швидкістю *V; 5* – розпилювальний газ; V_1 – перпендикуляр до площини плавлення електрода

Фронт плавлення близький за формою до площини, нормаль до якої перетинається з віссю електрода під деяким кутом φ. Цей кут може змінюватися від 0° до $\varphi_{max} = 90° - \omega / 2$, де ω - кут перетину осей електродів.

Зміна режиму розпилення веде до зміни кута нахилу фронту плавлення: збільшення напруги дуги веде до зменшення кута φ; при збільшенні швидкості подавання електродів кут φ збільшується.

Якщо між середньою швидкістю переміщення фронту плавлення і швидкістю подавання електродів існує динамічна рівновага, то спостерігається стабільне горіння дуги без коротких замикань і зривів.

Ступінь диспергування рідкого металу з електродів багато в чому залежить від властивостей розплавленого металу частинки, в тому числі від ступеня його перегрівання.

Середня швидкість плавлення електродів $w_п$ зв'язана зі швидкістю їх подавання v залежністю $v = w_п / \cos \varphi$, а продуктивність процесу G – залежністю:

$$G = 2\pi r^2 \rho w_п / cos\varphi \qquad (3.6)$$

де ρ – густина матеріалу електродів, кг/м^3; r - радіус електродів, м.

Із виразу видно, що продуктивність процесу можна підвищувати або збільшенням діаметра електродів, або організацією процесу таким чином, щоб середня швидкість плавлення електродів і кут φ були максимальні.

На рис. 3.10 представлені особливості течії надзвукового потоку розпилювального газу в електродугових розпилювачах.

Між електродами розміщене центральне сопло діаметром *D,* вісь якого перетинається з точкою стику осей електродів. Газодинамічна сила визначається умовами витікання газу із сопла і відстанню *x* від зрізу сопла до точки перетину електродів.

Швидкість струменя, який витікає із сопла, може бути дозвуковою і надзвуковою. Відношення швидкості потоку до швидкості звуку в потоці називають *числом Маха* і позначають буквою М.

При дозвуковій швидкості М < 1, а при надзвуковій – М > 1. В обох випадках при взаємодії газового струменя з електродами, які, з точки зору аеродинаміки, є погано обтічними

тілами, утворюються застійні зони.

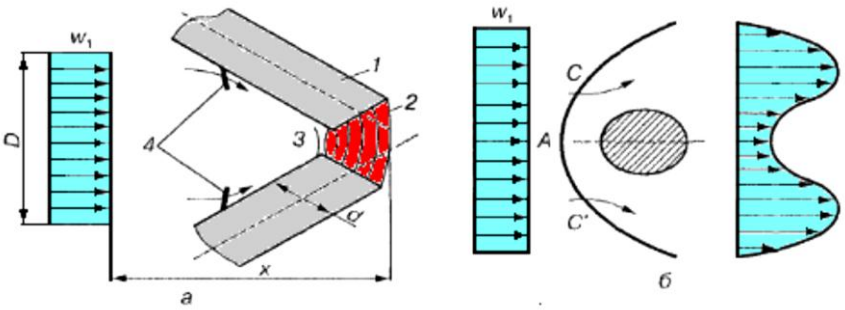


Рисунок 3.10 – Схема течії надзвукового потоку розпилювального газу в електродугових розпилювачах:
1 – електродний дріт; 2 – дуга; 3 – криволінійна головна хвиля; 4 – косі стрибки згущення: w_1 – швидкість газу, що витікає із сопла; A, C, C′ – точки кривої інтенсивності косих стрибків залежно від відстані до площини розміщення електродов; d – діаметр перерізу електрода в площині, яка відповідає фронту плавлення

У цих зонах за електродами осьова складова швидкості незначна і параметри потоку близькі до параметрів гальмування. Внаслідок цього евакуація розплавленого металу із застійних зон утруднюється, а це веде до накопичення рідкого металу в цих областях.

Внаслідок натікання газового потоку на розплав діє аеродинамічна сила *F*, яка бере участь в евакуації з електродів рідкого металу.

Якщо вважати, що розплав обмежений циліндричною поверхнею і площиною, яка паралельна фронту плавлення, силу можна розглядати як сукупність двох сил – сили лобового опору F_1, яка діє на циліндричну поверхню, і сили тертя F_2 на плоскій поверхні.

$$F_1 = \frac{C_ц \rho_2 w_2^2 S_1}{2} \qquad (3.7)$$

$$F_2 = \frac{C_п \rho_2 w_2^2 S}{2} \quad (3.8)$$

де $C_п$, $C_ц$ – коефіцієнти динамічного опору відповідно плоскої і циліндричної поверхонь; $S = \pi d^2 / (4 \sin [\omega / 2])$ - площа перерізу електрода в площині, яка відповідає фронту плавлення; $S_1=\delta d$ – площа міделевого перерізу рідкого прошарку (перерізу з максимальною площею); w_2, ρ_2 – відповідно швидкість і густина газу, який евакуює розплавлений метал; δ – товщина прошару.

Із збільшенням числа Маха динамічний напір $\rho_1 w_1^2$ зростає (індекс "1" належить до параметрів газу, що витікає із сопла). Збільшення швидкості дозвукового потоку до $M \approx 0{,}9$ веде до зростання газодинамічної сили, яка евакуює розплавлений метал з електродів, а відповідно – до зменшення питомих енерговитрат і збільшення продуктивності.

У випадку застосування надзвукового газового струменя режим обтікання електродів і дуги істотно змінюється. Внаслідок взаємодії центральної частини потоку, який надходить безпосе-редньо на зону перетину електродів, з дугою, формується криволінійна головна хвиля *3* (рис.3.10, *а*). В евакуації і диспергуванні розплавленого металу бере участь газ, який пройшов крізь прямий стрибок згущення і має параметри w_2, ρ_2, p_2, T_2. При взаємодії периферійних ділянок надзвукового струменя з електродами виникають скісні стрибки згущення *4*, які спричиняють відхилення струменів газу, які пройшли крізь стрибок, в обидва боки від площини розміщення електродів (рис.3.10, *б*).

Струмінь низькотемпературної плазми. Струмінь плазми утворюється нагріванням за допомогою електричної дуги плазмоутворювального газу, який, обдуваючи дугу і проходячи крізь неї, підвищує свою температуру, змінює склад, дисоціює й іонізує.

Для нанесення покриттів використовується *низькотемпературна плазма,* яка формується, зазвичай, при атмосферному тиску і є високонагрітим газом із відносно невисоким ступенем іонізації (рис.3.11).

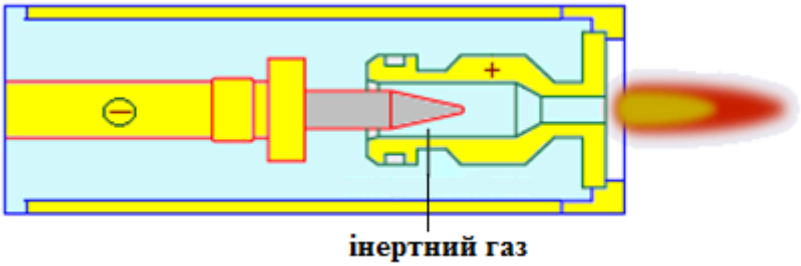


Рисунок 3.11 – Схема плазмотрона

До низькотемпературної плазми відносять речовину з температурою T=10^3 - 10^5 К, тобто кілька електрон-вольт (1 еВ еквівалентно 11,600 К), і ступенем іонізації 2-20 %.

Найбільш поширеними плазмоутворювальними газами при напиленні покриттів є аргон, азот, водень, гелій та їх суміші, хоча для створення потоку плазми використовуються й інші гази та газові суміші, зокрема аміак, повітря, суміш аміаку з азотом, водяна пара тощо.

Температура плазми залежить від природи плазмоутворювальної речовини та енергії, яка в неї внесена.

$$\varepsilon = \frac{H - H_0}{3600 V_0} \qquad (3.9)$$

де H - ентальпія плазмового струменя, кДж/кг; H_0 - ентальпія вихідних плазмоутворюючих газів за стандартних умов, кДж/кг; V_0 - питомий об'єм плазмоутворюючого газу, м^3/кг.

Співвідношення середньомасової температури плазмового струменя і питомої енергії показані на рис. 3.12.

Формально, з точки зору передачі тепла дисперсному матеріалу, висока температура плазми більш вигідна, оскільки тепловий потік до частинок матеріалу істотно залежить від температурного перепаду в примежовому шарі:

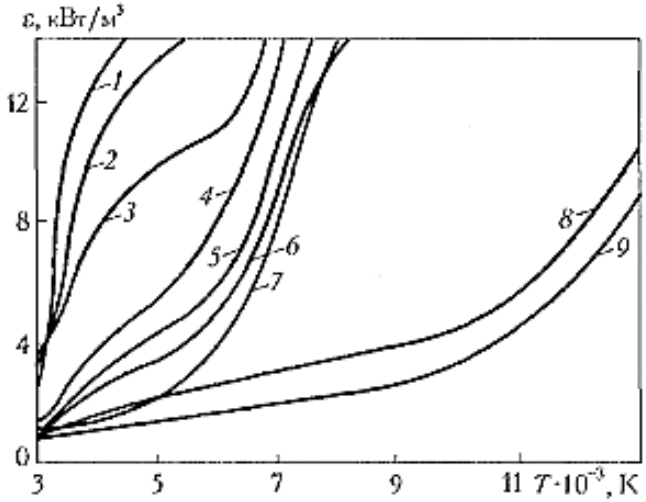


Рисунок 3.12 – Співвідношення середньомасової температури плазмового струменя і питомої енергії для різних складів плазмоутворювального газу:
1 – H_20; *2* – NH_3; *3* – CO_2; *4* – 20 % CH_4 + 80 % повітря; *5* – 9 % CH_4 + повітря 91 %; *6* – повітря; 7 – N_2; *8* - 85 % Ar + 15 % H_2; *9* - Ar

$$q = \propto_T (T_{\text{п}} - T_{\text{пов}}) \qquad (3.10)$$

де $T_{\text{п}}$ – температура плазми;

$T_{\text{пов}}$ – температура поверхні частинки;

$\alpha_{\text{т}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від газу до частинки, Вт/(м^2·К).

Однак оскільки передача тепла внаслідок великих втрат тепла випромінюванням при підвищенні температури погіршується, то для підвищення коефіцієнта теплопередачі доцільно використовувати гази, які мають більшу ентальпію при нижчих температурах.

Таким чином, температура плазмового струменя є важливим, але не домінуючим фактором, оскільки використання будь-якого з перерахованих вище газів дає можливість отри-

мувати температуру, яка значно перевищує температуру плавлення матеріалу, що обробляється.

Струмінь, який генерується плазмотронами, дуже неоднорідний і має складну структуру. У загальному випадку всі існуючі потоки реального газу або рідини поділяються на ламінарні і турбулентні.

Якщо рух частинок газу має упорядкований шаровий характер, то такий рух називається *ламінарним.* Коли рух частинок газу стає хаотичним, виникають нерівномірні пульсації швидкості в поздовжньому та поперечному напрямках, така течія має назву *турбулентна.* Величиною, що визначає зміну структури потоку, є *число Рейнольдса:*

$$Re = wd/v \qquad (3.11)$$

де w – швидкість потоку газу; d – розмір, характерний для даного руху (діаметр сопла розпилювача); v – кінематична в'язкість речовини.

На зрізі сопла плазмотрона течія може бути ламінарною (Re < 100-250) і турбулентною (Re > 300-800). Однак на дистанціях від зрізу сопла, які становлять інтерес, з точки зору напилення (100-300 мм), потоки дуже часто виявляються турбулентними.

Контрольні питання

1. Коли і хто винайшов спосіб напилення металу на поверхню деталей?
2. В якому році запатентована перша конструкція газополуменевого розпилювача?
3. На які способи за енергетичною ознакою поділяються газотермічні методи нанесення покриттів?
4. Яке джерело енергії для нагрівання та прискорення частинок матеріалу використовується при газополуменевому напіленні?
5. На які типи поділяється полум'я суміші ацетилену і кисню?
6. Що являє собою детонаційна хвиля?

7. Що називають стовпом дуги?

8. Який основний механізм іонізації в стовпі дуги?

9. Що характеризує число Маха?

10. Що являє собою низькотемпературна плазма?

11. Які гази найбільш часто застосовуються при плазмовому напиленні?

12. Що характеризує число Рейнольдса?

ЛЕКЦІЯ 4

ПРОЦЕСИ В ПОТОЦІ ГАЗУ И НА ПОВЕРХНІ ОСНОВИ.

1. Процеси в потоці газу і частинок. 2. Процеси на поверхні основи. 3. Формування структури і властивостей покриття.

1. Процеси в потоці газу і частинок.

Головними цільовими процесами, які відбуваються з частинками матеріалу у високотемпературному газовому потоці, є надання матеріалу напрямленого руху і його нагрівання (до температури плавлення і вище). Крім того, частинки дисперсної фази активно взаємодіють із навколишнім середовищем.

Прискорення частинок матеріалу. При газотермічних методах нанесення покриттів у просторі формується *гетерофазниіі* потік, тобто потік, в якому всередині газового середовища знаходиться дисперсна фаза – частинки матеріалу, який напилюється. Крім цих двох основних компонентів, у потоці можуть бути гази, які потрапили до нього з навколишнього середовища; спеціально введені компоненти; продукти взаємодії матеріалу з несучим середовищем (пара, продукти сублімації, дисоціації, хімічних реакцій тощо).

Порошок подається у високотемпературний струмінь, як правило, в суміші з транспортувальним газом, функціональне призначення якого – створити газодисперсну суміш.

Найпоширенішими є дві схеми подачі порошку – *аксіальна* та *радіальна* (рис. 4.1).

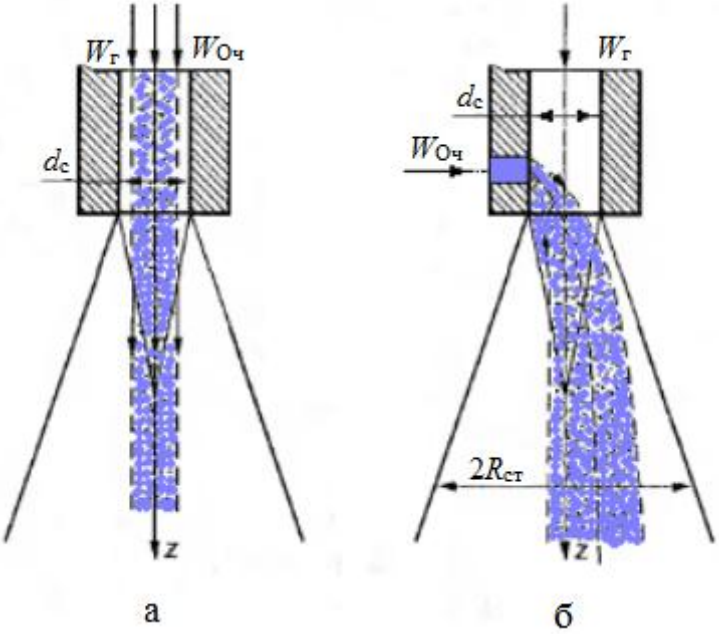


Рисунок 4.1 – Схема аксіального (а) і радіального (б) завантаження потоку дисперсною фазою:
$d_с$ – діаметр сопла розпилювача; $R_{ст}$ – радіус поперечного перерізу потоку (струменя) газу на визначеній дистанції;
$W_г$ – швидкість газу; $W_{Оч}$ – початкова швидкість частинок

За першою схемою напрямок подачі газодисперсної суміші збігається з напрямком руху потоку високотемпературного струменя (рис.4.1, а).

Порошок подається у високотемпературний струмінь, як правило, в суміші з транспортувальним газом, функціональне призначення якого – створити газодисперсну суміш.

За другою схемою – напрямки не збігаються (рис. 4.1, б). Перша схема широко використовується при газополуменевому та детонаційному напиленні, друга – при плазмовому нанесенні покриттів.

Формування потоку частинок при розпиленні дроту здійснюється внаслідок плавлення високотемпературним потоком газу його торця і подрібнення об'єму розплаву, який утворюється, на дрібні частинки.

Частинка матеріалу, потрапляючи в потік газу, рухається під дією кількох сил. У загальному випадку рівняння руху частинок має вигляд:

$$m_{\text{ч}} \frac{dw_{\text{ч}}}{dt} = F_{\text{а}} + F_{\text{т}} + F_{\text{тж}} + F_{\text{і}} + F_{\text{тф}} + F_{\text{пр}} + F_{\text{М}} + F_{\text{Б}} \quad (4.1)$$

$$F_{\text{а}} = 0{,}5\text{C}_{\text{а}} \quad \overline{S}_{\text{сер}}\, \rho_{\text{г}} (w_{\text{г}} - w_{\text{ч}})^2 \quad (4.2)$$

де $F_{\text{а}}$ – сила аеродинамічного опору; $\text{C}_{\text{а}}$ – коефіцієнт аеродинамічного опору; $\overline{S}$сер – середній переріз частинки; $\rho_{\text{г}}$ – густина газу; $w_{\text{г}}$ і $w_{\text{ч}}$ – швидкості потоку газу і частинки матеріалу; $F_{\text{т}}$ – сила, яка зумовлена градієнтом тиску в потоці; $F_{\text{тж}}$ – сила тяжіння; $F_{\text{і}}$ – сила, зумовлена інерцією об'єму газу, витісненого частинкою; $F_{\text{тф}}$ – сила термофорезу, зумовлена наявністю температурного градієнта в потоці і напрямлена в бік зниження температури; $F_{\text{пр}}$ – сила, яка характеризує прискорення шарів газу, що межують із поверхнею частинки; $F_{\text{М}}$ – сила, зумовлена обертанням частинки завдяки градієнту швидкості потоку і напрямлена в бік підвищення швидкості (сила Магнуса); $F_{\text{Б}}$ – сила, яка зумовлена нестаціонарністю процесу і залежить від характеру руху частинки за попередній відрізок часу (сила Бассе).

На рис. 4.2 показана залежність швидкості газу і частинок від відстані.

Спочатку швидкість частинок $w_{\text{ч}}$ (4.3) зростає пропорційно кореню від відстані, яку пройшла частинка, але після того як $w_{\text{г}}$ буде дорівнювати $w_{\text{ч}}$, швидкість зменшується пропорційно експоненті.

$$w_{\text{ч}} = w_{\text{г}} \sqrt{\frac{3\rho_{\text{г}}\text{C}_{\text{а}}}{2\rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}} Z} \quad (4.3)$$

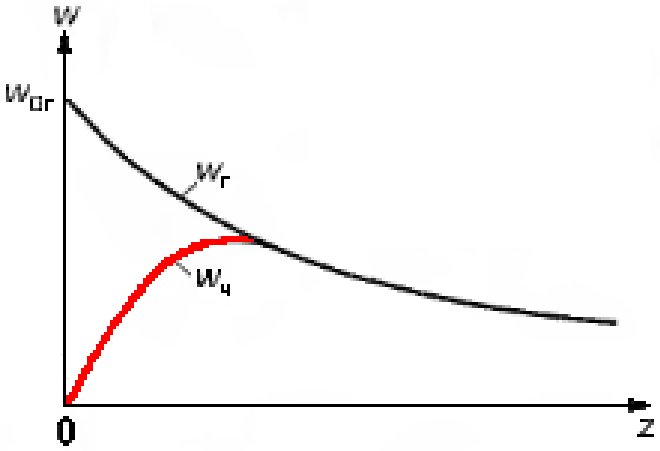


Рисунок 4.2 – Залежність швидкості газу $w_г$ і частинок $w_ч$ від відстані Z

Рівняння (4.4) встановлює також залежність відношення швидкості потоку газу до початкової швидкості від ступеня завантаження (двофаз-ності) потоку $k = \frac{G_ч}{G_г}$, співвідношення густини газу і частинок $\frac{\rho_г}{\rho_ч}$, дисперсності матеріалу, його аеродинамічних властивостей C_a і шляху Z, який пройдений у потоці дисперсним матеріалом.

$$\frac{w_г}{w_{0г}} = \exp\left(-\frac{G_ч}{G_г}\sqrt{\frac{3\rho_г C_a}{2\rho_ч d_ч}Z}\right) \qquad (4.4)$$

Залежність осьової швидкості газу в потоці аргонової плазми від ступеня двофазності представлена на рис. 4.3. Струмінь, завантажений дисперсною фазою, має менший кут розхилу і більшу далекобійність, ніж незавантажений струмінь, який генерується в аналогічних умовах. Цей факт пояснюється тим, що при введенні дисперсної фази в потік пригнічуються поперечні пульсації швидкості, що відповідають за розширення струменя.

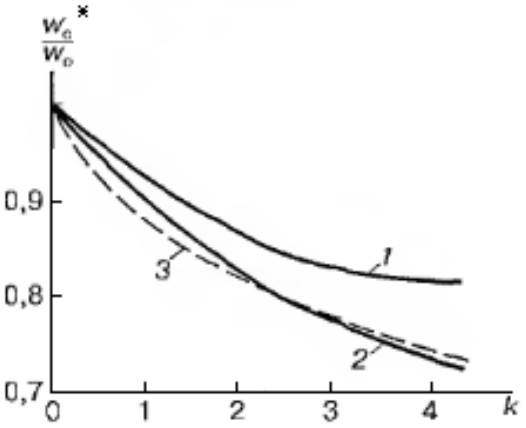


Рисунок 4.3 – Залежність осьової швидкості газу в потоці аргонової плазми від ступеня двофазності (Z= 8,5 · 10^{-3} м):
1 - потужність 10 кВт (теорія та експеримент);
2, 3 – потужність 15 кВт (теорія (*3*) та експеримент (*2*));
w_0 и w_0^* – відповідно швидкість газу на осі однофазного потоку і осьова швидкість газу за наявності частинок

Нагрівання матеріалу у високотемпературному газовому потоці.

Можливі дві стадії теплових процесів, які проходять із частинкою дисперсної фази в потоці. На початковій стадії обробки матеріалу проходить нагрівання його потоком. З часом, у міру руху частинок у потоці, ситуація може змінюватися на протилежну. Це відбувається у випадку потрапляння частинок у холодну периферійну область потоку, а також при віддаленні частинок від зрізу сопла.

Теплообмін між частинкою і несучим потоком газу в загальному випадку здійснюється *теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням.*

Теплопровідність – це процес перенесення теплоти в твердому тілі, нерухомих рідині і газі. *Конвекція* є процесом передачі тепла завдяки руху рідини чи газу. *Променистий теплообмін* (передача тепла *випромінюванням)* - процес пере-

дачі тепла від одного тіла іншому, який проходить у три стадії: перетворення частини внутрішньої енергії одного з тіл в енергію електромагнітних хвиль, поширення електромагнітних хвиль у просторі і поглинання енергії випромінювання іншим тілом.

Комплексне вивчення закономірностей складного теплообміну допомагає використання *теорії подібності.*

У теорії подібності розмірні фізичні величини поєднують у безрозмірні комплекси, причому так, що число комплексів стає менше, ніж число величин, з яких складені ці комплекси. Такі безрозмірні комплекси називаються числами (критеріями) подібності, які номінують іменами вчених, які зробили великий внесок у розвиток гідродинаміки і теплопередачі.

Для опису процесів теплопередачі і прискорення частинок у високотемпературному потоці використовують такі критерії:

Число Рейнольдса (Re) визначає характер руху газу. Рух газу залишається ламінарним, доки число Рейнольдса менше за визначену величину. Перехід режиму руху газу в турбулентний характеризується збільшеним значенням числа Рейнольдса.

Число Маха характеризує відношення кінетичної енергії потоку газу до його ентальпії. Воно може змінюватися від нуля до нескінченності. Якщо M < 1, то потік називають дозвуковим, якщо M = 1 – звуковим, і якщо M > 1 – надзвуковим.

Критерій Прандтля (критерій подібності температурних і швидкісних полів) записується у вигляді: $\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$, де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м^2/с; a – коефіцієнт температуропровідності, м^2/с.

На процес теплообміну між газом і твердим тілом впливає ступінь розрідженості газу (характер обтікання твердого тіла). Ступінь розрідженості газового потоку характеризується *числом Кнудсена:*

$$K_n = \frac{\bar{l}}{l_0} \qquad (4.5)$$

де $\overline{l}$ - середня довжина вільного пробігу частинок газу; l_0 - характерний розмір твердого тіла. При газотермічному порошковому напиленні за величину l_0 беруть діаметр частинок *d.*

Розрізняють *континуальний* і *неконтинуальний* режими обтікання. При *неконтинуальному* обтіканні тіла газом виділяють течії: з ковзанням, перехідну і вільномолекулярну.

При континуальному режимі обтікання довжина вільного пробігу молекул газу значно менша від характерного розміру тіла, тому при розгляді теплообміну газ вважається суцільним.

Безрозмірний комплекс називають *числом Нуссельта* або безрозмірним коефіцієнтом тепловіддачі

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda} \tag{4.6}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

λ – теплопровідність газу (чи рідини);

l_0 – визначальний лінійний розмір; при нагріванні дроту (поперечне обдування циліндра) або частинки (сфери) характерним розміром є їх діаметр $d_ч$.

Число Нуссельта характеризує інтенсивність теплообміну на межі тверде тіло-газ (чи рідина). Чим інтенсивніше відбувається теплообмін, тим більше число Nu, і тим більший коефіцієнт тепловіддачі α.

Важливою величиною, що визначає характер процесу теплопередачі на межі поділу тверде тіло–газ, є число Біо (табл. 4.1). Це відношення внутрішнього термічного опору процесу теплопровідності твердого тіла до зовнішнього термічного опору тепловіддачі:

$$Bi = \frac{l_0/\lambda_1}{1/\alpha} = \frac{\alpha l_0}{\lambda_1} \tag{4.7}$$

де λ_1 – коефіцієнт теплопровідності твердого тіла; λ_1/l_0 – теплова провідність твердого тіла; l_0/λ_1 – тепловий чи термічний опір.

Таблиця 4.1 – Критерій Біо при нагріванні порошку вплазмі різних газів

Матеріал порошку	Коефіцієнт теплопровідності материалу порошку λ_1	Критерій *Bi* у плазмі різних газів			
		Ar	N_2	NH_3	H_2
Оксид цирконію (ZrO_2)	2,39	0,18	0,63	3,5	5,5
Оксид алюмінію (Al_2O_3)	5,86	0,07	0,26	1,4	2,2
Оксид магнію (MgO)	5,86	0,07	0,26	1,4	2,2
Нітрид бора (BN)	9,2	0,05	0,16	0,9	1,4
Карбід кремнію (SiC)	41,90	0,01	0,04	0,2	0,3
Титан (Ti)	18,00	0, 02	0,08	0,5	0,7
Залізо (Fe)	40,00	0,01	0,04	0,2	0,3
Вольфрам (W)	100,00	0,004	0,015	0,08	0,1

Примітка. При розрахунках брали Nu = 2; середньомасова температура плазми: 10 000 К – для аргону, 5000 К – для азоту; 3500 К – для водню і аміаку. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу порошку λ_1, взято для температури, що дорівнює половині температури плавлення його матеріалу.

Критерій Біо дає можливість провести аналіз нагрівання порошку у високотемпературному газі і виявити стадії, що лімітують ефективність цього процесу (табл. 4.1).

Для сферичних частинок діаметром d критерій Біо має вигляд:

$$Bi = \frac{\alpha d}{2\lambda_1} \tag{4.8}$$

Число Біо істотно відрізняється від числа Нуссельта, незважаючи на зовнішню подібність у записі. До числа Біо входить коефіцієнт теплопровідності твердого тіла, а в число Нуссельта – коефіцієнт теплопровідності газу.

2. Процеси на поверхні основи

Удар частинок. Першим етапом взаємодії частинок матеріалу з основою і вже твердими попередніми частинками, які зчепилися з основою, є удар, в якому можна виділити 2 етапи (рис. 4.4).

Під час першого з них (активного) контактна сила зростає, відбуваєть-ся деформація, утворення і розширення площі контакту частинки з основою. Центри інерції тіл зближуються.

Під час другого етапу (пасивного) проходить розвантаження тіл, тобто зняття пружних деформацій, і відстань між центрами інерції тіл, які співударяються, збільшується.

Удари можуть розрізнятися *за характером розтікання матеріалу.* Це удари із стабільним розтіканням розплаву в радіальному від точки удару напрямку, а також співудари, коли після удару відбувається коронарне розбризкування матеріалу або втрачається стабільність границі розплаву при радіальному розтіканні.

При розгляді удару зі стабільним радіальним розтіканням матеріалу можуть бути виділені три характерні стадії (рис. 4.5).

На першій стадії матеріал, спочатку локалізований в об'ємі *ОВВ,* стискається і переноситься в середину об'єму *ВСВ.* Формується плоска контактна поверхня *ВВ,* і ударна хвиля з точки *0* переміщується в середину частинки, стискуючи матеріал.

На другій стадії початково стиснений матеріал позаду фронту ударної хвилі переміщується в радіальному напрямку з області стиснення – розвивається радіальна течія, швидкість якої може перевищувати $w_ч$. Тиск знижується до напірного, або динамічного, тиску $p_д$.

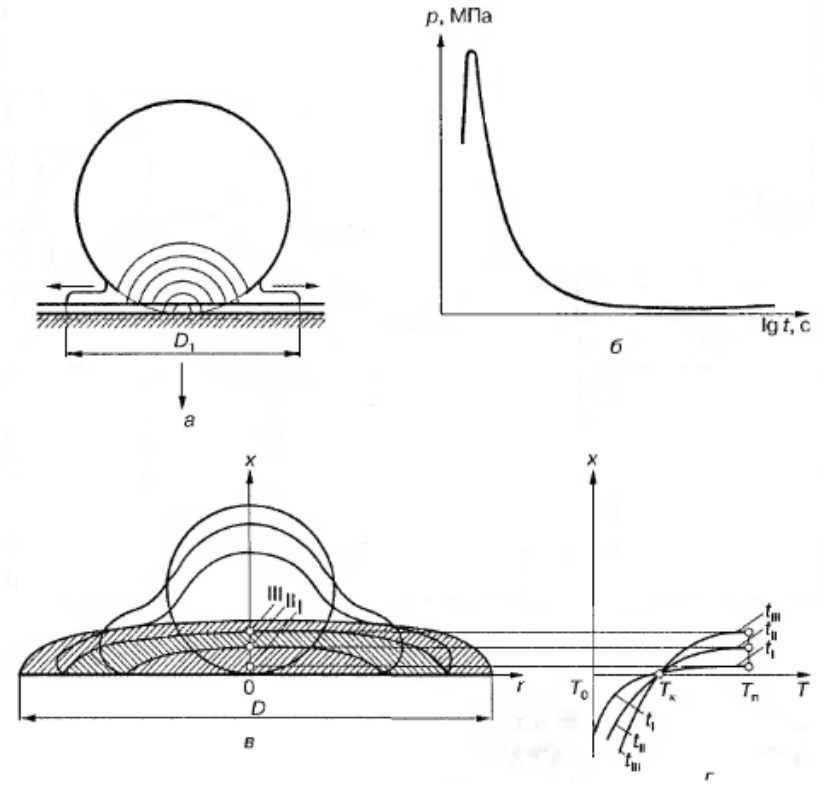


Рисунок 4.4 – Співудар розплавленої частинки з основою: *а* – схема пружної деформації і утворення хвиль; *б* – часова залежність тиску в зоні удару частинки об основу; *в* – схема розтікання частинки і переміщення фронту кристалізації при деформації і охолодженні частинок на основі (точки I, II, III на осі *x* відповідають положенню фронту кристалізації в момент часу $t_I < t_{II} < t_{III}$); *г* – розподіл температури в різні моменти часу $t_I < t_{II} < t_{III}$ в системі тверда основа з температурою T_0 – рідка частинка, яка швидко деформується і одночасно застигає з початковою температурою, яка дорівнює температурі плавлення.

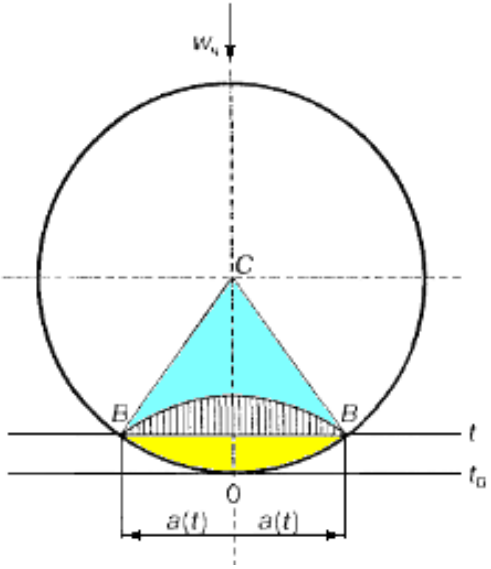


Рисунок 4.5 – Схема удару зі стабільним радіальним розтіканням матеріалу

На третій стадії реалізується напірне стаціонарне розтікання з тиском порядку $p_Д$ і нижче.

Взагалі, згідно з першою моделлю в зоні співудару виникає тиск *p,* який може бути поданий у вигляді двох складових – *напірного (динамічного)* тиску $p_Д$, і *ударного (імпульсного)* тиску $p_г$.

Напірний тиск $p_Д$ розраховується за рівнянням Бернуллі. Вважаємо, що розмір ділянки поверхні контакту близький до діаметра частинки. Якщо основу вважати абсолютно жорстким твердим тілом, а розплав матеріалу - ідеальною рідиною, то отримаємо найпростіший випадок удару, при якому динамічний тиск розраховується за формулою:

$$p_Д = \rho_{р.ч}\, w_ч^2 \qquad (4.9)$$

де $\rho_{р.ч}$ – густина рідкої частинки;

$w_ч$ – швидкість частинки

Спочатку крапля рідини пружно деформується, і лише через проміжок часу $t = 10^{-11}$-10^{-9} с у місці удару утворюється тонкий плоский шар. Його виникнення пояснюється пружним стисненням частинки в місці удару. Потім під дією ударного тиску p_i стиснута рідина інтенсивно розтікається по поверхні.

Максимальний тиск:

$$p_i = (\mu/2)\rho_{р.ч}\, a_{р.ч}\, w_ч \qquad (4.10)$$

де μ – коефіцієнт жорсткості частинки, який враховує релаксаційну здатність рідини залежно від швидкості і форми краплі; $\rho_{р.ч}$ і $a_{р.ч}$ – густина рідкої частинки і швидкість звуку в ній. Для розплавів металів $a_{р.ч} = (2\text{-}5)10^3$ м/с. Коефіцієнт $\mu/2$ наближається до нуля при малих $w_ч$ і $\mu/2 = 1$ при $w_ч > 100$ м/с.

Висота частинки на її осі під час удару рівномірно зменшується від $d_ч$ до $h_ч$ зі швидкістю руху частинки до удару $w_ч$, то тривалість дії динамічного тиску на всі частинки становитиме

$$t = (d_ч - h_ч)w_ч \qquad (4.11)$$

Деформації розплавленої частинки, яка рухається з малою швидкістю, перешкоджає сила поверхневого натягу, під дією якої частинка набуває сферичної форми і зберігає її, а також отримує визначену жорсткість. Чим менший діаметр частинок, тим більше зусилля необхідно прикласти для їх деформації.

Якщо припустити, що вся кінетична енергія руху частинки витрачається на збільшення її поверхні при зміні форми із сферичної у плоский диск, вираз для мінімальної швидкості $w_ч$, за якої ще можлива деформація частинки при ударі об плоску поверхню, матиме вигляд:

$$w_{ч\,min} \approx 2\sqrt{\sigma(d_ч/h_ч - 3)}/(\rho_ч d_ч) \qquad (4.12)$$

де σ – поверхневий натяг матеріалу розплавленої частинки;

$\rho_ч$ – густина матеріалу частинки;

$d_ч$ – діаметр частинки до удару;

$h_ч$ – висота застиглої частинки.

Виходячи з експериментальних даних про деформацію частинок ($h_ч/d_ч$) при напиленні, можна оцінити мінімальну швидкість частинок $w_{ч\ min}$. Так, у випадку створення покриття металевими частинками діаметром $d_ч$ =10^{-4} м при $\sigma \approx 1$ Дж/м^2 і $\rho_ч$= 10^4 кг/м^3 маємо $w_{ч\ min}$ = 5-8 м/с, а для оксидів із $d_ч$ =0,5·10^{-4} м і $\sigma \approx$ 0,7 Дж/м^2 при $\rho_ч$= 4·10^3 кг/м^3 – $w_{ч\ min}$=9-15 м/с.

Інша ситуація виникає при збільшенні швидкості повністю розплавлених частинок. При перевищенні $w_{ч\ min}$ при даних σ і $d_ч$, порушується умова стійкого переміщення межі частинки, яка розтікається, і проходить диспергування матеріалу.

Критерієм, який визначає умови диспергування, є *критерій Вебера*:

$$\mathrm{We} = \rho_ч\, w_ч^2\, d_ч/\sigma \qquad (4.13)$$

Для плазмового напилення, наприклад, We приблизно дорівнює (2,5-90) 10^3 для металевих частинок і (0,71-25,71) 10^3 – для керамічних. Якщо взяти до уваги, що умовою диспергування матеріалу краплі є We ≥ 80, то можна говорити про високу імовірність диспергування повністю розплавлених частинок у високотемпературному потоці. Це підтверджується на практиці. Крупні частинки мають більшу схильність до розбризкування при деформуванні, ніж дрібні.

Температура контакту. Одним із факторів, який визначає міцність з'єднання частинки з основою, є контактна температура в області дотику частинки і основи.

Термічний цикл $T_к(t)$ сферичної частинки, яка деформується внаслідок удару і твердіє на основі, можна подати як суму двох етапів:

1 – твердіння частинки, в процесі якого контактна температура $T_к$ залишається сталою, а над рухомим фронтом кристалізації знаходиться рідина;

2 – охолодження частинки, яка стала вже твердою, до температури основи.

На стадії твердіння частинки в контакті підтримується стала температура:

$$\mathrm{T_к} = \frac{\mathrm{T_{пл}К_\varepsilon}}{\mathrm{К_\varepsilon}+\Phi(\alpha)} \qquad (4.14)$$

де $\mathrm{К_\varepsilon} = (\lambda 1/\lambda 2) = (\lambda_1/\lambda_2)\sqrt{a_2/a_1}$ – критерій теплової активності частинки відносно основи;

λ_1 і λ_2 – коефіцієнти теплопровідності; a_1 і a_2 – відповідно коефіцієнти температуропровідності частинки і основи;

K_L – критерій, який оцінює приховану теплоту плавлення $L_ч$ матеріалу частинки: $K_L = c_ч\, T_{пл}(1{,}77L_ч)$;

$c_ч$, $T_{пл}$ – теплоємність і температура плавлення матеріалу частинки;

$\Phi(\alpha)$ – функція інтеграла імовірності;

$\alpha = f\{K_E, K_L\}$ – корінь рівняння $\mathrm{К_\varepsilon}+\Phi(\alpha) = (K_L, e- \alpha^2)/\alpha$.

Час t_0, протягом якого частинка твердіє, і в контакті підтримується температура $T_к$, при $T_ч$ - $T_{пл}$ обчислюється за формулою:

$$t_0 = \left(\frac{h_ч}{2\alpha}\right)^2 \frac{1}{a_1} \qquad (4.15)$$

Частинки повністю холонуть до температури основи приблизно за час $100t_0$. В основі під частинкою проходить інтенсивне нагрівання, градієнти температури досягають 10^7 К/м.

Дійсна температура контакту буде складатися з температури контакту, яку розраховують за формулою на попередньому слайді, і температури поверхні основи T_0 в місці контакту з частинкою. При напиленні частинками, температура яких $T_ч$ вища за температуру їх плавлення $T_{пл}$, відповідно збільшується і температура в контакті $T_к$.

$$T_k^{дійс} = T_0 + T_к, \quad T_к = \frac{K_\varepsilon(T_{пл}-T_0)}{K_\varepsilon+\Phi(\alpha)} \qquad (4.16)$$

Умови з'єднання. Весь процес взаємодії матеріалів при

газотермічному напиленні на кожній елементарній ділянці поверхні умовно поділяється на три стадії:

1. Зближення речовин, які з'єднуються, – утворення фізичного контакту.

2. Активація контактних поверхонь і хімічна взаємодія матеріалів на межі поділу фаз.

3. Об'ємна взаємодія.

3. Формування структури і властивостей покриття

Структура покриття. Схематично структура газотермічних покриттів зображена на рис 4.6.

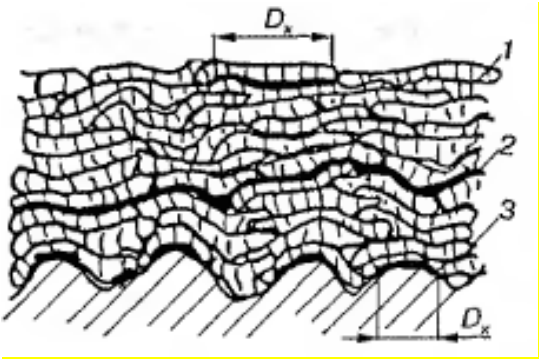


Рисунок 4.6 – Структура покриття
1 – межа між частинками; *2* – межа між шарами покриття; *3* – межа між покриттям і основою; D_x – діаметр ділянки контакту, на якій відбувається приварювання частинки

Залежно від співвідношення теплової і кінетичної енергії частинок у момент їх зустрічі з основою можливе утворення двох типів структур – з переважною або зернистою, або шаруватою будовою.

Кожна частинка, яка охолола, має структуру обох типів: і зернисту, і лускоподібну. Товщина межі між шарами – 0,1-10 мкм; товщина деформованих частинок – 2,0-20 мкм; товщина меж між частинками – до 1 мкм; протяжність ділянок зчеплю-

вання по межах частинок – 0,1-0,5 мкм; ширина тріщин між частинками – 0,08-0,3 мкм.

Традиційно застосовується кілька типів структури газотермічних покриттів (рис.4.7).

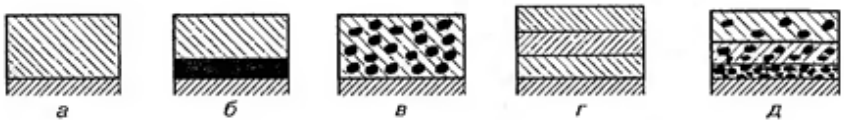


Рисунок 4.7 – Типи структури

Досить поширеним є одношарове покриття (рис. 4.7, *а*). Більш поширеними є покриття з підшаром (рис. 4.7, *б*).

Внаслідок сполучення властивостей матриці і наповнювачів можна отримати порошки з багатокомпонентною структурою (рис. 4.7, *в*).

У випадку експлуатації покриття в умовах механічних ударних навантажень і теплозмін використовуються багатошарові і градієнтні структури (рис. 4.7, *г*, *д*).

Ультрадисперсні порошки хімічних сполук (інша назва – *нанопорошки*) є тонкодисперсними наддрібнозернистими кристалічними або аморфними утвореннями, розмір яких не перевищує 100 нм. Поява нанорозмірних компонентів у складі композиційних покриттів стабілізує структуру матриці, перешкоджає руху дислокацій, що призводить до покращення інтегральних функціональних характеристик у цілому.

Напруження в покриттях. Залишкові або внутрішні напруження класифікуються за об'ємами, в яких вони врівноважуються: напруження I роду властиві макрооб'ємам тіла (рис. 4.8); напруження II роду виникають при локальній неоднорідності деформації окремих зерен, частина яких може стати розтягнутою, а частина – стисненими; напруження III роду діють у межах окремих зерен і є наслідком неоднакової відстані між атомами ґратки.

Завдяки особливостям формування покриттів при їх нанесенні, в них діють напруження всіх видів. Рівень цих напру-

жень високий, оскільки він спричинений ударом, деформацією, нерівноважною кристалізацією, фазови-ми перетвореннями та іншими інтенсивними процесами взаємодії частинок.

Величина залишкових напружень значною мірою залежить від товщини покриття.

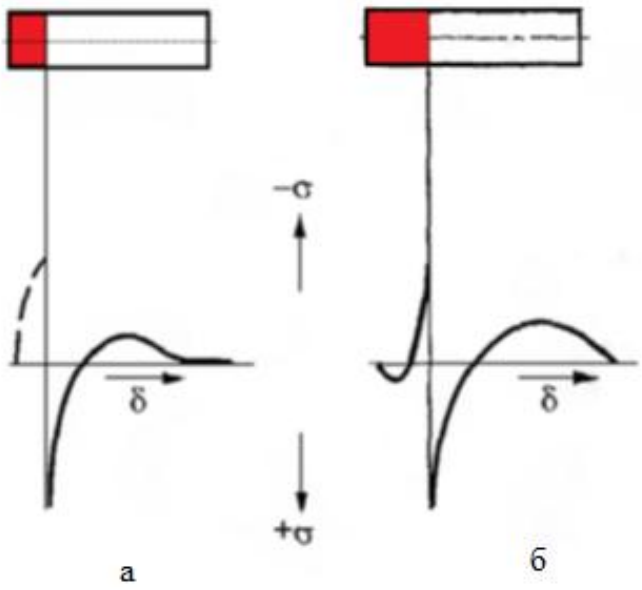


Рисунок 4.8 – Зміна напружень у тонкому (а)
і товстому (б) покриттях

Точка σ_x на рис. 4.9 відповідає міцності приварювання частинки до основи в плямі хімічної взаємодії, тобто максимальній міцності:

$$\sigma_x = P_x / F_x \qquad (4.17)$$

де P_x – сила, яка необхідна для відокремлення частинки;
F_x – площа плями хімічної взаємодії.

Площа, де відбулося приварювання, становить лише ча-

стину від загальної площі поверхні основи. У зв'язку з цим можна ввести коефіцієнт β:

$$\beta = F_x/F \tag{4.18}$$

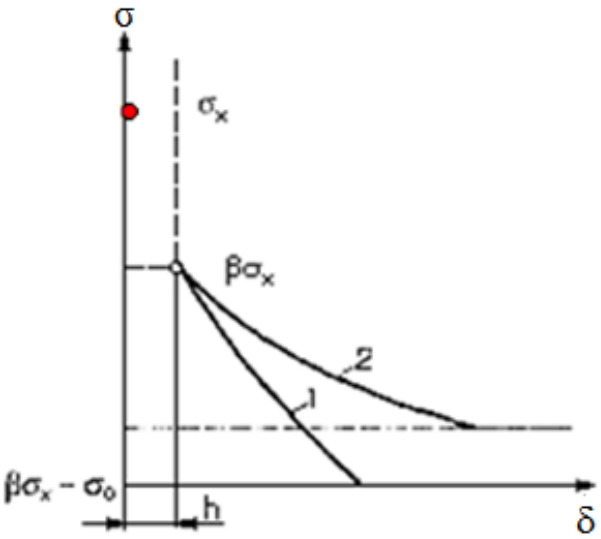


Рисунок 4.9 – Схема зміни міцності зчеплення покриття з основою залежно від товщини покриття

Точка $\beta\sigma_x$ буде характеризуї міцність зчеплення з основою моношару частинок, не пов'язаних між собою. Товщина моношару відповідає висоті частинки h.

Подальше напилення частинок спричиняє залишкові напруження в покритті σ_0, які зростають у міру збільшення кількості шарів, тому на практиці міцність зчеп-лення завжди занижена:

$$\sigma = \beta\sigma_x - \sigma_0 \tag{4.19}$$

При збільшенні кількості шарів може настати момент, коли покриття відокремлюється від основи (рис. 4.9, крива 1).

У більшості випадків внаслідок еластичності покриттів

проходить стабілізація міцності зцеплення покриття з основою (рис. 4.9, крива 2) на визначеному рівні. Напруження σ_0 релаксують у покритті і при подальшому збільшенні товщини напиленного шару не перевищують величину $\beta\sigma_x$.

Експериментальні дослідження залишкових напружень у покриттях із різних матеріалів на різних основах довели, що в покритті можуть виникати як залишкові напруження розтягнення, так і залишкові напруження стиснення.

Контрольні питання

1. Що являє собою гетерофазний потік, який формується при газотермічному напиленні?
2. Які схеми подачі порошку у високотемпературний струмінь?
3. Як здійснюється теплообмін між частицею і газовим потоком?
4. Що характеризує число Маха?
5. Напишіть вираз критерію Прандтля.
6. Чим характеризується ступінь розрідженості газового потоку?
7. Що характеризує число Нуссельта?
8. Що характеризує число Біо?
9. З яких складових складається тиск, що виникає в зоні зіткнення частинки з поверхнею?
10. Що оцінюється за критерієм Вебера?
11. На які стадії підрозділяється процес утворення з'єднання напилюваних частинок з поверхнею деталі?
12. Якого характеру залишкові напруги формуються в покриттях?

ЛЕКЦІЯ 5

СПОСОБИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ ПОКРИТТІВ

1. Класифікація газотермічних покриттів. 2. Газополуменеве напилення. 3. Детонаційне напилення. 4. Плазмове напилення. 5. Електродугове напилення. 6. Газотермічні способи напилення. 7. Матеріали для нанесення газотермічних покриттій. 8. Способи відновлення. 9. Застосування газотермічного напилення.

1. Класифікація газотермічних покриттів

Класифікуються газотермічні покриття по наступним ознаками:

1. Функціональний (службове) призначення;
2. Склад;
3. Макроструктура (конструкція) покриття;
4. Макрогеометрия (спеціальний макрорельеф) покриття;
5. Спосіб газотермічного напилення, яким отримано покриття;
6. Вид вихідного матеріалу для напилення покриття;
7. Група покриття по товщині;
8. Група покриття по пористості;
9. Група покриття по міцності зчеплення з основою;
10. Технологічні ознаки, що характеризують обробку покриття;
11. Додаткові ознаки.

В даний час переважна увага надається класифікації газотермічних покриттів по функціональному призначенню.

Така класифікація ГТП необхідна не тільки інженерно-технічним і науковцям, але і для організації процесу управління маркетингом газотермічних покриттів.

Вперше подібна класифікація розроблена фірмою МЕТКО .

У відповідності ГОСТ 28076 класифікація газотерміч-

них покриттів по функціональному призначенню наступна:

1. Ущільнювальне покриття
2. Термостійке покриття
3. Коркове покриття
4. Захисне покриття:
4.1. Зносостійке
4.2. Ерозійностійке
4.3. Корозійностійке
5. Терморегулююче покриття
5.1. Теплозахисне покриття

Класифікація газотермічних покриттів з енергетичного ознакою (ГОСТ 28076)

1. Газополуменеве напилення
2. Детонаційне напилення
3. Електродугове напилення
4. Плазмове напилення
4.1. Плазмово-дугове напилення
4.2. Високочастотне плазмове напилення

Сутність процесів газотермічного напилення покриттів полягає в утворенні спрямованого потоку дисперсних частинок напилюваного матеріалу, що забезпечує перенесення їх на поверхню оброблюваного виробу при оптимальних для формування шару покриття значеннях температури і швидкості (рис. 5.1).

2. Газополуменеве напилення

Спосіб газополуменевого напилення покриттів відрізняється компактність, простотою використовуваного устаткування і його мобільністю, що дозволяє проводити роботи по відновленню деталей безпосередньо у замовника.

Він рекомендується для напилення порошкових матеріалів: металів, сплавів, композицій і оксидів (рис. 5.2, а), а також покриттів з металевого дроту, гнучких шнурів, зволікання (рис. 5.2, б)

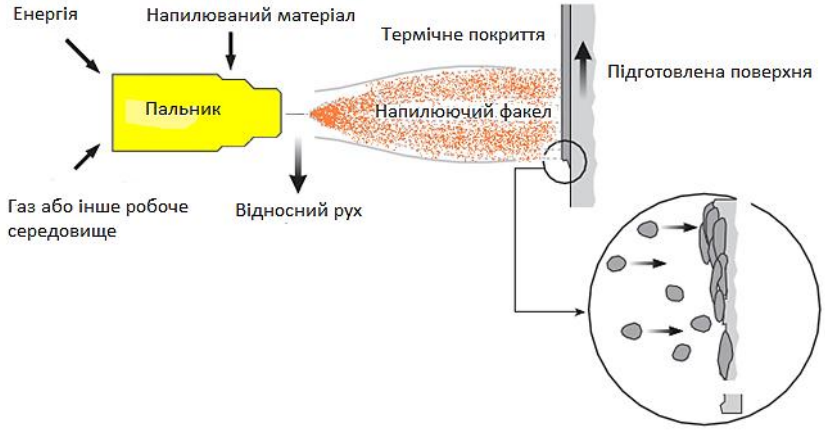


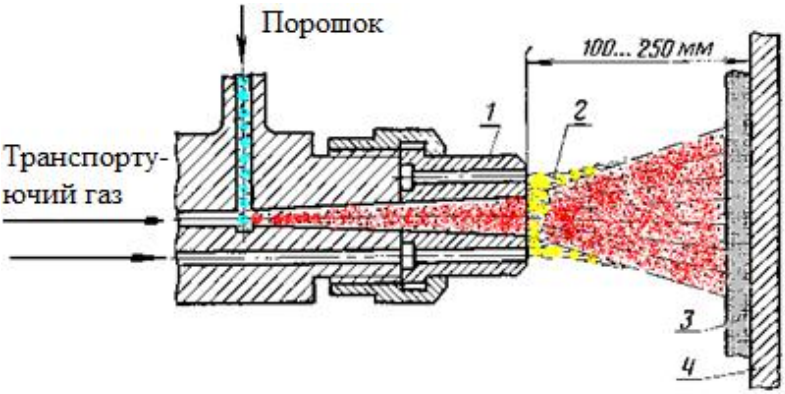
Рисунок 5.1 – Схема процесу газотермічного напилення покриттів

При газополуменевому напиленні покриттів ацетилен і його замінники: пропан, водень, а також рідке пальне можуть використовуватися в якості пального газу (табл. 5.1). Окислювачем є кисень або повітря.

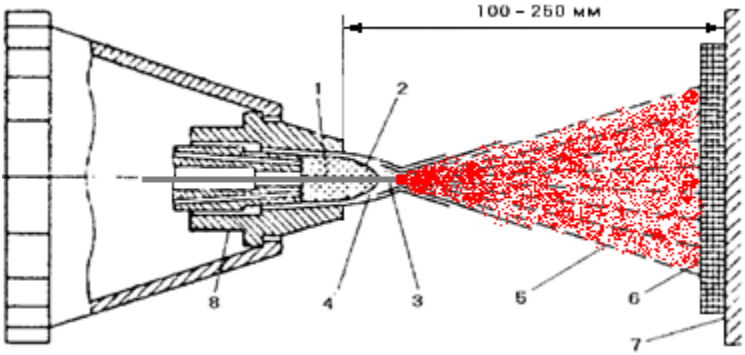
Швидкість частинок напилюваного матеріалу залежить від співвідношення кисню і горючого газу в суміші, кількості газу, який обдуває полум'я, відстані від зрізу сопла, кількості порошку, що вдувається в полум'я, його щільності, гранулометричного складу та інших компонентів, і знаходиться в межах 20-80 м/с.

Удосконалення способу газополуменевого напилення відбувається в напрямку підвищення швидкості струменя продуктів горіння. Для підвищення швидкості частинок при газополуменевому напиленні використовують різні технічні рішення. Це – певне розташування сопловіх отворів для витоку горючої суміші і конструкція передньої частини соплового наконечника, яка дозволяє формувати потрібну геометрію високотемпературного струменя та здійснювати ефективне нагрівання і прискорення частинок порошку.

Знизити витрати тепла та кінетичної енергії утвореного струменя можна ізолюванням його від навколишнього середовища периферійним супутним стуменем газу або насадками. Це збільшує швидкості частинок матеріалу на 10-20 м/с.



а



б

Рисунок 5.2 – Газополуменеве напилення:
а – порошкового матеріалу, де 1 – сопло; 2 – факел полум'я; 3 – покриття; 4 – основа; 5 – порошок;
б – дротом, де 1 – дріт; 2 - полум'я; 3 – кінець дроту, який оплавлявлюється; 4 – повітряний струмінь; 5 – частинки металу; 6 – покриття, 7 – основа; 8 – насадка

Таблиця 5.1 – Основні властивості горючих газів, що застосовуються для газополуменевого напилення покриттів

Газ	Щільність, кг/м^3	Температура, ^{0}С			Нижча тепло-та згорян-ня, МДж/м^3	Температура полум'я в суміші з киснем, °С
		плавлення	кипіння	критична		
1	2	3	4	5	6	7
Ацетилен	1,09	-81	-83,6	35,7	100,8	3100–3200
Н-бутан	2,54	-139	-0,6	152	111,2	2700–2900
Водород	0,084	-259,2	-252,8	-239,9	19,2	2400–2600
Метан	0,67	-182,5	-161,7	82,1	32,0	2400–2700
Оксид вуглецю	1,16	-205	-191,5	-140,2	12,2	2600–2800
Пропан	1,88	-189,9	-42,6	96,8	83,2	2700–2850
МАПП (метила-цетилен-про-падиен)	1,78	–	–	120	83,2	2800–2900

3. Детонаційне напилення

Метод детонаційного напилення покриттів використовують енергію вибуху газових сумішей (рис. 5.3). Цим способом можна наносити покриття будь-якого типу з низькою пористістю.

В камеру 3 водоохолоджуваного стовбура 2 Ø 25мм подають кисень і ацетилен в строго певних кількостях; стовбур направляють на оброблювану деталь 1 (рис. 5.3, а). Потім через отвір в камері подають порошок напилюваного матеріалу (рис. 5.3, б). Газову суміш підпалюють електрич ческий іскрою від запалу 4 (рис. 5.3, в). В результаті вибуху суміші відбувається виділення теплоти і утворюється ударна хвиля, яка розігріває і розганяє частинки порошку. Їх швидкість на

відстані 75мм від зрізу ствола може досягати 820 м/с. При попаданні на деталь частинок виділяється велика кількість теплової енергії, і температура напилюваного порошку збільшується до 4000 °С. В результаті цього на деталі 1 утворюється покриття (рис. 5.3, г).

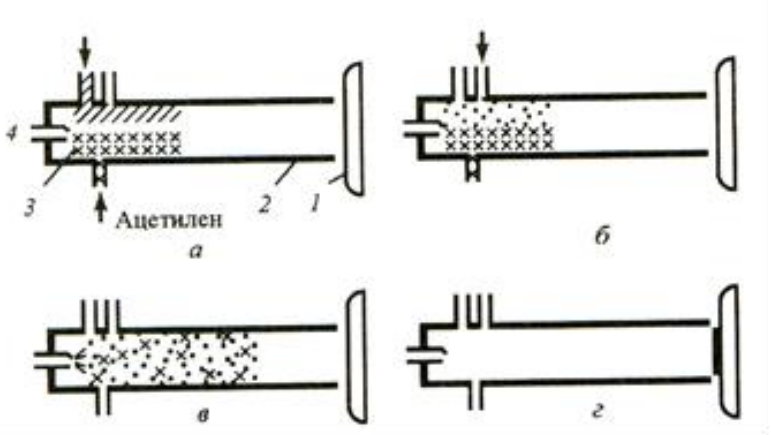


Рисунок 5.3 – Схема детонаційного напилення:
а – подача кисню і ацетилену в камеру; б – подача порошкового матеріалу; у – підпал суміші електричною іскрою; г – формування покриття; 1 – деталь;
2 - водоохолоджуваний стовбур; 3 – камера; 4 – запал

Після вибуху суміші горючих газів для видалення продуктів горіння здійснюється ють продувку стовбура азотом. Процес відрегульований таким чином, що він повторюється з частотою 3 – 4 рази в секунду.

Установка працює до досягнення необхідної товщини покриття, яка на практиці зазвичай дорівнює 0,25 – 0,3мм. Покриття, отримані детонаційним напиленням, відрізняються великою щільністю і високою міцністю зчеплення з основою.

Детонаційне напилення використовують в основному для одержання твердих зносостійких покриттів з карбідів, що містять невеликі кількості металевих ланцюжках, а також різ-

них оксидів і їх сумішей (рис. 5.4).

Рисунок 5. 4 - Шнек пульпонасосу напилений оксидом алюмінія

4. Плазмове напилення

Останнім часом цей метод, що відрізняється високими техніко-економічними показниками, використовується в машинобудуванні, енергетиці, хімічній, нафтогазовій, дорожньо-будівельної, сільськогосподарської техніки, а також на підприємствах міського та комунального господарства.

Процес плазмового напилення здійснюють за схемою, представленої на рис. 5.5.

Плазмовий розпилювач був розроблений у 1956 р. фірмами Gianini Corp. і UC на основі робіт Сміта (пат. 2157498, 1939 р.), запропонував прист-рій для нанесення покриттів, що містить катод у формі стрижня і анод у формі сопла.

Плазмове напилення здійснюється з допомогою плазмового струменя. Температура плазми в ядрі – 20 000-30 000 К, швидкість струменя – 300-2000 м/с. Між водоохолоджуваними катодом і анодом від джерела електроживлення, запалюється електрична потужнострумова дуга. Величину струму можна регулювати від 80 до 600 А.

У дуговий проміжок подають плазмо-утворюючий газ (аргон, азот, суміш Ar-N_2, повітря тощо). При контакті з дугою газ нагрівається і, прискорюючись, виходить з сопла у вигляді струменя низькотемпературної плазми. Температура

струменя від $2 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^3$ К. Швидкість струменя від 200 до $2\text{-}3 \cdot 10^3$ м/с.

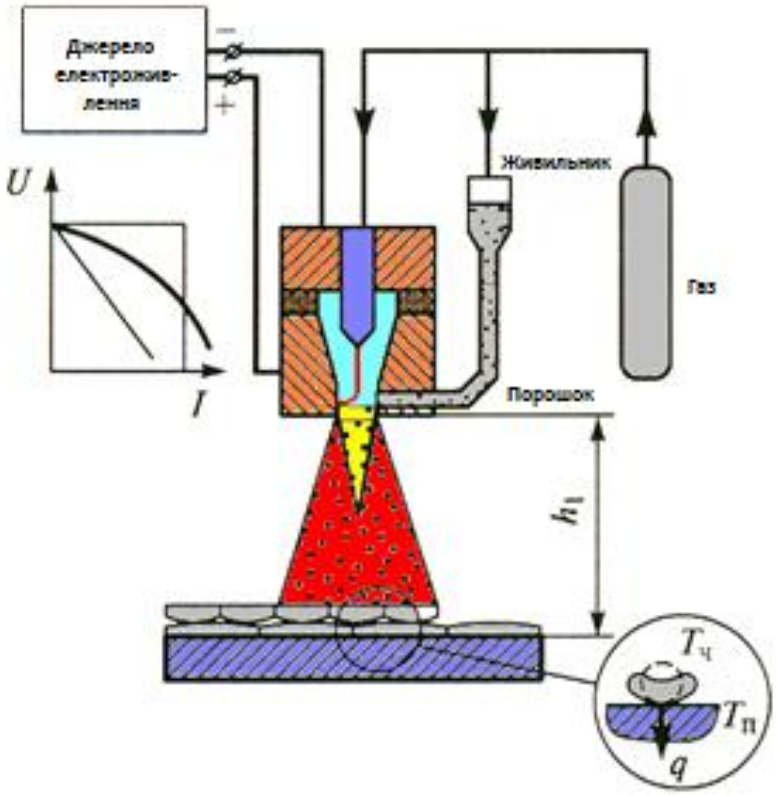


Рисунок 5.5 – Схема процесу плазмового напилення:
h_1 – відстань від зрізу сопла до напилюваної поверхні;
$T_ч$ – температура частинки; $T_п$ – температура підкладки;
q – тепловий потік, що надходить в підкладку

На рис. 5.6 представлена схема плазмового розпилювача. В струмінь від спеціального живильника подають порошок, який прискорюється, розплавляється і осідає на підкладці, утворюючи покриття.

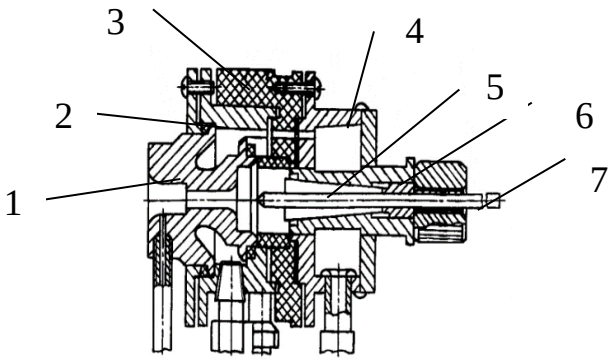


Рисунок 5.6 – Схема плазмового розпилювача
1 – сопло; 2 – стакан; 3 – корпус; 4 – кришка; 5 – цанга;
6 – втулка; 7 – катод

5. Електродугове напилення

При електродугової металізації освіта потоку напилюваних частинок відбувається за рахунок плавлення матеріалу, що розпилюється багатоамперной дугою, і диспергування його швидкісний струменем газу (рис.5.7).

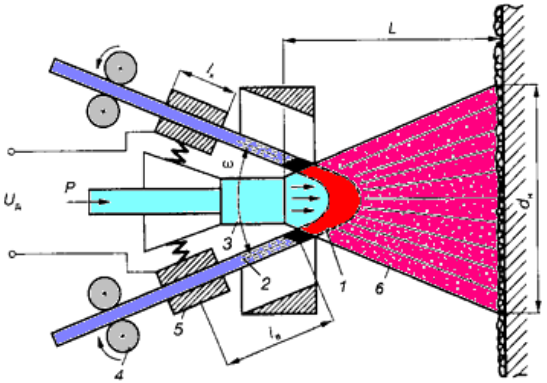


Рисунок 5.7 – Схема електродугового напилення
1 – електрична дуга; 2 – дріт; 3 – сопло; 4 – механізм подачі дроту; 5 – контактні пристрої; 6 – струмінь напилюваного матеріалу; $l_в$ – довжина вильоту дроту; $U_д$ – електрична напруга

Основними характеристиками електородугового напилення є висока продуктивність процесу, яка може досягати 50 кг/год і високий енергетичний ККД розпилення, який може бути 0,7–0,9.

Завдяки великим значенням ентальпії напилюваних частинок можна отримати покриття з достатньою адгезійною та когезійною міцністю. При електродуговому напиленні необхідно враховувати інтенсивну взаємодію частинок з активною газовою фазою, що призводить до насичення
напилюваного металу киснем, азотом, великого вмісту оксидів у покритті.

До недоліків можна віднести необхідність використання для напилення тільки дротові матеріали.

6. Газотермічні способи напилення

Залежно від виду використаної для створення покриттів енергії розрізняють газополуменеве (рис. 5.8), плазмове (рис. 5.0), детонаційне (рис. 5.10), електродугове (рис. 5.11) напилення.

Рисунок 5.8 – Газополуменевий

Рисунок 5.9 – Плазмовий

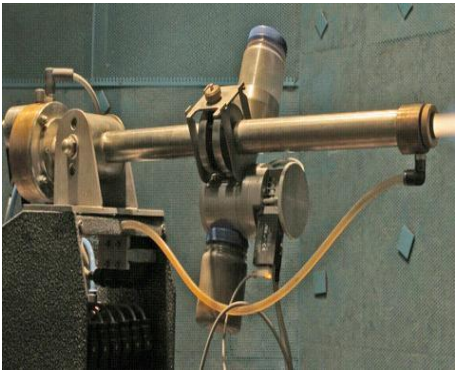


Рисунок 5.10 – Детонаційний

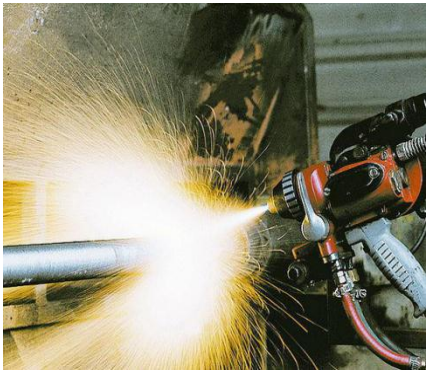


Рисунок 5.11 – Електро-дугова металізація

Розробка технологічного процесу газотермічного напилення покриттів складається з таких основних етапів:

1. Вибір покриття; 2. Проектування покриття; 3. Підготовка поверхні деталі до операції напилення; 4. Підготовка матеріалів для напилення покриття; 5. Вибір способу ГТНП, типу устаткування і визначення параметрів процесу напиленняю; 6. Проведення операції; 7. Контроль якості напиленного шару і усунення дефектів; 8. Подальша обробка напиленого покриття.

Виробництво деталей із газотермічним покриттям можна поділити на два основні напрямки: виготовлення нових деталей і відновлення спрацьованих деталей.

7. Матеріали для нанесення газотермічних покриттів

Як вихідні матеріали для газотермічного напилення покриття, що захищають поверхню деталей від руйнівного впливу зовнішіх факторів (зносу, коррозії, термічних навантажень і т.п.), а також забезпечують відтворення їх розмірів після зношування, в наш час використовують порошки, дроти, стержні та гнучкі шнури.

Матеріал захисного покриття визначається виходячи з умов експлуатації виробів. В даний час розроблено і випускається промисловістю велика кількість різних матеріалів для

нанесення покриттів.

Класифікація матеріалів для нанесення газотермічних покриттів представлена на рис. 5.12.

Для напилення покриттів використовують порошки як загальнопромислового призначення, так і спеціалізовані з розміром частинок від 5 до 200мкм.

Спеціалізовані порошки часто випускають трьох класів: ОМ – особливо дрібні; М – дрібні і С – середні. Фракційний склад часток в межах одного класу для різних матеріалів неоднаковий. Як правило, клас ОМ включає в себе частинки діаметром 40-100 мкм, клас М – 100-280 мкм, клас С – 280-630 мкм.

Як однокомпонентних порошків використовують метали (алюміній, цинк, вольфрам і ін), оксиди (AI_2O_3, рис. 5.13 ZrO_2 та ін), карбіди (WC, SiC та ін), бориди (WB, ZrB_2, CrB_2 і ін), нітриди (AlN, ZrN, TiN, HfN та ін) і силіциди ($MoSi_2$, Cr_3Si, $TaSi_2$ та ін). Зазвичай однокомпонентні порошки одержують розпилюванням розплавів або їх відновленням. При газотермічному напиленні, головним чином, застосовують однокомпонентні порошки, основна перевага використання яких полягає в отриманні покриттів з однорідним хімічним складом і структурою.

Рисунок 5.13 – Оксид алюмінію Al_2O_3

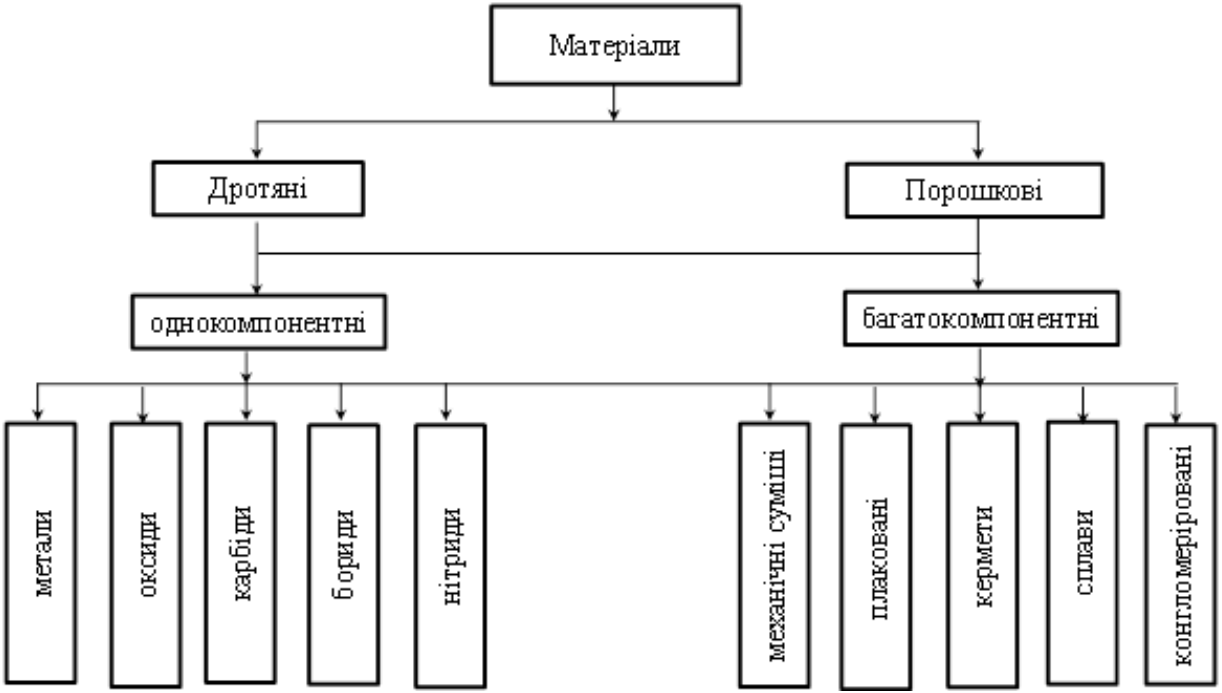


Рисунок 5.12 – Матеріали для нанесення газотермічних покриттів

В якості багатокомпонентних порошків можуть бути використані механічні суміші металів, оксидів, сплавів, карбідів, боридів, графіт (алмаз), тверді мастила і т. д. Широке застосування знайшли такі сплави елементів, як Fe-C, Ni-Al, Ni-Cr (рис. 5.14), Ni-Al (рис. 5.15), Cu-Sn та ін. Структура часток може бути як гомогенної, так і гетерогенної.

Рисунок 5.14 – Ніхром Х20Н80

Рисунок 5.15 – Алюмінід нікелю Ni-Al

В останні роки активний розвиток отримали методи виготовлення порошків, що забезпечують наявність у кожній частці комплексу всіх вихідних компонентів. При цьому всі частинки порошку мають однакові масу, хімічний склад, щільність, теплопровідність і т. д.

Для досягнення цього розроблені технології отримання порошків плакованого і конгломератного будови. Такі порошки називають композиційними.

Композиційні порошки складаються з двох або більше різних за властивостями компонентів, розділених між собою чіткою межею. Структура композиційних порошкових матеріалів, що набули найбільшого поширення (рис. 5.16).

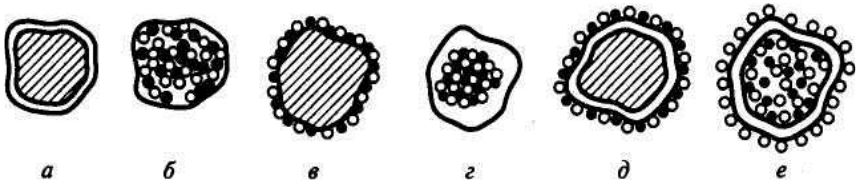


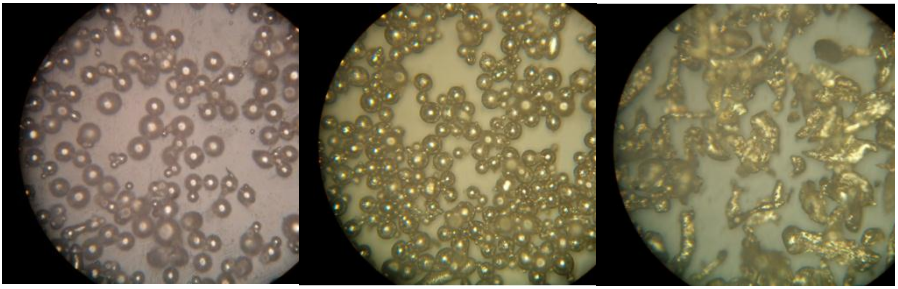
Рисунок 5.16 – Структура композиційних порошкових матеріалів

Композиційні порошки розділяють на дві групи: екзотермічно реагують і термонейтральные.

Порошки є основним видом вихідного матеріалу при отриманні покриттів різними методами газотермічного напилення.

Для підвищення зносостійкості деталей застосовують порошки на основі нікелю і кобальту, які мають властивості самофлюсування (табл. 5.2).

В Україні ці сплави були розроблені в інституті електрозварювання ім. Е. О. Патона і ВНИИТС, а також організовано виробництво ряду порошків по ліцензії фірми «Castolin» (Швейцарія) на ВАТ «Торезтвердосплав» (рис. 5.17).



а б в

Рисунок 5.17 – Порошок, х 360:
а – ПГ-10Н-01; б – ПТ-НА-01; в – ПГ-19М-01

Останнім часом проводяться розробки нового класу матеріалів для ГТНП, що містят у собі компоненти, при нагріванні яких у процесі напилювання відбувається їх взаємодія з виділенням великої кількості тепла й утворенням (синтезом) нових з'єднань, наприклад, алюмінідів, силіцидів, карбідів, боридів і т.п. Дані матеріали мають власне внутрішнє джерело тепла, що забезпечує додаткове нагрівання матеріалу, який напилюється в процесі ГТНП. Даний ефект екзотермічної взаємодії використовується при ГТНП у деяких композиційних порошках, порошкових дротах і гнучких шнурах.

8. Способи відновлення

У різних галузях народного господарства, в тому числі і при ремонті транспортних засобів, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей. Основні з них наведені на рис. 5.18. Аналіз даних дозволяє зробити висновок, що частка деталей, відновлюваних на підприємствах агропромислового комплексу наплавленням, газотермічним, електрохімічними та іншими, найбільш часто вживаними методами, становить:

- методами наплавлення 34,4%
- способами газотермічного напилення 26,1%
- електрохімічними покриттями 20,4%
- іншими методами 19,1%

Таблиця 5.2 – Хімічний склад порошкових матеріалів виробництва ВАТ «Торезтвердосплав»

Марка порошку	Склад компонентів, % за масою									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-10Н-01	14,0-20,0	2,8-4,2	4,0-4,5	3,0-7,0	0,6-1,0	Решта	–	–	–	–
ПГ-10Н-04	–	1,2-1,8	2,3-2,8	До 2,0	До 0,2	Решта	–	–	–	–
ПГ-10К-01	21,0-25,0	1,2-1,8	0,8-1,3	До 2,0	1,3-1,7	28,0-32,0	Решта	–	3,5–4,5	–
ПГ-12Н-01	8,0–14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,6	Решта	–	–	–	–
ПГ-10Н-02	10,0-16,0	2,0-4,0	3,0-5,0	3,0-6,0	0,4-0,8	Решта	–	–	–	–
ПГ-19М-01	–	–	–	До 4,0	–	–	–	Решта	–	8,5–10,5
ПТ-НА-01	–	–	–	–	–	Решта	–	–	–	4,0–5,5
ПТ-19Н-01	8,0-14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,6	Решта	–	–	–	0,8–1,3

Нанесення покриттів методами наплавлення займає перше місце серед використовуваних технологій (рис. 5.19).

Способи газотермічного напилення, що займають в даний час за обсягом відновлюваних деталей 2 місце, використовуються на підприємствах з середини 70 років. Слід зазначити, що основна частка деталей, відновлюваних газотермічним покриттями (94%), припадає на газополуменеве напилювання (ГПН) (рис. 5.20).

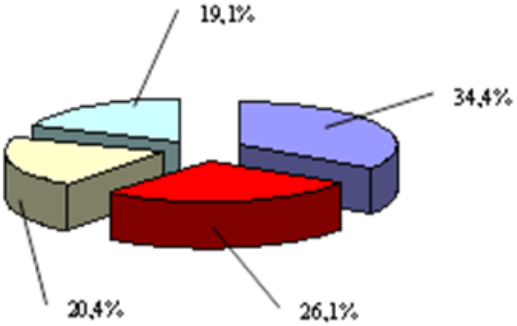


Рисунок 5.19 – Частка деталей, відновлюваних на підприємствах АПК
34,4% – методами наплавлення;
26,1% – способами ГТН;
20,4% – електрохімічними покриттями;
19,1% – іншими методами

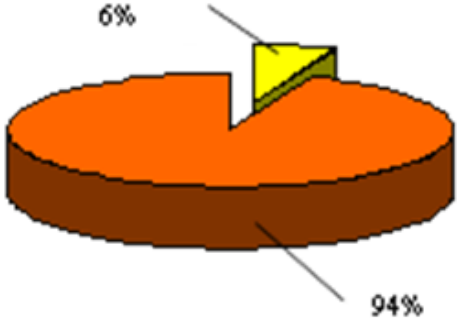


Рисунок 5.20 – Частка деталей, відновлюваних газополуменевим напиленням покриттів та іншими способами ГТН
94% – газополум'яне напилення покриттів;
6% – інші способи ГТН

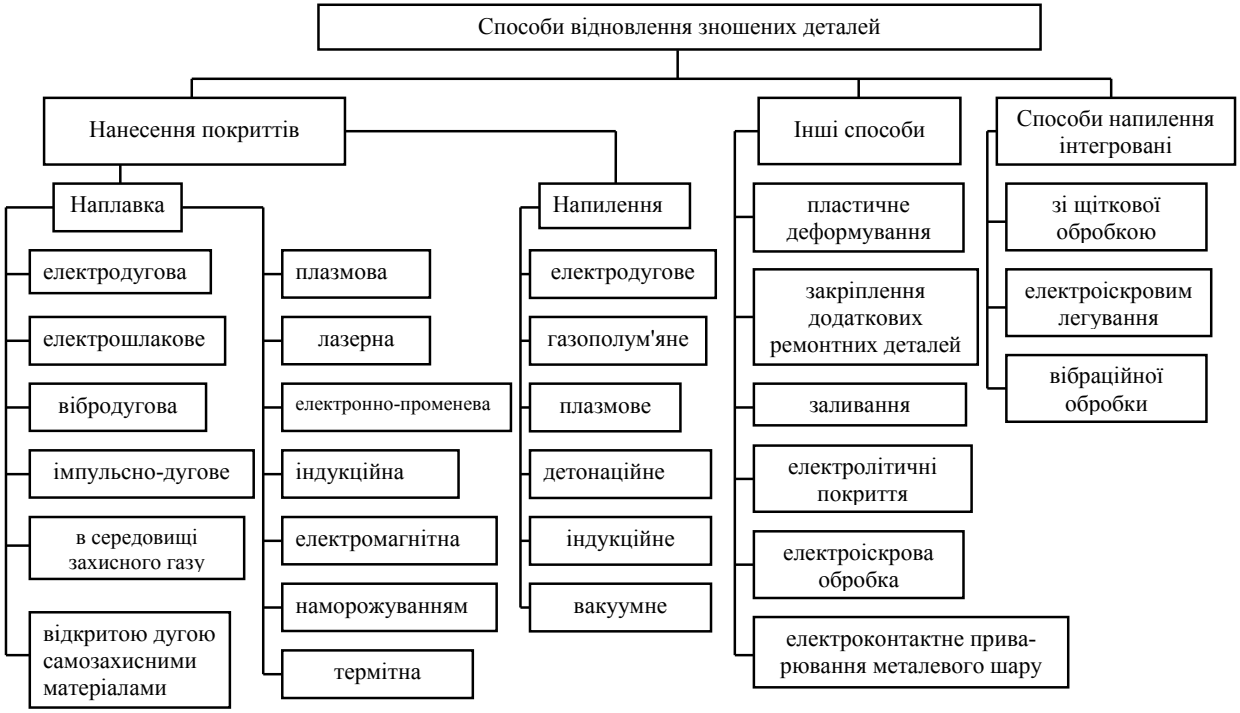


Рисунок 5.18 – Способи відновлення зношених деталей

Якість відремонтованих деталей визначається технологічними можливостями процесу відновлення, в результаті яких формуються фізико-механічні властивості і структурний стан матеріалу, геометрія та інші характеристики поверхні. Також важливі і супутні процеси, такі як поширення теплоти, зміна структури основного металу в зоні термічного впливу, виникнення залишкових напруг і деформацій. Для забезпечення надійного захисного дії покриття на основу необхідно прагнути послабити вплив залишкових напружень, кисню, дефектності покриття.

Для зміцнення і відновлення деталей машин і обладнання у нас в країні і за кордоном накопичений великий досвід по застосуванню газотермических методів напилення, які за обсягом застосування для відновлення деталей знаходяться на другому місці після наплавлення.

9. Застосування газотермічного напилення

На АТ "Харківський тракторний завод" автором виконані роботи з газотермічного напилення ряду деталей тракторів типу Т-150, технологічної оснастки і обладнання. Для реалізації розробленої технології плазмового напилення деталей тракторів із застосуванням повітря в якості плазмоутворюючого газу на АТ «ХТЗ» будо організовано спеціалізовану ділянку плазмового напилення, оснащену обладнанням НВО «Комплекс» м. Черкаси (рис. 5.21). Також плазмовє напилення успішно застосовується для підвищення жаростійкості, опору приварювання прес-форм лиття під тиском і форм відливання великих деталей, з метою теплоізоляції рознімних матриць для пресування, підвищення довговічності вимірювального, ріжучого і абразивного інструментів, для збільшення зносостійкості напрямних верстатів і вузлів тертя (рис. 5.22-5.28).

Рисунок 5.21 – Ділянка газотермічного напилення
на АТ «ХТЗ»

Рисунок 5.22 – Вал коробки передач трактора Т-150К

Рисунок 5.23 – Вал приводу переднього моста трактора Т-155

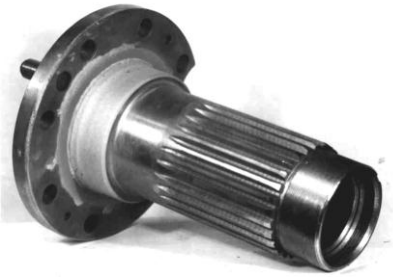


Рисунок 5.24 – Вал колісного редуктора Т-150К

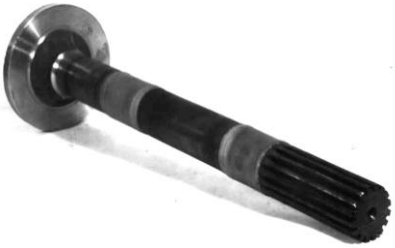


Рисунок 5.25 – Вал приводу роздавальної коробки

Рисунок 5.26 – Болти штовхачів паливного насоса

Рисунок 5.27 – Втулка коробки передач Т-150К

Рисунок 5.28 – Вісь вертикального шарніра

Контрольні питання

1. В якому році і ким винайдений спосіб напилення металу на поверхню?
2. За якими ознаками класифікуються газотермічні покриття?
3. Які гази використовуються в якості пального газу при газополуменевому напиленні?
4. Яка максимальна температура полум'я ацетиленокисневої суміші?
5. Суть детонаційного методу напилення?
6. Суть плазмового методу напилення?
7. Суть електродугової металізації?
8. Наведіть класифікація матеріалів для нанесення газотермічних покриттів?
9. На які групи поділяються композиційні порошки?
10. Яке підприємство в Україні випускає порошки для газотермічного напилення?

ЛЕКЦІЯ 6

НАПЛАВЛЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ

1. Загальні теоретичні відомості. 2. Характеристика способів наплавлення. 3. Ручне дугове наплавлення покритим електродом. 4. Наплавлення деталей під шаром флюсу. 5. Дугове наплавлення в середовищі захисних газів. 6. Вібродугове наплавлення. 7. Електрошлакове наплавлення. 8. Плазмове наплавлення. 9. Індукційне наплавлення. 10. Лазерне (світлове) наплавлення. 11. Електронно-променеве наплавлення. 12. Газове наплавлення. 13. Електроконтактне наплавлення. 14. Структура і властивості наплавленого металу. 15. Матеріали для наплавлення. 16. Технологія наплавлення. 17. Електроіскрове легування.

1. Загальні теоретичні відомості

Наплавлення – це нанесення шару металу на поверхню заготовки або виробу за допомогою зварювання плавленням.

У більшості випадків нанесення шару металу на поверхню заготовки або виробу реалізується наплавленням валиків (рис. 6.1).

Форма валиків характеризується шириною $b_в$, глибиною проплавлення hп , висотою с і коефіцієнтом форми χ:

$$\chi = \frac{b_в}{c} \tag{6.1}$$

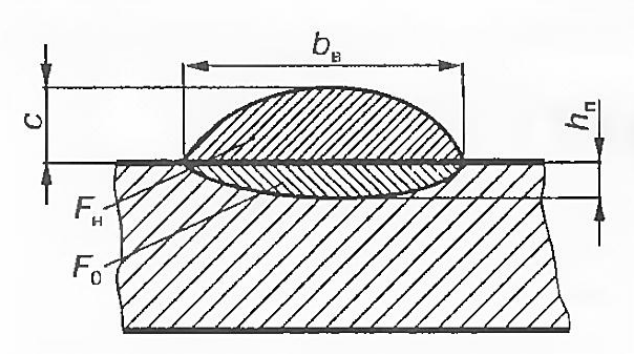


Рисунок 6.1 – Геометрія наплавленого валика

При дугових процесах наплавлення форма валиків залежить від погонної енергії наплавлення:

$$q = UI\eta_t / w_н \tag{6.2}$$

де I – сила струму дуги; U - напруга;

η_t – термічний ККД нагрівання;

$w_н$ – швидкість наплавлення.

Переріз наплавленого валика знаходиться в прямій залежності від погонної енергії. Якщо площа перерізу валика $F_н$, мм^2, то

$$q/w_н \approx 150^0 F_н \tag{6.3}$$

Продуктивність наплавлення – це одна з характеристик процесу, яку оцінюють за кількістю металу, наплавленого за одиницю часу.

Продуктивність наплавлення плавким електродом:

$$G_{\text{н}} = k_{\text{н}}/I_{\text{н}} \qquad (6.4)$$

де $k_{\text{н}}$ – коефіцієнт наплавлення, кг/(А·с), який показує, скільки металу електрода під дією сили в 1 А переходить в основний метал за одиницю часу.

Продуктивність наплавлення пов'язана з продуктивністю розплавлення металу електрода:

$$G_p = k_p/I_{\text{н}} \qquad (6.5)$$

де k_p – коефіцієнт розплавлення, кг/(А·с), який показує кількість електродного металу, що розплавляється під дією сили струму в 1 А за одиницю часу.

Коефіцієнт наплавлення завжди менший за коефіцієнт розплавлення через втрати на розбризкування і вигар.

2. Характеристика способів наплавлення

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, екструдуванням);

– механічні (вибухом, тертям).

Більшість із цих способів можуть поділятися за технічними (спосіб захисту металу в зоні наплавлення, ступінь механізації процесу, безперервність наплавлення) та технологіч-

ними (за родом струму, кількістю електродів, наявністю зовнішнього впливу та ін.) ознаками.

3. Ручне дугове наплавлення покритим електродом

Ручне дугове наплавлен-ня покритим електродом – спосіб, універсальний, придатний для наплавення деталей різної конфігурації у всіх просторових положеннях (рис. 6.2). Процес наплавлення повинен забезпечувати мінімальну глибину проплавлення і високу продуктивність.

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

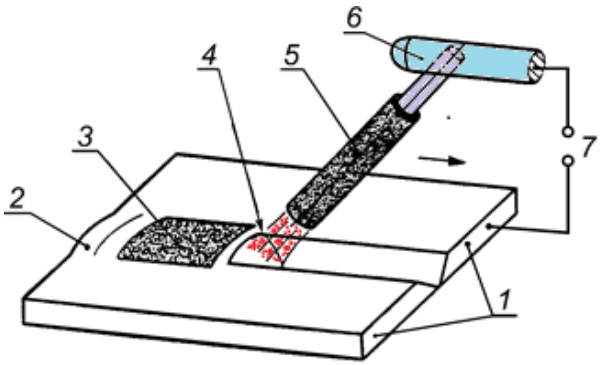


Рисунок 6.2 – Ручне дугове зварювання плавким покритим електродом:
1 – заготовка; 2 – зварний шов; 3 – шлак; 4 – дуга;
5 – покритий електрод; 6 – електродотримач;
7 – джерело живлення

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.

4. Наплавлення деталей під шаром флюсу

При наплавленні деталей під флюсом електрична дуга горить під шаром розплавленого флюсу, утворюючи на поверхні шва шлакову кірку. При цьому в зоні наплавлення створюється надлишковий тиск газів, які разом з розплавленим флюсом перешкоджають доступу повітря до розплавленого металу (рис 6.3).

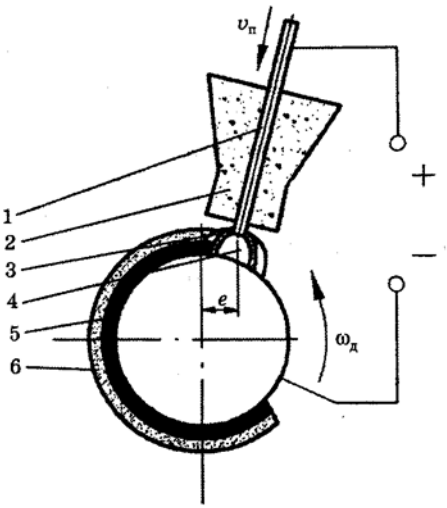


Рисунок 6.3 – Схема наплавлення під шаром флюсу:
1 – електрод; 2 – бункер з флюсом; 3 – оболонка розплавленого флюсу; 4 – газовий міхур; 5 – наплавлений метал; 6 – шлакова кірка; e – зміщення електрода з зеніту;
$v_п$ – швидкість подачі дроту; $ω_д$ – кутова частота обертання деталі

Наплавлення під флюсом забезпечує найбільш високу якість наплавленого металу, так як зварювальна ванна захищена від шкідливого впливу кисню й азоту повітря. Крім того, повільне охолодження металу під флюсом сприяє найбільш

повного видалення газів з рідкого металу і шлакових включень.

Для наплавлення деталей з вуглецевих сталей 30, 40, 45 використовують дріт Нп-30, Нп-40, Нп-50, Нп-65 або дріт з низьколегованої сталі (Нп-30ХГСА).

Для наплавлення відповідальних деталей з високою поверхневою твердістю використовують дріт Нп-2Х14, Нп-3Х13, Нп-30ХТСА та ін.

Найбільш споживаними флюсами є:

– плавлені АН-348А; АН-20; АН-30; ОСЦ-45;

– керамічні флюси АНК-18; АНК-19.

Для наплавлення деталей з великим зносом рекомендується застосову-вати автоматичне наплавлення порошковим дротом під флюсом або відкритою дугою без додаткового захисту. Використовують марки дроту: ПП-АН106; ПП-АН124; ПП-3Х5Г2М-0; ПП-3Х13-0; ПП-25Х5ФМС-0.

Режим наплавлення визначається наступними параметрами: діаметром електрода, напругою дуги, силою зварювального струму, швидкістю наплавлення і подачі дроту, вильотом електрода, кроком наплавлення, зміщенням електрода з зеніту.

Діаметр електродного дроту вибирають залежно від діаметра деталі. При наплавленні автомобільних деталей застосовують дріт діаметром 1,6–2,5 мм.

Силу струму (I, А) вибирають залежно від діаметра електрода (d_e, мм) за таблицями або наближено за формулою:

$$I = 110 \cdot d_e + 10 \cdot d_e^2 \qquad (6.6)$$

Швидкість наплавлення (vн, м/год) вибирають в межах 12-45 м/год або визначають за формулою:

$$v_н = \frac{\alpha_н I}{G} \qquad (6.7)$$

де G – маса 1 м наплавлення, г.

Швидкість подачі дроту (vп, м/год або м/хв) вибирають залежно від діаметра електрода і сили струму або визначають

за формулою

$$v_{\text{п}} = \frac{4\alpha_{\text{н}} I}{\pi d_{\text{е}}^2 \gamma} \qquad (6.8)$$

де γ – щільність наплавленого металу, г/см^3.

Виліт електрода залежить від сили струму і приймається рівним 10-25 мм.

Крок наплавлення s в межах 3-6 мм вибирають в залежності від необхідної товщини шару h, сили струму і напруги.

Зміщення електрода е з зеніту в бік, протилежний напрямку обертання деталі, встановлюють залежно від діаметра деталі: для деталей діаметром 50-150 мм е = 3-8 мм.

Частота обертання деталі

$$n = 250 \frac{v_{\text{п}} d_{\text{е}}^2}{hsD} \eta \qquad (6.9)$$

де $v_{\text{п}}$ – швидкість подачі електродного дроту, м/хв; h – товщина наплавленого шару, мм; s – крок наплавлення, мм/об; D – діаметр деталі, мм; η – коефіцієнт переходу металу електрода в основний метал. Для наплавлення під флюсом можна прийняти η = 1,0.

5. Дугове наплавлення в середовищі захисних газів

Сутність способу полягає в тому, що в зону горіння електричної дуги під тиском подається захисний газ, який, відтісняючи повітря, захищає розплавлений метал зварювальної ванни від шкідливого впливу на нього кисню і азоту (рис. 6.4).

Наплавлення може виконуватися плавким і неплавким електродами (вугільним або вольфрамовим). При наплавленні плавким електродом електродний дріт подається в зону горіння дуги через газоелектричний пальник, до якої підводять електричний струм, захисний газ.

В якості захисних газів найбільше застосування отримали вуглекислий газ (CO_2) і аргон (рис. 6.4).

Наплавлення в середовищі CO_2, як правило,ведуть на постійному струмі зворотної полярності. Це забезпечує хорошу стійкість процесу. Живлення вуглекислим газом здійсню-

ється за схемою: балон – підігрівач – осушувач – понижуючий редуктор – витратомір – наплавочна головка.

Для зварювання і наплавлення поверхонь застосовується дріт діаметром 0,5–2,0 мм наступних марок: Св-08ГС, Св-08Г2СА, Св-10ГС, Св-12ГС, Св-18ХГСА, Св-30ХГСА, Нп-30ХГСА. Крім того, використовується дріт марок ПП-Р18Т, ПП-Р9Т, ПП-Х2В8Т та ін.

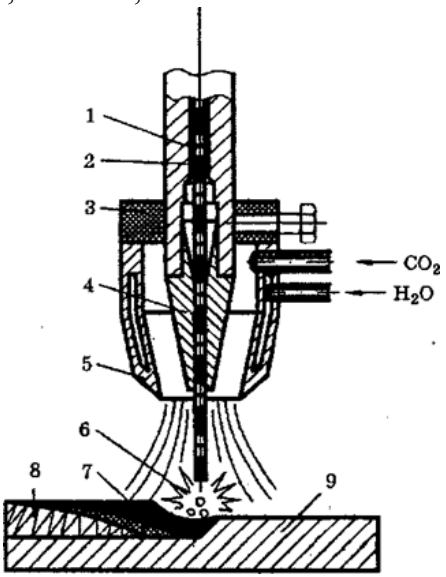


Рисунок 6.4 – Схема наплавлення в середовищі вуглекислого газу:
1 – мундштук; 2 – електродна дріт; 3 – пальник;
4 – наконечник; 5 – сопло пальника; 6 – електрична дуга;
7 – зварювальна ванна; 8 – наплавлений метал;
9 – відновлювана деталь.

Для напівавтоматичного зварювання в середовищі CO_2 широко використовуються напівавтомати: А-537, А-547, А-547У, А-547Р, А-1035М, ПДГ-301, ПДПГ-500.

В якості наплавочних автоматів, зазвичай, використовують переобладнаний апарат А-580, який випускається для на-

плавлення під шаром флюсу, а також зварювальні головки: ОКС-6569; ВКБ-1252А і ПАУ-1, комплектовані джерелом струму ПСУ-500.

6. Вібродугове наплавлення

Процес вібродугового наплавлення являє собою різновид автоматичного наплавлення металу вібруючим електродом в струмені охолоджуючої рідини (рис. 6.5).

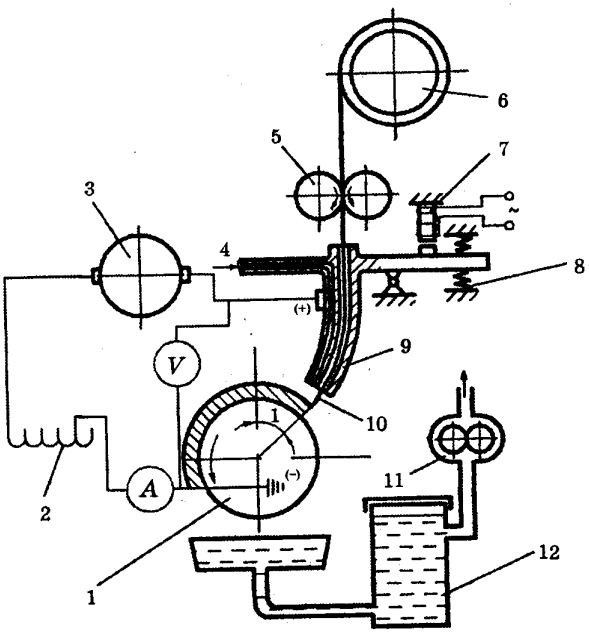


Рисунок 6.5 – Схема установки для вибродугового наплавлення деталей

Сутність процесу. До поверхні деталі 1 роликами 5 з касети 6 через вібруючий мундштук 9 подається електродна дріт 10. Вібрація мундштука з частотою 50-100 Гц здійснюється з допомогою електромагнітного вібратора 7 і пружини 8. Внаслідок вібрації відбувається замикання і розмикання зварювального ланцюга між електродним дротом і деталлю і холостий

і холостий хід.

Струм від джерела 3 підводиться до деталі через ковзний контакт. Для підвищення стійкості і тривалості дугового розряду в ланцюг включають індуктивний опір 2. В зону наплавлення металу через канал 4 з допомогою насоса 11 подається охолоджувальна рідина з фільтра-відстійника 12, в результаті чого відбувається загартування наплавленого металу.

7. Електрошлакове наплавлення

В основу електрошлакового наплавлення (ЕШН) покладено процес виділення теплоти в розплавленому шлаку при проходженні крізь нього електричного струму. На нагрітій поверхні деталі утворюється ванна розплавленого флюсу, в яку введено електрод, а до деталі і електроду прикладена напруга (рис. 6.6).

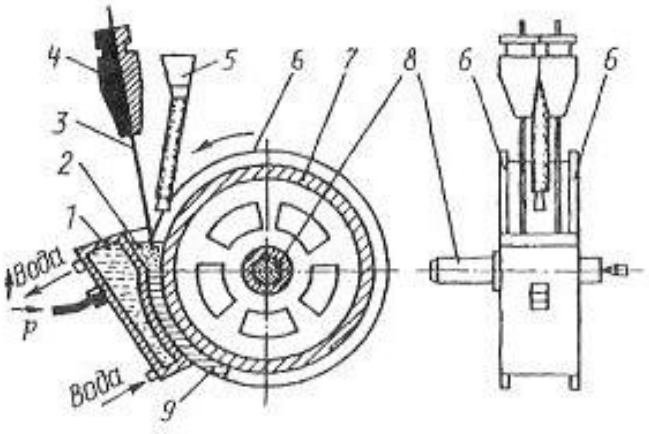


Рисунок 6.6 – Схема електрошлакового наплавлення:
1 – кристалізатор; 2 – шлакова каппа; 3 – електрод;
4 – мундштук; 5 – дозатор легуючих добавок;
6 – великогабаритні диски; 7 – відновлювана деталь;
8 – оправка; 9 – покриття

Струм, що проходить від електрода через рідкий шлак

до деталі, виділяє тепло, достатнє для плавлення шлаку і електродного металу.

Зона наплавлення на поверхні відновлюваної деталі обмежена поверхнями водоохолоджуваних кристалізатора і технологічної пластини.

Можлива товщина шару наплавлення > 12...14 мм. Кристалізатор виготовляють з міді, графіту або кераміки. Кристалізатори можуть бути електрично нейтральними або струмопідводними. Основні переваги: стійкість процесу в широких межах густини струму (від 0,2 до 300 А/мм^2); висока продуктивність.

Види ЕШН: електродними дротами; стрічками або порошковим присадним матеріалом; плавким або неплавким електродом; одно - або багатоелектродна

ЕШН застосовують для отримання біметалевих виробів і відновлення зношених поверхонь великих деталей із зносом > 10 мм. Таким чином відновлюють опорні катки гусеничних машин, ланки гусениць, які працюють в абразивному середовищі, інструмент, шестерні коробок передач та інші деталі.

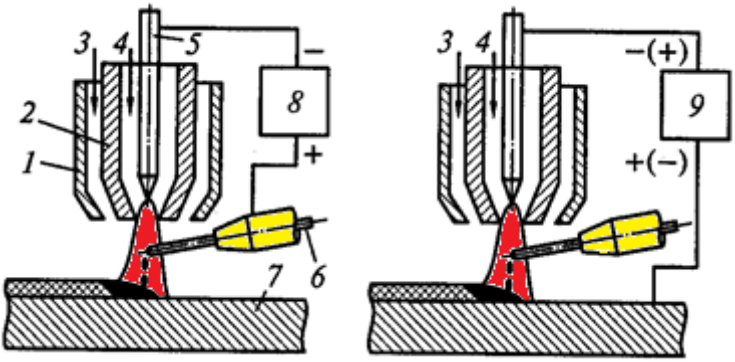
8. Плазмове наплавлення

Плазму отримують пропусканням газового струменя через дугового розряд, що порушується між двома електродами. Дуга горить в замкнутому циліндричному каналі, стінки якого зазнають інтенсивного охолодження. Охолодження зовнішньої поверхні стовпа дуги викликає його концентрацію, внаслідок чого температура стовпа дуги різко підвищується. Плазмообразующий газ, що проходить через межелектродное простір, набуває високий запас енергії, яку використовують для нагрівання в процесі наплавлення.

Для отримання плазмового струменя застосовують спеціальний пристрій - плазмотрон. В даний час з усіх конструкцій плазмотронів найбільше поши рення отримали плазмотрони постійного струму як більш прості за своїми конструктивними схемами. Широке використання плазмотронів змінного

струму стримується через значну ерозії електродів і невисокою стабільності горіння дуги.

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. Наплавлений виріб може бути нейтральним (рис. 6.7, а) (наплавлення плазмовим струменем) або ввімкненим в електричне коло джерела живлення дуги (рис. 6.7, б) (наплавлення плазмовою дугою).



а б

Рисунок 6.7 – Схеми плазмового наплавлення:
1 – захисне сопло; 2 – сопло плазмотрона; 3 – захисний газ; 4 – плазмоутворюючий газ; 5 – електрод; 6 – присадочная дріт; 7 – виріб; 8 – джерело живлення непрямої дуги; 9 - джерело живлення дуги прямої дії

Завдяки характерному для плазмового наплавлення малому проплавленню основного металу необхідна твердість і заданий хімічний склад наплавленого 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.

9. Індукційне наплавлення

Суть індукційного наплавлення полягає в тому, що деталь поміщають в індуктор, який живлять змінним струмом високої частоти (СВЧ) (рис. 6.8). У масі металу деталі чи компактної присадки індукуються вторинні змінні струми тієї ж частот, що розподіляються в поверхневому шарі металу, і нагрівають цей шар. Чим вища частота струму, тим тонший

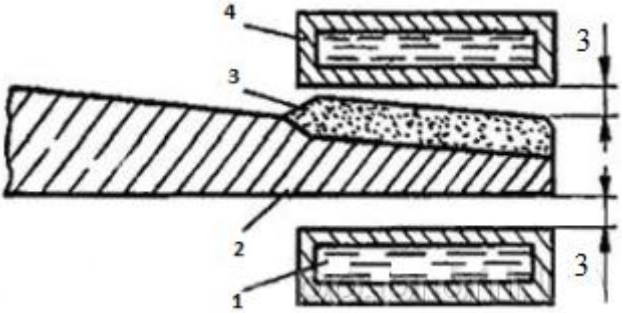


Рисунок 6.8 – Схема індукційного наплавлення порошковим матеріалом:
1 – охолоджуюча рідина; 2 – деталь; 3 – шихта; 4 – індуктор

шар металу, що нагрівається. Після того як метал нагріється вище за точку Кюрі, глибина проникнення індукованих струмів збільшиться в 10-20 разів, 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 наплавленого металів застосовують флюси. Найчастіше присадним матеріалом є шихта, що складається з металевих порошків і флюсових домішок.

10. Лазерне (світлове) наплавлення

Розроблено три способи лазерного наплавлення: з подачею порошку в зону плавлення, оплавлення попередньо нанесених порошкових паст (шлікерних покрить); оплавлення на-

пилених шарів. Лазерне наплавлення з транспортуванням до зони лазерної плями порошку за допомогою газу називається *газопорошковим лазерним наплавленням* (ГПЛН) (рис. 6.9). Подача порошку може здійснюватися за рухом зразка і назустріч руху. Для транспортування порошку в зону обробки застосовуються повітря, азот, гелій, аргон,

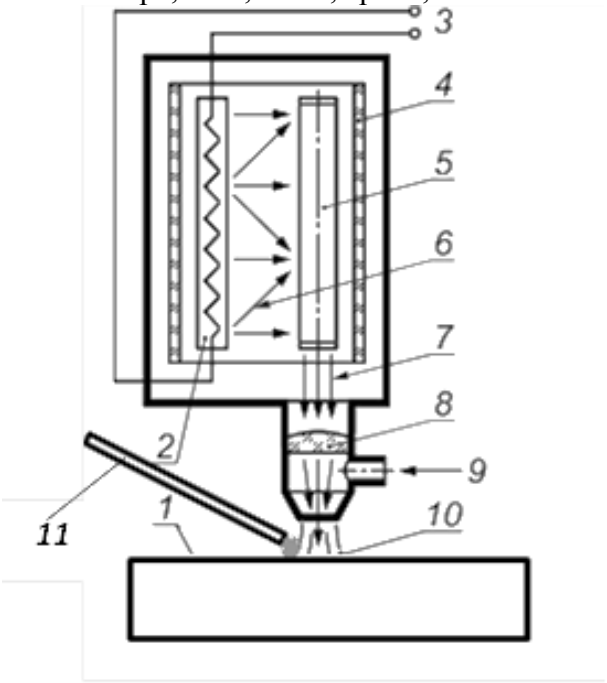


Рисунок 6.9 – Лазерне наплавлення:
1 – деталь; 2 – джерело світла; 3 – джерело живлення;
4 – еліптичний дзеркало; 5 – активний елемент; 6 – світлове випромінювання; 7 – лазерний промінь; 8 – лінза; 9 – захисний газ; 10 – шар, що наплавляється; 11 – подача наплавляемого матеріалу

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.

11. Електронно-променеве наплавлення

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 (рис. 6.10).

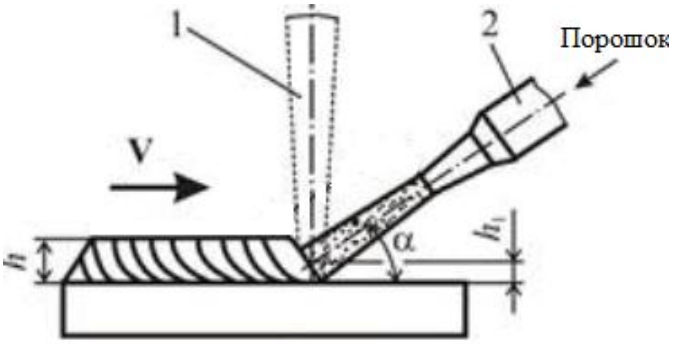


Рисунок 6.10 – Схема процесу електронно-променевої наплавлення:
1 – електронний промінь; 2 – живильник (дозатор порошку)

Технологія електронно-променевої наплавлення заснована на унікальній здатності електронного променя концентрувати енергію. Електронний промінь створює на поверхні деталі ванну розплавленого металу. У нього за допомогою дозатора подається порошок, частинки якого створюють на поверхні покриття з необхідними властивостями. Деталь переміщається всередині вакуумної камери відносно нерухомої електронної гармати і порошкового дозатора, або елек-

тронна гармата з дозатором переміщається відносно нерухомої деталі.

Наплавлення виконується з присадкою суцільним або порошковим дротом. Процес виконується у вакуумі, тому шихта порошкового дроту може складатися з одних легуючих компонентів (рис. 6.11).

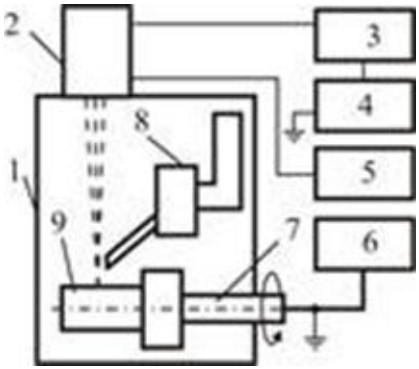


Рисунок 6.11 – Схема установки електронно-променевої наплавлення:
1 – вакуумна камера; 2 – електронний джерело; 3 – блок живлення розряду; 4 – високовольтний блок; 5 – блок живлення фокусуючої котушки і відхиляючої системи;
6 – електропривод маніпулятора; 7 – маніпулятор;
8 – порошковий дозатор; 9 – деталь

Основні переваги: мале та контрольоване проплавлення основного металу; можливість наплавлення шарів малої товщини. Недоліки: складність обладнання, яке дорого коштує; необхідність біологічного захисту персоналу.

12. Газове наплавлення

При такому наплавленні 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 вдуванням порошку (рис.6.12) в газове полум'я. Воно широко використовується при ремонті сільськогосподарської та автомобільної техніки.

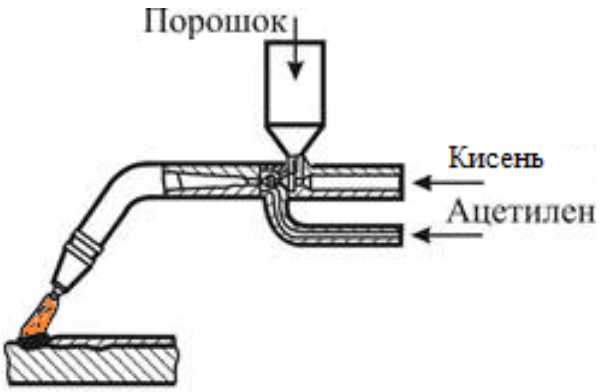


Рисунок 6.12 – Пальник для газопорошкового наплавлення

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

Недоліки: низька продуктивність; нестабільність якості наплавленого шару.

13. Електроконтактне наплавлення

Суть процесу відновлення електроконтактним наварюванням полягає в приварюванні потужними імпульсами струму до поверхонь деталей стальної стрічки, порошків чи дроту. З'єднання основного і присадного металу здійснюється внаслідок їх спільної пластичної деформації, яка супроводжується протіканням крізь місце контакту імпульсів струму (рис. 6.13).

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.

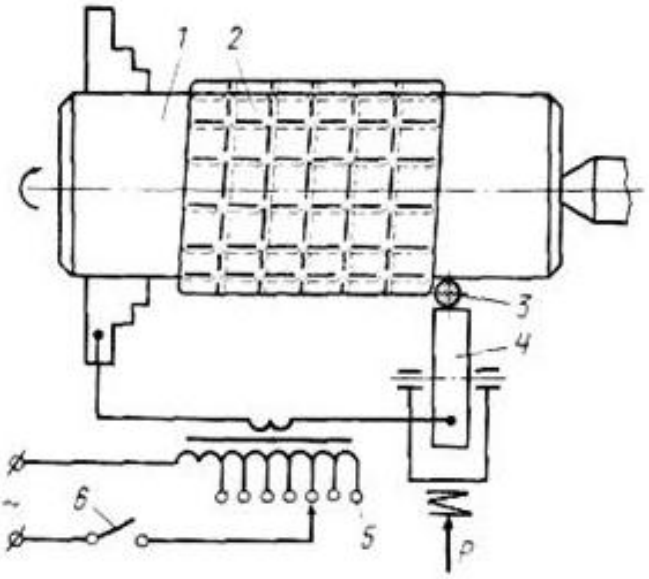


Рисунок 6.13 – Схема електроконтактного наплавлення:
1 – деталь, яка наплавляється, 2 – наплавлений метал;
3 – присадочний дріт, 4 – наплавляющий ролик;
5 – трансформатор, 6 – переривник струму

Основні переваги: відсутність проплавлення основного металу; мінімальні деформації наплавлених деталей; можливість наплавлення шарів малої товщини. Недоліки: низька продуктивність процесу; обмежена номенклатура наплавлених деталей.

14. Структура і властивості наплавленого металу

Для підвищення зносостійкості головним завданням є правильний вибір системи легування. Первинним актом, що призводить до руйнування, є вкорінення абразивної частинки в поверхню металу. Протидіяти впливу абразивного середо-

вища може метал, який має тверду складову (карбіди, бориди, нітриди, інтерметалеві сполуки).

У багатьох випадках ці функції може виконувати мартенсит. Тверді частинки карбідів та інших сполук повинні міцно утримуватися матрицею – основою сплаву. Роль матриці в сталях і сплавах можуть виконувати мартенсит, ферит, аустеніт, ледебурит.

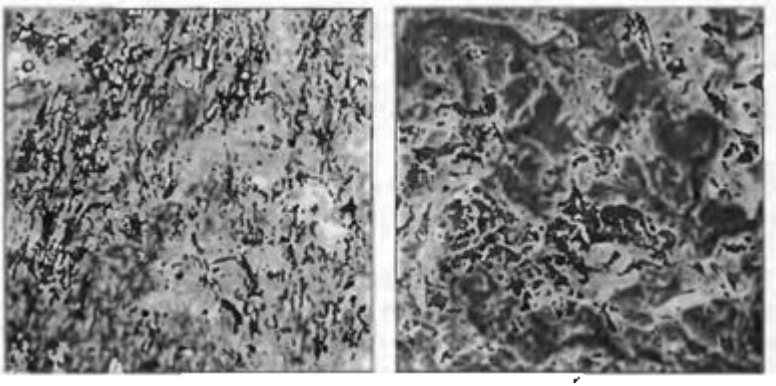
Відповідно до цього класифікація зносостійкого наплавленого металу за структурними ознаками ділиться на такі класи: 1) мартенситний (М); 2) мартенситно-карбідний (крім карбідів, можуть бути довільні тверді частинки – бориди, карбонітриди, інтерметаліди та ін.) (М + К); 3) ферито-карбідний (Ф + К); 4) аустеніто-карбідний (А + К); 5) ледебурито-карбідний (Л + К); 6) змішаний, наприклад М + А, М + Л, та ін.

Структура такого наплавленого металу складається переважно з мартенситу і різної кількості залишкового аустеніту, є також голчастий троостит. На межах стовбчастих кристалі-тів виникають прошари ледебуритної евтектики (рис. 6.14, а). Мікромеханізм руйнування (рис. 6.14, б) металу залежить від вмісту вуглецю – з його збільшенням він змінюється від в'язкого (0,15-0,20 % С) до змішаного квазікрихкого (0,25-0,40 % С) і далі до суто крихкого (більше, ніж 0,40 % С).

Властивості мартенситної матриці залежать від вмісту вуглецю. Низьковуглецевий мартенсит має знижену зносостійкість, але завдяки вищій (порівняно з високовуглецевим мартенситом) в'язкості краще утримує вкраплення твердих частинок і підвищує стійкість до ударно-абразивного зношування.

Вищу твердість порівняно з наплавленим металом мартенситного класу має метал мартенсито-карбідного класу. У цьому випадку найбільш поширеною є система легування Fe-C-Cr.

Завдяки значно сильнішій, ніж у заліза, спорідненості хрому з вуглецем в структурі хромистих сталей утворюються стійкі карбіди $(Fe, Cr)_3$, $(Fe, Cr)_7C_3$, $(Fe, Cr)_{23}C_6$, які є зміцнювальною фазою, що забезпечує високу зносостійкість.



а б

Рисунок 6.14 – Структура (*а*) і характер руйнування (*б*) наплавленого металу мартенситного класу (наплавлення дротом Нп-30ХГСА з подальшим об'ємним загартуванням, 45-48 HRC): а – х340; б – х320

Зі сплавів системи Fe-C-Cr досить високу опірність тертя об абразив має наплавлений метал У10Х5ГС (приблизно 1,0 % C, 4,5 % Cr, 0,5 % Mn, 0,5 % Si). Він має структуру легованого аустеніту з карбідами і крупними голками мартенситу (рис.6.15).

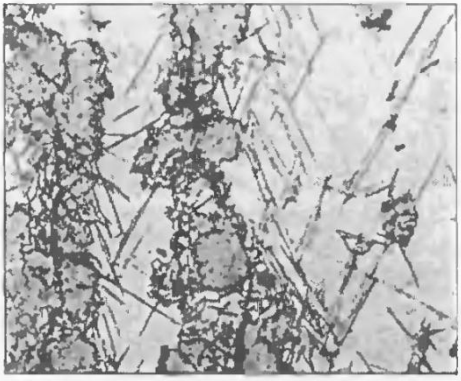


Рисунок 6.15 – Структура наплавленого металу У10Х5ГС; х500

Значне підвищення зносостійкості сплавів системи Fe-C-Cr досягається при додатковому легуванні бором – звичайно, до 1 %.

Крім мартенситу і фериту (в тому числі феритоцементитної суміші - сорбіту, перліту), матрицями зносостійкого наплавленого металу можуть бути аустеніт і ледебурит. Аустеніт має вищу в'язкість і міцність, ніж ферит.

Це сприяє, з одного боку, сильнішому утриманню частинок твердої фази, а з іншого, – загальному підвищенню зносостійкості, особливо при ударно-абразивному зношуванні.

Крім того, аустеніт може перетворюватися на мартенсит при пластичному деформуванні, що супроводжує процес зношування. Це також сприяє додатковому підвищенню зносостійкості. Прикладом аустенітного зносостійкого наплавленого металу є високомарганцева сталь Гадфільда 110Г13Л (рис.6.16).

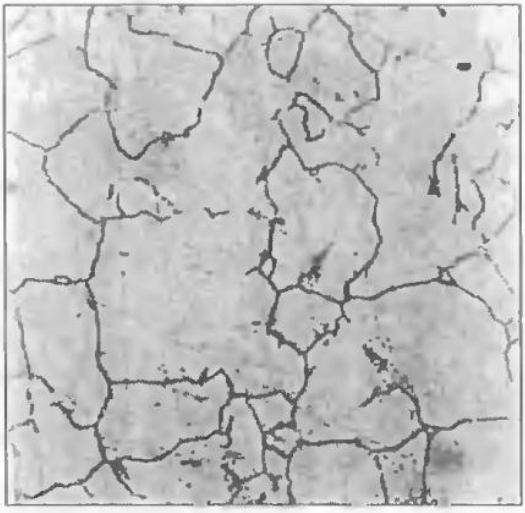


Рисунок 6.16 – Структура наплавленого металу 110Г13Л; х320

Недоліком є схильність аустеніту до розпаду при нагрі-

ванні чи охолодженні з виділенням по межах зерен карбідів цементитного типу. Такий наплавлений метал крихкий, схильний до тріщин і відколів.

Запобігання вказаним недолікам і підвищення теплостійкості аустенітного наплавленого металу здійснюється додатковим легуванням хромом і в незначних кількостях – карбідоутворювальними елементами (молібденом, ванадієм та ін.).

Прикладом зносостійкого наплавленого металу аустенітно-карбідного класу є хромомарганцевий сплав 12Х12Г12СФ, який успішно використовується при наплавленні прокатних валиків (рис.6.17).

Крім карбідної фази, аустенітна матриця зносостійкого наплавленого металу може містити у собі боридну і карбоборидну фази. Це досягається легуванням бором (до 5 % і більше) при одночас-но високому вмісті хрому (10-20 % і більше).

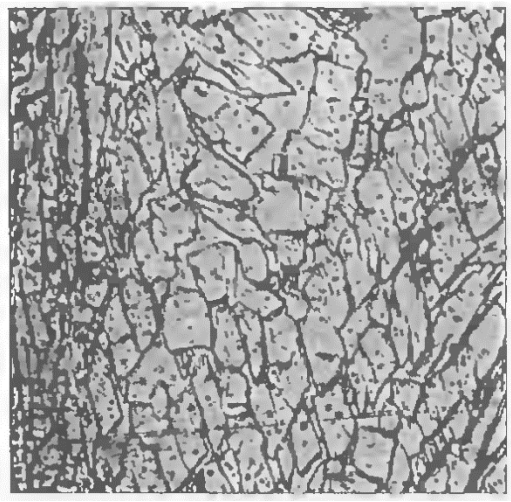


Рисунок 6.17 – Структура наплавленого металу 12Х12Г12СФ; х320

У цьому випадку наплавлений метал практично набуває властивостей дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу – надтверді частинки у в'язкій і пластичній матрицях.

Приклади структур таких матеріалів на залізній основі наведено на рис.6.18

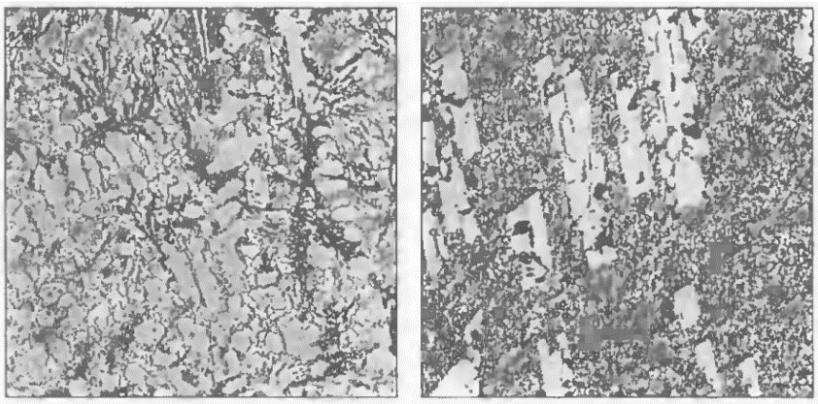


Рисунок 6.18 – Структура наплавленого металу з карбідною фазою:
а – 70Х20Р3ГСТ (порошковий дріт ПП-АН170);
б – 100Х20С3Р4 (порошкова стрічка ПЛ-АН171); х320

У високовуглецевому легованому наплавленому металі матрицею (основою) може бути ледебурит - евтектика системи Fe-Fe_3C – механічна суміш аустеніту і цементиту, яка містить у собі 4,3 % С (рис. 6.19).

Зі сплавів ледебуритно-карбідного класу найпоширенішими є високохромисті чавуни типу сормайт. Сплав 300Х28Н4С4 отримав назву сормайт-1, а 180Х16Н2С2 – сормайт-2. їх використовують для відновлення і зміцнення деталей при абразивному, ударно-абразивному, гідро-і газоабразивному зношуванні.

Найбільш високу зносостійкість мають заевтектичні чавуни, у структурі яких містяться первинні карбіди хрому Cr_7C_3.

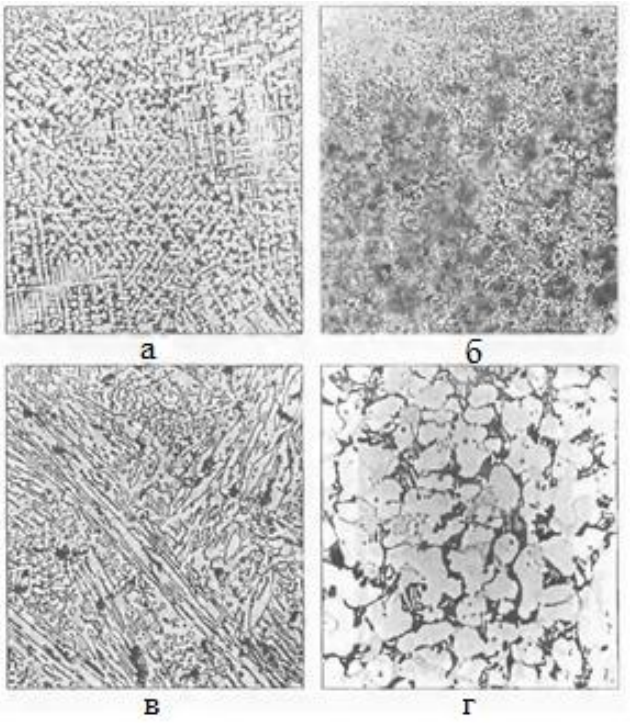


Рисунок 6.19 – Структура наплавленого високохромистого чавуну:
а – доевтсктична; б – евтектична; в – заевтектична;
г – заевтектична і карбоборидною фазою;
а – х200; б, в – х300; г – х500

Додаткове легування бором завдяки утворенню твердих карбоборидів (рис. 6.19, г) істотно підвищує абразивну зносостійкість високохромистих чавунів, але знижує ударостійкість. Для підвищення пластичності матриці і поліпшення міцності її зв'язку з твердими складовими збільшують вміст у сплаві нікелю (наприклад, 500Х40Н40С2РЦ).

15. Матеріали для наплавлення

Електроди для наплавлення поверхневих шарів за хіміч-

ним складом наплавленого металу і твердості при нормальній температурі діляться на 44 типи (наприклад, електроди типу Э-16М2ХМ, Э-110Х14В13Ф2, Э-13Х16Н8М5С5М46). Наплавлений метал багатьох електродів регламентується технічними умовами підприємств-виробників.

Для наплавних робіт також використовують зварювальні електроди, які призначені для зварювання високолегованих корозійностійких, жаростійких і жароміцних сталей.

Залежно від прийнятої системи легування й умов роботи одержуваного наплавленого металу електроди для наплавлення можна умовно поділити на шість груп:

1. Електроди, що забезпечують одержання низьковуглецевого низьколегованого наплавленого металу з високою стійкістю до тертя металу об метал і ударного навантаження.

2. Електроди, за допомогою яких одержується середньовуглецевий низьколегований наплавлений метал з високою стійкістю до тертя металу об метал і ударного навантаження при нормальній і підвищеній температурах (до 600-650 °С).

3. Електроди, які забезпечують одержання вуглецевого, легованого (чи високолегованого) наплавленого металу з високою стійкістю до абразивного зношування й ударного навантаження.

4. Електроди, що забезпечують одержання вуглецевого високолегованого наплавленого металу з високою стійкістю до значних тисків і високих температур (до 650-850 °С).

5. Електроди, які забезпечують одержання високолегованого аустенітного наплавленого металу з високою стійкістю до корозійно-ерозійного зношування і тертя металу об метал при підвищених температурах (до 570-600 °С).

6. Електроди, що забезпечують одержання дисперсно-зміцненого високолегованого наплавленого металу з високою стійкістю до складних температурно-деформаційних умов (до 950-1100 °С).

Найбільш поширені марки електродів для наплавлення наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Найбільш поширені марки електродів для наплавлення

Марка	Твердість наплавленого металу, HRC	Типові об'єкти наплавлення
ОЗН-250У (Е-10Г2)	20—28	Осі, вали
ОЗН-350У (Е-12Г4)	35—40	Осі, вали, деталі автозчеплень
ОЗН-400М (Е-15Г5)	40—44	Те саме
ОЗШ-1 (Е-16Г2ХМ)	35—39	Молоткові, висаджувальні штампи
ЕН-60М (Е-70Х3СМТ)	52—58	Штампи, ножі
ОЗШ-3 (Е-37Х9С2)	52—58	Те саме
12АН/ЛИВТ (Е-95Х7Г5С)	25—32	Деталі земснарядів, драг, екскаваторів
ЕН-Х12М (Е-100Х12М)	53—60	Штампи, ножі
ЦШ-1 (Е-30В8Х3)	40—50	Те саме
ЦИ-2У (Е-90В10Х5Ф2)	57—62	Штампи, ножі, багатолезійний інструмент
ОЗИ-3 (Е-90Х4М4ВФ)	58—63	Штампи, ножі
ОЗИ-5 (Е-10К18В11М10Х3СФ)	58—63	Те саме
ОЗШ-6(Е-10Х33Н11М3СГ)	53—61	" "
ЦНИИН-4(Е-65Х25Г13Н3)	250НВ	Хрестовини стрілкових переводів
ЦН-6Л(Е-08Х17Н8С6Г)	28—37	Деталі запірної арматури для енергетики та нафтохімії
ЦН-12М(Е-13Х16Н8М5С5Г4Б)	28—37	Те саме
Т-590(Е-320Х25С2ГР)	57—63	Деталі, стійкі до абразивного зношування
Т-620(Е-320Х23С2ГТР)	57—63	Те саме
ВСН-6(Е-110Х14В13Ф2)	51—56	" "

Для наплавлення застосовують також дроти суцільного перерізу. Дроти виготовляються діаметром 0,3-6,0 мм і катанки діаметром 6,5 та 8,0 мм (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Дроти для наплавлення

Марка	Твердість наплавленого металу	Типові об'єкти наплавлення
Нп-30	160—220 НВ	Осі, вали, шпинделі
Нп-45	170—230 НВ	Те саме
Нп-85	280—350 НВ	Колінвали, хрестовини карданів
Нп-40Г	180—240 НВ	Осі, вали, шпинделі
Нп-65Г	230—310 НВ	Те саме
Нп-30ХГСА	220—300 НВ	Обтискні прокатні валки, кранові колеса
Нп-50ХНМ	41,5—51,5 HRC	Штампи гарячого штампування
Нп-40Х3Г2МФ	39,5—44,5 HRC	Ролики рольгангів
Нп-50Х6ФМС	43,5—49,5 HRC	Штампи, прокатні валки
Нп-20Х14	34—39,5 HRC	Деталі запірної арматури
Нп-45Х4В3ГФ	39,5—46,5 HRC	Штампи. прокатні валки
Нп-45Х2В8Г	41,5—47,5 HRC	Те саме
Нп-Г13А	220—280 НВ	Хрестовини стрілкових переводів, лиття зі сталі Г13Л

Для відновлювального наплавлення придатні і дроти, які використовуються для зварювання (табл. 6.3)

Таблиця 6.3 – Дроти для зварювання

Марка	Твердість наплавленого металу	Типові об'єкти наплавлення
Св-08	120—160 НВ	Осі, вали, шпинделі
Св-08Г2С	180—210 НВ	Те саме
Св-18ХГС	240—300 НВ	" "
Св-20Х13	42—48 HRC	Деталі запірної арматури
Св-10Х17Т	42—48 HRC	Те саме
Св-06Х19Н9Т	160—190 НВ	Деталі, що працюють в умовах корозії
Св-08Х20Н9Г7Т	160—190 НВ	Те саме

Порошкові дроти для наплавлення є альтернативою високолегованим дротам суцільного перерізу. У табл. 6.4 наведено твердість наплавленого металу та призначення найбільш поширених порошкових дротів.

Таблиця 6.4 – Порошкові дроти для наплавлення

Марка	Твердість наплавленого металу	Типові об'єкти наплавлення
ПП-Нп-14ГСТ (ПП-ТН250)	220—280 НВ	Осі, вали
ПП-Нп-18Х1Г1М (ПП-АН120)	280—380 НВ	Те саме
ПП-Нп-30Х5Г2СМ (ПП-АН122)	49,5—57 HRC	Колінвали, хрестовини карданів
ПП-Нп-100Х4Г2АР	45,5—55 HRC	Котки, натяжні колеса гусеничних тракторів
ПП-Нп-200ХГР (ПП-АН160)	41.5—49,5 HRC	Колінвали з високопробного чавуну
ПП-Нп-25Х5ФМС	41,5—51,5 HRC	Валки гарячої прокатки, ножі, штампи
ПП-Нп-30Х4В2М2ФС (ПП-АН132)	47,5—52,5 HRC	Те саме

Порошкові дроти мають оболонку з м'якої металевої стрічки. Товщина порошкових стрічок для наплавлення, як правило, 3-4 мм, ширина 14-20 мм (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Порошкові стрічки для наплавлення

Марка	Твердість наплавленого металу, HRC	Типові об'єкти наплавлення
ПЛ-Нп-10Г2СТ	20—26	Осі, вали
ПЛ-Нп-15Х4В2М2Г2СФТ	28—36	Ролики рольгангів, гальмівні шківи, котки, колеса гусеничних тракторів
ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2СТ (ПЛ-АН171)	65—68	Деталі, що працюють в умовах абразивного зношування
ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2 (ПЛ-АН101)	50—56	Те саме
ПЛ-Нп-300Х30Г3ТЮ	45—50	" "
ПЛ-Нп-400Х38Г3РТСЮ	50—54	" "
ПЛ-Нп-450Х20Б7М6В2Ф (ПЛ-АН179)	55—62	Конуси та чашки доменних печей
ПЛ-Нп-500Х40Н40С2Р (ПЛ-АН111)	54—62	Те саме
ПЛ-Нп-12Х16Н9С5Г2Т	27—34	Деталі запірної апаратури

Порошки зі сплавів (табл. 6.6) застосовують для плазмово-порошкового, електроконтактного та індукційного наплавлення.

Таблиця 6.6 – Порошки зі сплавів для наплавлення

Тип (марка порошку)	Твердість наплавленого металу, HRC	Типові об'єкти наплавлення
ПН-У30Х28Н4С4 (ПГ-С1)	49—52	Деталі, що працюють в умовах абразивного зношування
ПН-У40Х28Н2С2ВМ (ПГ-С27)	51—54	Те саме
ПН-У50Х38Н (ПГ-УС25)	53—56	" "
ПН-10Р6М5	59—62	Металорізальний інструмент
ПН-ХН80С2Р2 (ПГ-СР2)	35—38	Деталі запірної арматури
ПН-ХН80С3Р3 (ПГ-СР3)	47—52	Те саме
ПН-ХН80С4Р4 (ПГ-СР4)	57—62	" "
ПН-120К60Х30В5С2	42—45	Деталі запірної арматури, клапани ДВЗ
ПН-150К60Х30В5С2 (ПН-АН35)	45—48	Те саме
ПН-Х18ФНМ	45—50	Шнеки екструдерів

Плавлені (табл. 6.7) та керамічні флюси (табл. 6.8) наведені в таблицях.

Таблиця 6.7 – Плавлені флюси

Марка	Масова частка основних компонентів, %							
	SiO_2	MnO	CaO	MgO	Al_2O_3	CaF_2	FeO	Інші
АН-348-А	42,0	36,0	6,5	6,0	4,5	4,5	2,0	—
АН-60	42,0	38,0	6,0	2,0	5,0	6,0	1,5	—
АН-26	30,0	3,0	6.0	17,0	21,0	22,0	1,5	—
АН-20	20,0	0,5	7,0	11,0	30,0	29,0	1,0	2,5 $K_2O + Na_2O$
АН-72	18,0	1,0	20,0	1,0	20,0	40,0	0,5	2,0 ZrO_2
АН-90	25,0	—	22,0	1,0	10,0	40,0	1,0	—

Таблиця 6.8 – Керамічні флюси

Марка	Масова частка елементів у наплавленому металі, %							Твердість наплавленого металу, HRC
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	
ЖСН-1	0,5	0,6	2,0	5,4	—	—	—	45—50
ЖСН-2	0,3	0,3	1,2	2,8	—	—	—	33—38
ЖСН-4	1,1	0,6	0,6	5,0	—	—	—	40—43
ЖСН-5	0,2	0,3	0,3	6,2	0,7	0,3	—	35—38
ЖСН-6	0,3	0,6	3,8	5,5	0,7	0,6	1,5	40—43
АНК-18	0,3	0,2	1,4	3,5	—	—	—	35—40
АНК-19	0,6	0,3	0,8	4,5	—	—	—	50—55
АНК-40	0,2	0,8	1,2	1,2	—	—	—	25—30

16. Технологія наплавлення

Підготовка деталей до наплавлення.

Для очищення деталей 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.

Від нагару і накипу деталі очищають у розплаві солей та лугів при температурі 390-410 °С. Нагар, іржу та стару фарбу часто видаляють металевими щітками з пневматич-ним інструментом .

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

Для видалення дефектів у вигляді місцевого зношування потрібно зробити канавку чи вибірку для подальшого наплавлення.

Особливості технології наплавлення матеріалів різного типу залежать від хімічного складу і його призначення. Проте є деякі загальні положення щодо, наприклад, вибору температури попереднього підігрівання виробу, яке застосовують для попередження можливості виникнення дефектів у наплавленому шарі або зоні сплавлення. Рекомендовані температури підігріву наведено в табл. 6.9

Таблиця 6.9 – Температури попереднього підігрівання виробу для попередження можливості виникнення дефектів у наплавленому шарі або зоні сплавлення.

Тип основного металу	Вуглецевий еквівалент	Температура підігрівання, °С
Нелеговані, низьколеговані і хромонікелеві нержавіючі сталі	≤0,35	Без підігрівання
Середньовуглецеві і низьколеговані сталі	0,40—0,65	300—450
Високовуглецеві і високолеговані сталі	≥0,7	400—650
Інструментальні сталі	≥0,7	300—600
Високомарганцеві сталі типу Г13	≥1,0	Без підігрівання
Чавун	≥2,5	550—700

Формула для визначення еквівалента *С*% Міжнародного інституту зварювання має вид:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \qquad (6.10)$$

17. Електроіскрове легування (ЕІЛ)

Закономірності легування. При зближенні анода і катода зростає напруженість електричного поля, і при певній відстані між ними виникає іскровий електричний розряд (рис. 6.20, *а*). Через утворений канал провідності пучок електронів сфокусовано вдаряється об поверхню анода і нагріває її до оплавлення. Від анода відокремлюється крапля розплавленого матеріалу і рухається до катода, випереджаючи анод (рис. 6.20, *б*).

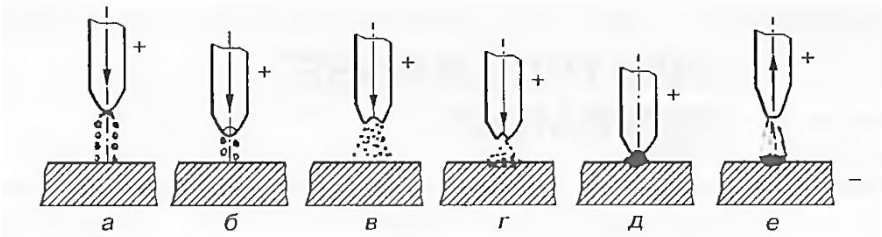


Рисунок 6.20 – Схема процесу електроіскрового легування

Крапля нагрівається до високої температури, закипає і "вибухає". Електричне коло розривається, зусилля стиснення електромагнітного поля зникають, й утворені частинки вилітають широким пучком (рис. 6.20, *в*). Розплавлені частинки, потрапивши на катод, зварюються з ним і частково проникають у його поверхню (рис. 6.20, *г*). За частинками рухається анод і крізь розігріті частинки, які розташовані на катоді, проходить другий імпульс струму, який супроводжується механічним ударом анода (рис. 6.20, *д*).

При механічному контакті електродів частинки зварюються між собою, тонкий шар поверхні катода нагрівається. При цьому, крім дифузійних процесів, можуть відбуватися хімічні реакції між частинками і матеріалом катода. Механічний удар анода по покриттю збільшує його щільність, однорідність, міцність зчеплення з основою. Далі анод рухається вверх (рис. 6.20, *е*), а на поверхні катода залишається покриття, яке складається з матеріалу анода і продуктів його взаємодії з матеріалом катода, а також з навколишнім середовищем.

На рис. 6.21 наведені основні схеми утворення легованого шару при ЕІЛ.

Електроерозійна стійкість матеріалів у процесі ЕІЛ визначається насамперед енергією зв'язку між атомами. Важливою характеристикою міцності таких зв'язків є характеристична температура, яка визначається за рівнянням Ліндемана:

$$\theta = 137\sqrt{\frac{T_{\text{пл}}\rho^{2/3}}{M^{5/3}}} \qquad (6.11)$$

де $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення, К; ρ – густина, г/см^3; М – молекулярна маса матеріалу.

Зі зростанням величини θ збільшується ерозійна стійкість матеріалу. Ерозійна стійкість великою мірою визначається комплексом теплофізичних властивостей матеріалів.

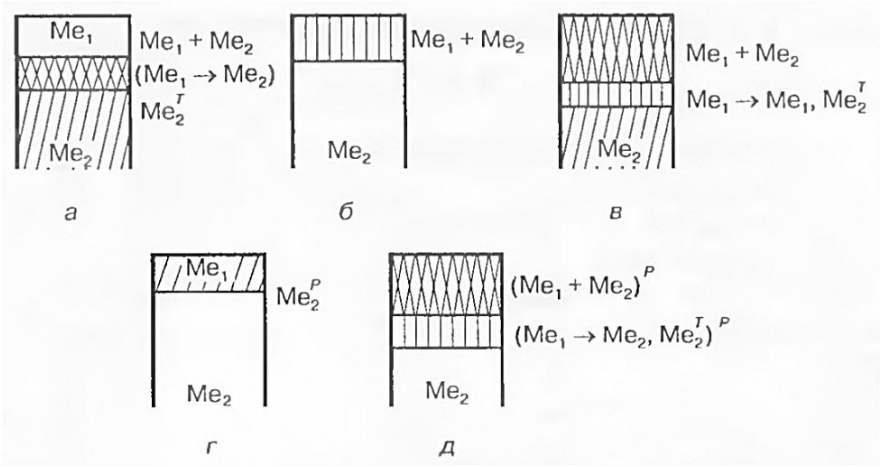


Рисунок 6.21 – Основні схеми утворення легованого шару при ЕІЛ:
Me_1 – матеріал анода, Me_2 – матеріал катода; Me_1 - Me_2 – дифузія матеріалу анода в катод; M_2 – термомеханічна обробка матеріалу катода; Me_1+ Me_2 – утворення сполучень розчинів; $(Me_1 + Me_2)^P$ – імпульсна дія механічних навантажень на матеріалах покриття.

Для кількісної оцінки ерозійної стійкості запропоновано формулу:

$$K = c\rho\lambda T_{пл}^2 \qquad (6.12)$$

де K - коефіцієнт ерозійної стійкості матеріалу (чим більше значення К, тим виша стійкість); c - теплоємність, Дж/(кг моль К); ρ - густина, кг/м^3; λ – теплопровідність, Вт/(м К); $T_{пл}$ – температура плавлення, К.

Згідно з формулою (6.12) за розрахунковими значеннями коефіцієнта K можна скласти ряд металів у міру збільшення їх ерозійної стійкості:

$$Ti - Zr - V - Ni - Fe - Co - Cr - Nb - Cu - Ta - Mo - W$$

Для тугоплавких матеріалів з великим модулем пружності і малою пластичністю в ефекті ерозії разом із процесами плавлення, випаровування і гідродинамічного викиду значну роль відіграє крихке руйнування поверхні внаслідок термічних напружень. При цьому частка руйнування в електроерозійному ефекті зростає зі збільшенням модуля пружності і температури плавлення матеріалів.

Критерій ерозійної стійкості S :

$$S = 42{,}68\frac{T_{пл}\,\lambda}{E\,\alpha}(1-\mu) \qquad (6.13)$$

де $T_{пл}$ – температура плавлення, К; λ - теплопровідність, Вт/(м К); E – модуль нормальної пружності, кг/м^2; α – коефіцієнт термічного розширення, К$^{-1}$; μ – коефіцієнт Пуассона.

Характеристики відносної ерозійної стійкості металів (за критерієм Альбінські), розраховані за формулою (6.13), наведені в табл. 6.10.

Таблиця 6.10 – Характеристики відносної ерозійної стійкості металів

Метал	$E \cdot 10^6$, кг/см^2	$\alpha \cdot 10^6$, К$^{-1}$	$T_{пл}$, °С	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/м · К · с	Коефіцієнт Пуассона, μ	Критерій, S
Ti	0,961	9,2	1665	52	0,36	270
Zn	0,684	5,9	1855	68	0,35	870
V	1,470	6,15	1917	72	0,35	427
Nb	1,000	7,9	2497	105	0,39	870
Ta	1,770	7,5	2997	105	0,35	650
Cr	2,450	6,25	1903	200	0,35	690
Mo	3,290	6,6	2617	300	0,31	1156
W	4,070	5,5	3377	310	0,30	1370
Fe	2,110	10,7	1529	170	0,28	360
Co	2,090	13,5	1495	162	0,31	263
Ni	1,960	13,2	1455	155	0,32	254
Cu	1,290	16,61	1083	950	0,35	1310
Ag	0,800	18,62	961	1050	0,37	1800

За збільшенням критерію S метали можна розмістити в такий ряд:

$$Ni - Co - Ti - Fe - V - Ta - Cr - Nb - Mo - Cu - W - Ag$$

Формування і властивості покриттів. Процес формування покриттів при ЕІЛ залежить від таких основних факторів: природи матеріалів анода і катода, їх поведінки при електроіскровому розряді, електричних параметрів процесу, складу навколишнього середовища, часу обробки.

Характерним є явище, коли при формуванні шару збільшення часу обробки приводить не до зростання товщини, а навпаки, починаючи з певного моменту, – до її зменшення. Це пояснюється тим, що в процесі ЕІЛ змінюються хімічний склад катода і його фізико-механічні властивості, характер тепло- і масообміну між матеріалами анода і катода.

Процес легування в часі можна поділити на два етапи: протягом першого етапу спостерігається безперервне збільшення маси катода, протягом другого – відбувається періодичне зменшення і збільшення його маси.

За характером взаємодії із залізом і вуглецевими сталями (катодом) тугоплавкі метали (анод) можна умовно поділити на дві основні групи: метали, що утворюють необмежені тверді розчини – V, Cr, Co, Ni і метали, які утворюють обмежені розчини – Ti, Zr, Nb, Ta, Mo, W, Hf.

У табл. 6.11 наведені результати взаємодії анода (тугоплавких металів) і катода (сталі 3) залежно від режимів легування.

Як бачимо, від природи матеріалу анода істотно залежить його взаємодія з матеріалом катода, тобто від його електронного стану, структури, фізико-хімічних властивостей. Практично в усіх випадках максимальний вміст матеріалу анода в катоді значно вищий, ніж катода в аноді. Особливо чітко це спостерігається при легуванні сталі 3 (катода) такими металами, як цирконій, тантал, молібден, вольфрам.

Як правило, на аноді існують дві зони. Перша зона створена сумісною кристалізацією матеріалів анода і катода і простягається від робочої поверхні анода до тієї ділянки, в якій вміст заліза (матеріалу катода) мінімальний. У цій зоні вна-

слідок інтенсивного перемішування в мікрованні спостерігається різка зміна вмісту тугоплавкого металу на глибині шару.

Таблиця 6.11 – Зміни характеристик поверхонь електродів після електроіскрового легування

Матеріал анода	Питомий час обробки, хв/см^2	Глибина проникнення матеріалу катода в анод, мкм	Максимальний вміст матеріалу катода в аноді, %	Глибина проникнення матеріалу анода в катод, мкм	Максимальний вміст матеріалу анода в катоді, %
Ti	2	24	6	10	30
Ti	5	72	11	20	55
Zr	2	20	4	15	63
Zr	5	22	5	15	90
Hf	2	–	–	18	70
Hf	5	–	–	24	78
Nb	2	12	9	17	73
Nb	5	15	11	30	85
Ta	2	9	4	18	70
Ta	5	21	7	24	80
Mo	2	24	2	20	98
Mo	5	32	6	50	100
W	2	12	2	35	100
W	5	15	10	66	93

Друга зона на аноді характеризується значними включеннями заліза на великій глибині. Це пояснюється більш високою температурою анода, ніж катода, і значним прискоренням процесів дифузії.

Контрольні питання

1. Якими параметрами характеризується форма валиків?
2. Чим оцінюється продуктивність наплавлення?
3. Як оцінюється продуктивність розплавлення?
4. За якими ознаками класифікуються спосібі наплавлення?
5. Як здійснюється легування наплавленого металу?
6. Від яких параметрів залежить режим наплавлення під шаром флюсу?

7. Яка сутність способу наплавлення в середовищі захисних газів?

8. Яка сутність процесу вібродугового наплавлення?

9. Які застосовують види електрошлакового наплавлення?

10. Які основні схеми застосовуються при плазмовому наплавленні?

11. Поясніть суть індукційного наплавлення?

12. Які застосовують спосібі лазерного наплавлення?

13. Які переваги електронно-променевого наплавлення?

14. Які переваги газової наплавлення.

15. Які переваги процесу електроконтактной наплавлення?

16. На які класи за структурними ознаками поділяються зносостійкий наплавлений метал?

17. На які групи поділяються електроди для наплавлення?

18. Як проводиться підготовка деталей для наплавлення?

19. У чому полягає суть електроіскрового легування поверхні?

20. Які основні схеми утворення легованого шару при електроіскровому легуванні поверхні.

21. Чим визначається електроерозійна стійкість матеріалів у процесі електроіскрового легування поверхні?

22. Які особливості формування покриттів при електроіскровому легуванні поверхні та їх властивості?

ЛЕКЦІЯ 7

МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ТА ІНШІ МЕТОДИ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ

1. Модифікування поверхні лазером. 2. Модифікування поверхні електронним променем. 3. Іонна імплантація. 4. Обробка плазмою. 5. Гальванічні процеси. 6. Хімічне осадження. 7. Дифузійне насичення.

1. Модифікування поверхні лазером

Лазер або **оптичний квантовий генератор** – це пристрій, який перетворює світлову енергію в енергію когерентного, монохроматичного потоку випромінювання. Внаслідок надання зовнішньої енергії атоми активної речовини робочого тіла переходять у збуджений стан. Через деякий проміжок часу збуджений атом випромінює одержану енергію у вигляді фотона (рис. 7.1).

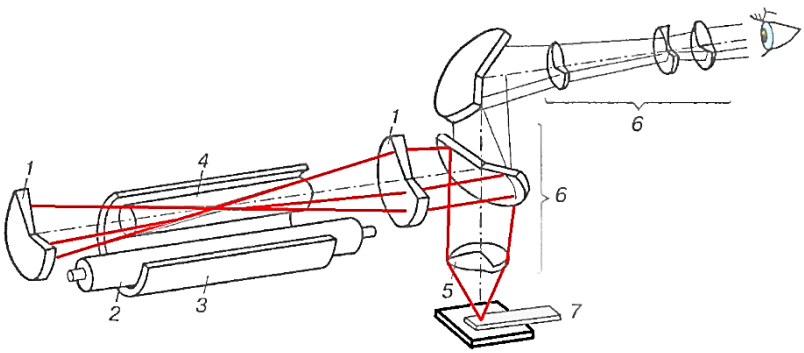


Рисунок 7.1 – Схема лазерної установки:
1 – дзеркало резонатора; 2 – лампа надання зовнішньої енергії;
3 – дзеркальна порожнина освітлювача; 4 – робоче тіло;
5 – лінза; 6 – мікроскоп; 7 – виріб.

Фотони виникають у процесах переходу атомів, молекул, іонів і зі збуджених станів у стабільніші стани з меншою енергією. При певному рівні збудження відбувається лавиноподібний перехід збуджених атомів активної речовини випромінювача у стабільніший стан. Це створює когерентне світлове монохроматичне випромінювання, яке випускається у вигляді вузького спрямованого пучка.

Властивості зміцнених матеріалів. Лазерне зміцнення підвищує зносостійкість пар тертя, які працюють в умовах сухого тертя і в абразивно-мастильному середовищі (рис. 7.2). При цьому спостерігається підвищення зносостійкості не тільки зміцненої поверхні, а й контртіла.

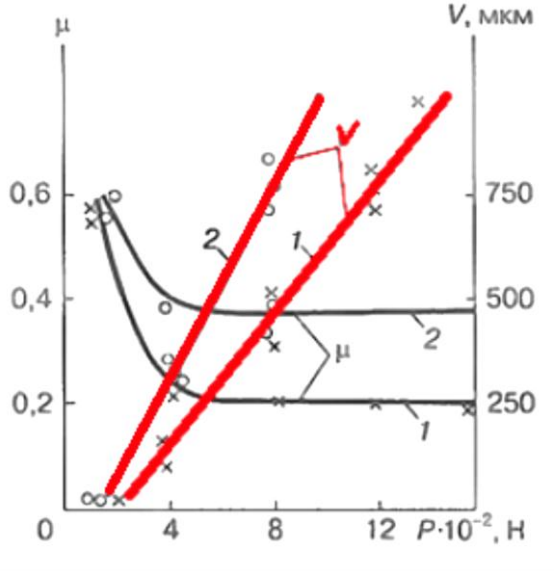


Рисунок 7.2 – Залежність швидкості зношування V і коефіцієнта тертя μ від тиску P:
1 - сталь 40Х, яка зміцнена лазерним опроміненням;
2 - сталь 40Х, загартована за стандартною методикою

Підвищення зносостійкості спостерігається внаслідок

значного зменшення (іноді до 2 разів) коефіцієнта тертя. На рис. наведені залежності швидкості зношування V і коефіцієнта тертя $\boldsymbol{\mu}$ сталі 40Х.

Механічні властивості матеріалів, такі, як границя міцності $\sigma_в$, границя плинності σ_{02}, ударна в'язкість $\boldsymbol{a_н}$, також змінюються внаслідок лазерного опромінення. Наприклад, для загартованої сталі ударна в'язкість знижується після лазерної обробки від 5 до 1,32 МДж/м^2.

Лазерне легування матеріалів. Лазерне легування полягає в насиченні матеріалу легуючими елементами допомогою дифузії попередньо нанесеного шару під впливом лазерного пучка. При цьому досягається висока концентрація легуючих компонентів у поверхневих шарах матеріалів (рис. 7.3).

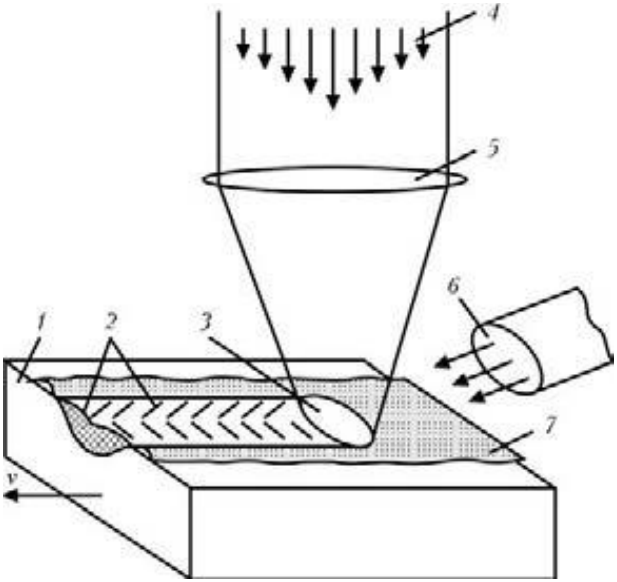


Рисунок 7.3 – Схема процесса лазерного легирования:
1 – образец, движущийся со скоростью *v*; *2* – легированная дорожка; *3* – ванна расплава; *4* – лазерный пучок; *5* – фокусирующая система; *6* – защитный газ; *7* – легирующая обмазка

Ступінь зміцнення залежить як від типу легуючого елемента (елементів), так і від властивостей матричного матеріалу. Так, при легуванні заліза сполуками, які містять вуглець, досягається значне підвищення його концентрації 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.7.4). У зоні дії лазерного випромінювання наявні тверді розчини на основі заліза.

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. 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.

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 (Mo) за масою від 28 до 36 %. Це в 5-6 разів перевищує рівень концентрації, характерної для рівно-

важних умов систем залізо-молібден при температурах не вищих, ніж 500 °С.

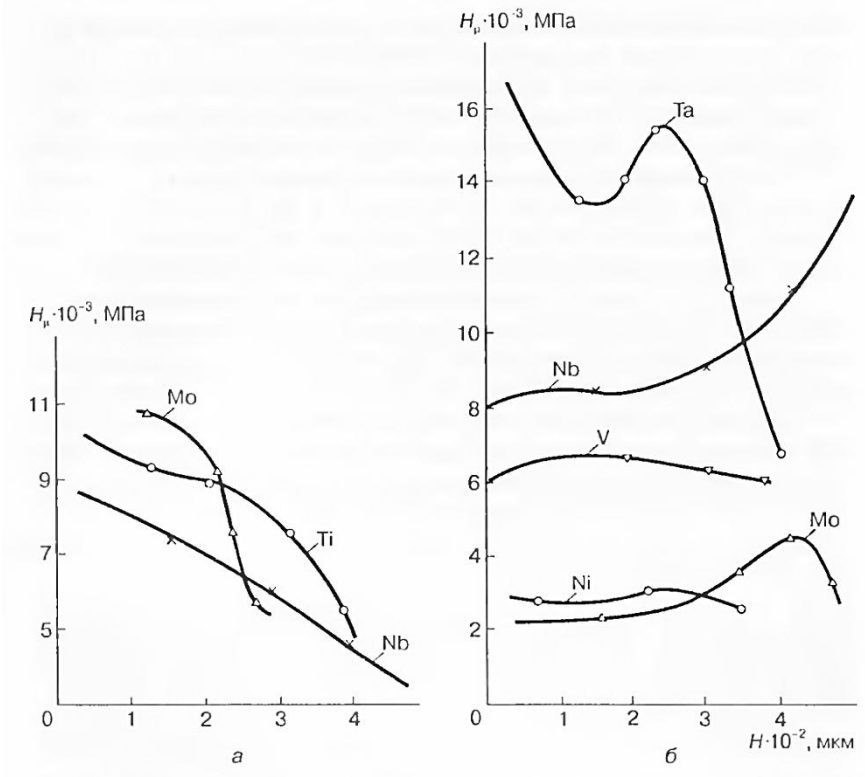


Рисунок 7.4 – Вплив типу легуючого елемента і матричного матеріалу на мікротвердість легованого шару:
а – матриця сталь ШХ15; *б* – матриця армко-залізо

Розподіл легуючого елемента локалізований межами зони лазерної дії, і легуючі елементи практично не проникають за межі зони, тому можна розрахувати максимальну концентрацію елемента в зоні, що опромінюється.

Якщо припустити, що контур елементарної розплавленої зони при дії імпульсного випромінювання являє собою параболоїд обертання з твірною, яка відповідає ізотермі плавлення матеріалу, тоді

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V_1+V_2}{V_2} \quad (7.1)$$

$$K_2 = \frac{K_1 V_1}{V_1+V_2} \quad (7.2)$$

де K_1 і V_1 – відповідно концентрація елемента в попередньо нанесеному шарі і об'єм цього шару; K_2 і V_2 – відповідно концентрація легуючого елемента в розплавленому об'ємі матриці і об'єм розплавленого металу.

2. Модифікування поверхні електронним променем

Електронний промінь – потік електронів, що випромінюються одним джерелом і рухаються по близьких траєкторіях у певному напрямку. Електронний промінь створюється спеціальним приладом – електронною гарматою (рис.7.5.), за допомогою якої отримують вузькі електронні пучки з великою густиною енергії. Для забезпечення вільного руху електронів від катода до анода і далі до виробу, а також для того, щоб запобігти утворенню дугового розряду між електродами, в установці створюється глибокий вакуум (порядку $1 \cdot 10^{-2}$ Па) (див. рис. 7.5).

Особливості модифікування поверхні. При електронно-променевій обробці поверхні можливі декілька видів її стану (рис.7.6). Оплавлення і наступне твердіння з невеликими швидкостями здійснюється для рафінування (рис.7.6, а). металу поверхні заготовки і усунення поверхневих дефектів. Загартування сплавів з твердого стану (рис.7.6, б) здійснюється зі швидкостями нагрівання й охолодження приблизно 10^2-10^4 К/с. Практичне значення мають процеси поверхневого легування (рис.7.6, *г*), наплавлення матеріалу (рис.7.6, *е*), обробки попередньо нанесених на метал покриттів (рис.7.6, *ж*), нагрівання шарів після хіміко-термічної обробки. Ударне зміцнення (рис.7.6, *з*) відбувається за проміжок часу 10^{-6}-10^{-8} с.

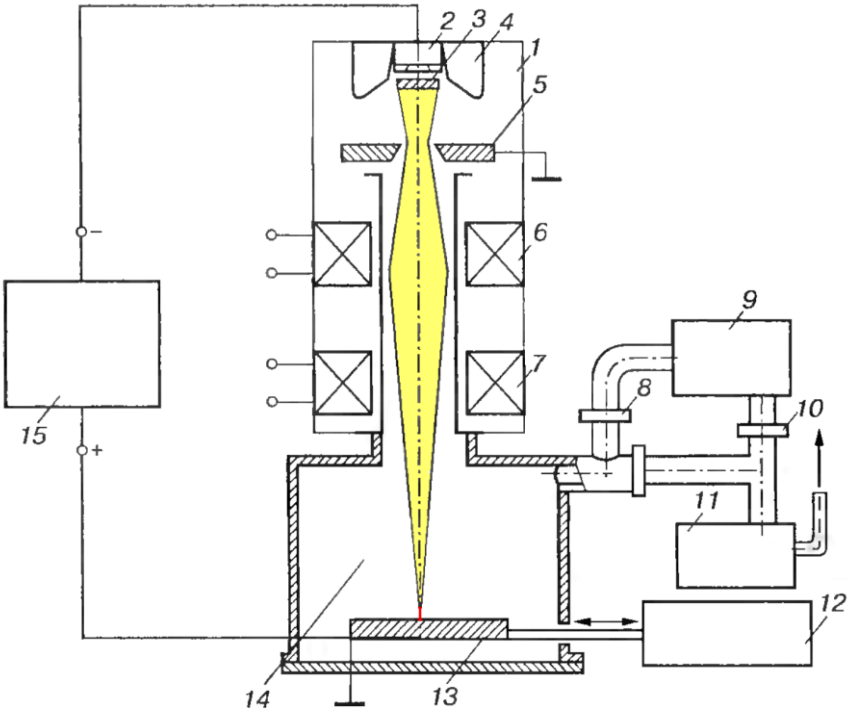


Рисунок 7.5 – Схема електронно-променевої установки:
1 – електронна гармата; *2* – нагрівник; *3* – катод;
4 – додатковий електрод; *5* – анод; *6* – магнітна лінза;
7 – система відхилення; *8, 10* – затвори;
9 – дифузійний насос; *11* – форвакуумний насос;
12 – привід маніпулятора; *13* – виріб; *14* – вакуумний об'єм;
15 – високовольтне джерело постійного струму

При електронно-променевому оплавленні в режимах рафінування і загартування з рідкого стану переплавлення сталей та сплавів приводить до виділення газів і 30-75 % неметалевих включень. Розподіл включень є більш рівномірними і вони зменшуються за розмірами. Це покращує комплекс фізико-механічних характеристик матеріалів: підвищуються густина, ударна в'язкість, теплопровідність рис.7.7), контактне

витримування, зменшується схильність до гарячого тріщиноутворення. Наприклад, стійкість інструменту зі сталей електронно-променевого переплавлення для холодного і гарячого деформування зростає на 70-155 %.

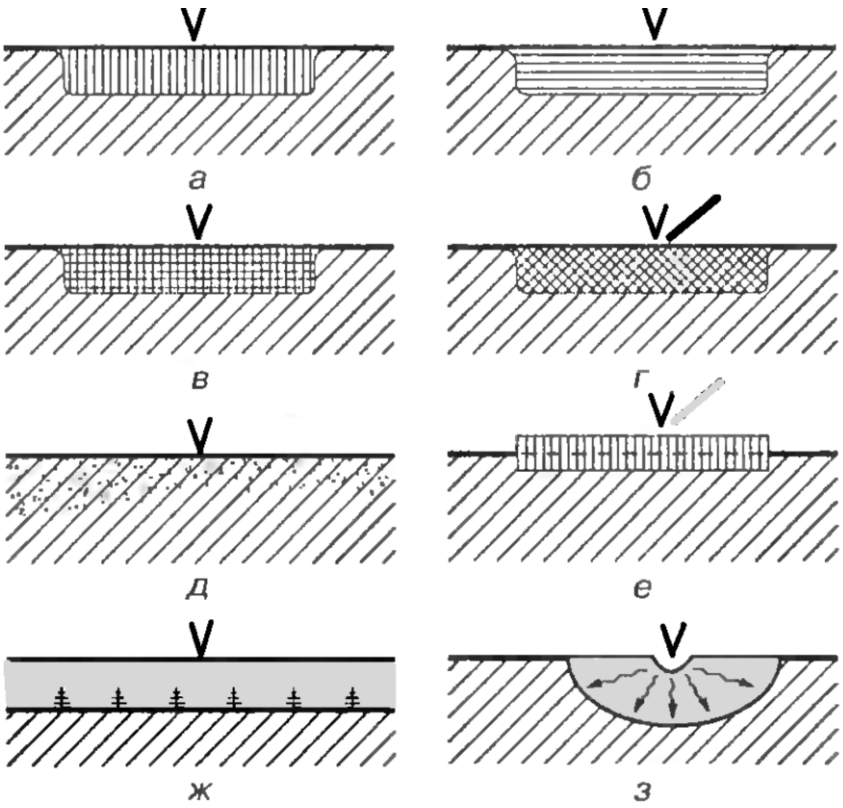


Рисунок 7.6 – Схеми електронно-променевого модифікування поверхні:
а – рафінувальне оплавлення: *б* – загартування з твердого стану; в – модифікування за фазовим перетворенням; *г* – легування; *д* – дифузія; *е* – наплавлення; *ж* – обробка попередньо нанесених покриттів; *з* – ударне зміцнення

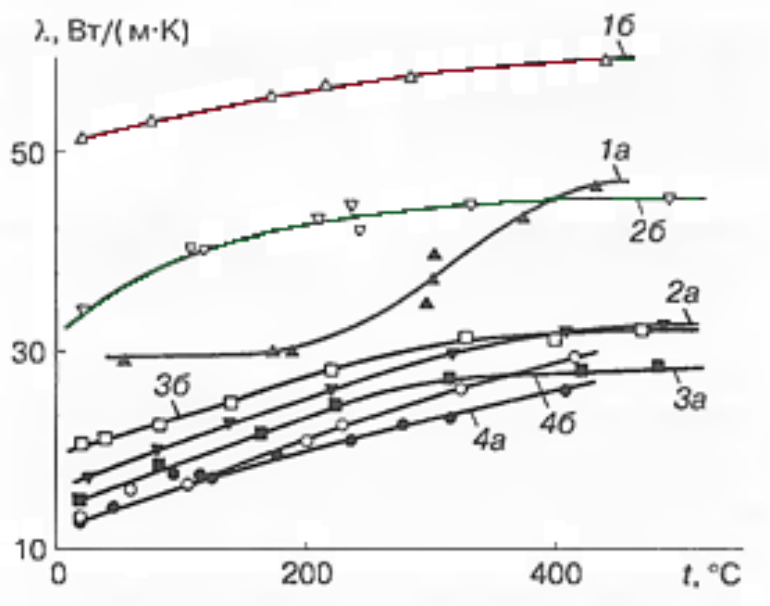


Рисунок 7.7 - Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності сталей:
1– 5ХНМ; *2* - ШХ15СГ; *3* – 4Х5МФС; *4* – ДИ23 у вихідному стані (а) і після електронно-променевого оплавлення *(б)*

3. Іонна імплантація

Іонна імплантація – процес, коли практично кожен елемент може бути вкорінений у приповерхневу область будь-якого твердого тіла - мішені, яку розміщено у вакуумній камері, за допомогою пучка високошвидкісних іонів, що мають енергію кілька мегаелектрон-вольт. Іони вкорінюються в матеріал мішені на глибину від 0,01 до 1 мкм, втрачаючи енергію в процесі зіткнень з атомами основи.

Найбільшого поширення отримали установки малих і середніх доз (рис. 7.8) (інтенсивність пучка 500-800 мкА), в яких приймальна камера заземлена, що дуже зручно в роботі.

Оптимальним у вакуумних системах для іонного легування вважають вакуум приблизно 10^{-4} Па.

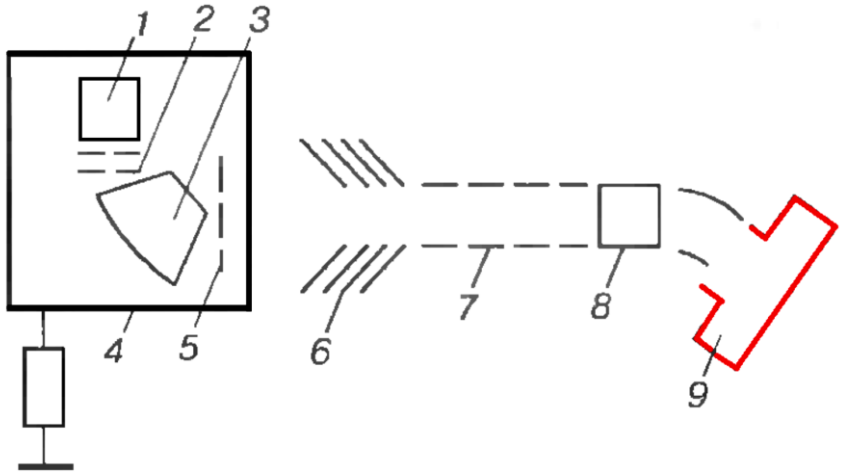


Рисунок 7.8 – Схеми установок малих і середніх доз іонної імплантації:
1 – джерело іонів; 2 – система витягування і первинного формування пучка; 3 – мас-сепаратор; 4 – високовольтний модуль; 5 – регульована діафрагма; 6 – система прискорення; 7 – фокусувальна лінза; 8 – пластини скапування пучка; 9 – приймальна камера

Складну гамму взаємодій можна звести до двох незалежних механізмів - пружного розсіювання на ядрах і непружної взаємодії з електронними оболонками. Основний внесок у розсіювання на електронах дають зовнішні оболонки. Типові залежності електронного і ядерного гальмування від енергії іона наведено на рис.7.9.

При легуванні металів характерні значення енергії E_1, E_2, E_3, які змінюються в такому діапазоні: E_1 – від кількох кілоелектрон-вольт (при легуванні легкими іонами) до сотень (при використанні важких іонів); E_2 – від кількох кілоелектровольт до одиниць мегаелектрон-вольт; E_3 – десятки мегаелектрон-вольт.

На початковій стадії проходження високоенергетич-ного іона крізь речовину переважає розсіювання на електронних

оболонках атомів мішені. Зі зниженням енергії іона домінуючим виявляється внесок ядерного гальмування.

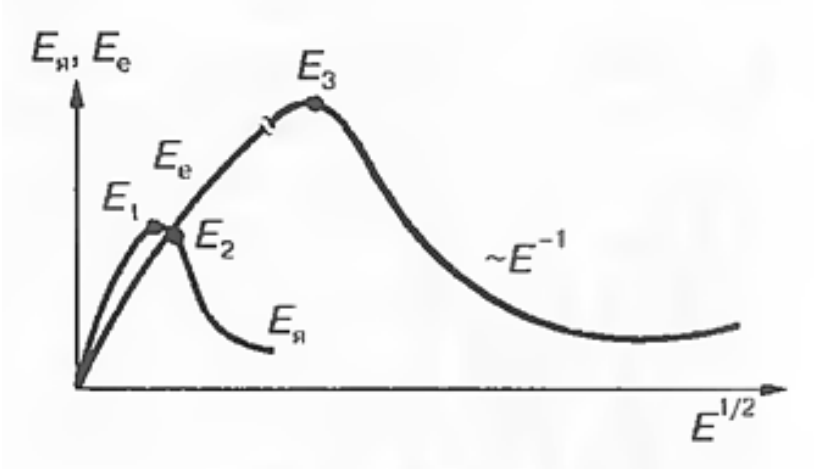
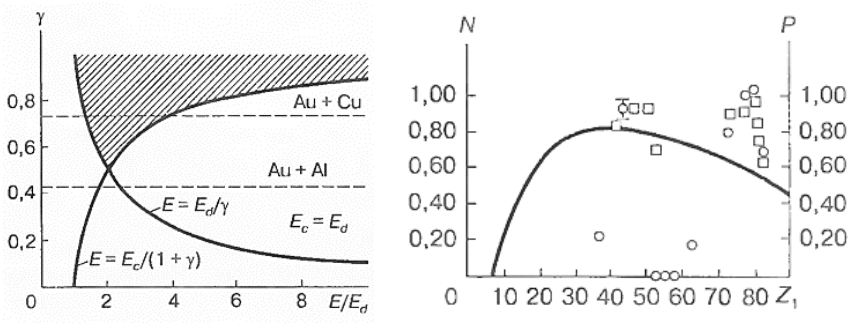


Рисунок 7.9 – Залежність утрат енергії при ядерних $E_я$ і електронних E_e взаємодіях від енергії первинного іона

Важкий іон із початковою кінетичною енергією 100 кеВ, потрапляючи в тверде тіло, може зупинитися за час $\sim 10^{-13}$ с. На початку руху у твердому тілі іон уповільнюється внаслідок утрат енергії на взаємодію з електронами і атомами мішені. Гальмування викликається переважно ефектами пружного атомного розсіювання, і це спостерігається наприкінці періоду гальмування при малих енергіях іона. Наприкінці іонного шляху існує імовірність заміщення іоном атома мішені. Такий процес називають *заміщенням при зіткненні.* Особливості заміщення випадкового іона з енергією E_1 і масою m_1, при зіткненні ілюструють рис. 7.10 а, б.

Іонне опромінення може призводити до перебудови ґратки. Якщо опромінювати метал з ОЦК-ґраткою, можливий перехід до більш щільно-упакованих ґраток – ГЦК або ГЩУ. Спостерігались також переходи ГЦК→ГЩУ, ГЩУ→ГЦК. Іонним опроміненням можна отримати гексагональні залізо і нікель, гранецентровані кобальт, титан, ванадій, чого не вда-

ється досягти при нормальних тисках і температурах іншими методами. Отримані таким способом кристали є метастабільними, а їх нагрівання до 400-500 °С приводить до відновлення вихідної структури.



а б

Рисунок 7.10 – Особливості заміщення випадкового іона з енергією E_1 і масою m_1, при зіткненні:
а – частина діаграми γ-E, яка вказує області, де можливе заміщення при зіткненні (заштрихована область);
б – крива залежності імовірності P заміщення при зіткненні і виміряної частини N різних іонів, якими заміщені атоми міді, від Z_1 – порядкового номера частинки, що рухається

Для деяких комбінацій іон-метал при імплантації великих кількостей домішок (5-10 %) утворюються некристалічні сплави, для яких характерна аморфна, склоподібна структура. Прикладами таких систем є: W-Cu, Ta-Cu, B-Ni, P-Ni (першими вказані імплантовані іони). Такі метастабільні сплавиможуть бути досить стійкими. Оскільки при іонному бомбардуванні змінюється хімічний склад приповерхневого шару, відповідно змінюється і поверхневий натяг, а отже, і коефіцієнт тертя.

При іонному бомбардуванні коефіцієнт тертя може як зменшуватися, так і збільшуватися, що визначається типом іонів.

Суттєво підвищується (у 10-30 разів) зносостійкість сталі, алюмінію та інших матеріалів (табл.7.1).

Таблиця 7.1 – Зносостійкість матеріалів

Матеріал	Тип легуючих іонів	Енергія іонів, кеВ	Зносостійкість
Сталь SAE3135	N^+	180	Зростає на порядок
Сталь AISI52100	Ar^+, N^+, Fe^+, Ti^+, C^+	35; 55; 300	Зростає
Сталь 4140	N^+	40	Зростає в 3 рази
Корозієстійкі сталі 304, 416	N^+, N_2^+, C^+, Ti^+	60; 100	Зростає на 2 порядки
Сталь 17-4PH	N^+	—	Зростає в 100 разів
Ст2	C^+	100	Зростає
Сталь AISI9310	Ti^+, Mo^+, Ta^+	—	Зростає
Сталь 0,2 С	N^+	100	Зростає
Сталь GGr15	N^+	100	Зростає на порядок
Сталь SSL316	N^+	100	Зростає на 2 порядки
Титановий сплав ВТ1-0	C^+	100	Зростає в 3—5 разів
Ti-6Al-4V	N^+, C^+, Au^+, Pt^+	40; 100; 200	Зростає
Be	B^+	25—200	Зростає
Al	Cu^+	300	Зростає в 3 рази

Однак значне підвищення зносостійкості спостерігається лише при порівняно високих дозах опромінення (10^{16}-10^{17} $см^{-2}$).

4. Обробка плазмою

Суть методу полягає у термічних фазових і структурних перетвореннях, які здійснюються плазмовим струменем (дугою) при швидкому концентрованому нагріванні робочої поверхні деталі та відведенні тепла в матеріал виробу.

Існує кілька варіантів плазмового зміцнення: 1) зміцнення без оплавлення і з оплавленням поверхні деталі; 2) зміцнення із зазором між зонами термічного впливу (ЗТВ), без перекривання ЗТВ і з перекриванням ЗТВ; 3) хіміко-термічна плазмова обробка; 4) зміцнення в поєднанні з іншими способами об'ємної або поверхневої термічної обробки.

Плазмове зміцнення без оплавлення поверхні є найбільш поширеним для сталевих виробів, оскільки забезпечує зберігання якості (шорсткості) поверхні, яка досягнута внаслідок відповідної механічної обробки.

Розміри зміцненої зони та значення мікротвердості, які досягаються в її межах, залежать від характеристик джерела нагрівання і швидкості його переміщення відносно поверхні. На рис. 7.11 показаний типовий характер розподілу мікротвердості у зоні термічного впливу плазмового струменя.

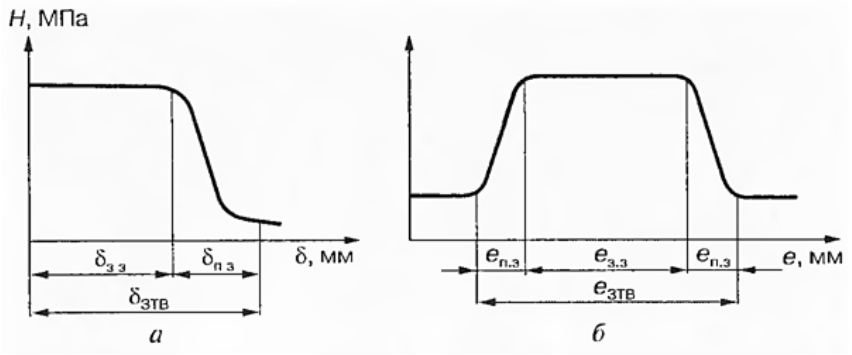


Рисунок 7.11 – Характер розподілу мікротвердості за глибиною (а) і шириною (б) ЗТВ плазмового струменя при обробці без оплавлення

Зона термічного впливу плазмового струменя має форму сегмента і за своєю будовою аналогічна ЗТВ електронного і лазерного променів (рис. 7.12).

При обробці без оплавлення вона складається із загартованої зони, в якій відбулися мартенситні перетворення, і примежової (перехідної до вихідного матеріалу). При обробці з оплавленням виникає додаткова поверхнева зона оплавлення (загартування із рідкого стану).

На рис.7.13 як приклад показана мікроструктура сталей 45, 9ХФ і 150ХНМ до і після плазмового зміцнення.

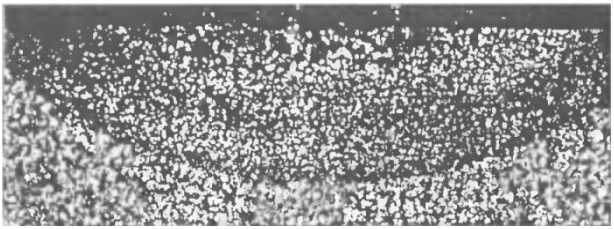


Рисунок 7.12 – Макроструктура ЗТВ плазмового струменя на сталі 45, х8

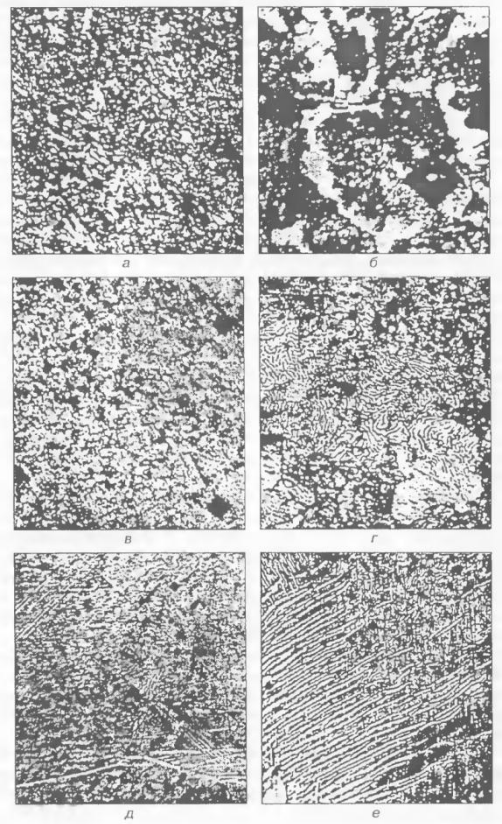


Рисунок 7.13 – Мікроструктура сталей:
а, б – сталь 45, відповідно загартована зона і вихідна структура; в, г – сталь 9ХФ, відповідно загартована зона і вихідна структура; д, е – стать 150ХНМ, відповідно загартована зона і вихідна структура

Як видно із рисунка, незалежно від складу сталі мікроструктура загартованої зони є досить однорідним високодисперсним мартенситом разом із залишковим аустенітом та карбідом. Формування такої структури зумовлене малими розмірами аустенітних зерен, які утворилися при високошвидкісному плазмовому нагріванні.

Властивості зміцнених матеріалів. Структура зміцненого шару, яка характеризується великою твердістю і високою дисперсністю, впливає на зміну експлуатаційних характеристик зміцнених матеріалів – стійкість до зношування, механічні властивості (міцність, пластичність, тріщиностійкість, витривалість), тепло- і корозієстійкість. Зі збільшенням мікротвердості стійкість до зношування підвищується у всіх типах сталі, але ступінь збільшення мікротвердості залежить від вихідної зносостійкості і морфологічних особливостей загартованої структури (рис.7.14).

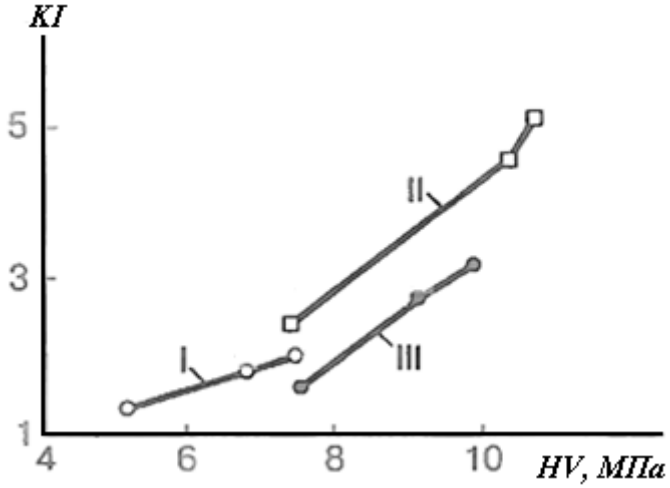


Рисунок 7.14 – Зміна коефіцієнта зносостійкості (*KI*) залежно від мікротвердості (*HV*) після зміцнення:
I – сталь 45, II – сталь 9ХФ; III – стать 150ХНМ

5. Гальванічні процеси

Гальванічні покриття отримують електроосадженням на поверхні основи, яка є провідником. Метал, на який наноситься покриття, занурюється в електропровідний розчин, що містить у собі солі цього металу. Катодом є основний метал (виріб), а анодом – стрижень або лист металу, який буде покриттям. Гальванічні покриття можуть бути з чистих металів, сумішей металів, сплавів або металів, які змішані з неметалевими речовинами, їх називають *композиційними електрохімічними покриттями* (КЕП) (рис. 7.15).

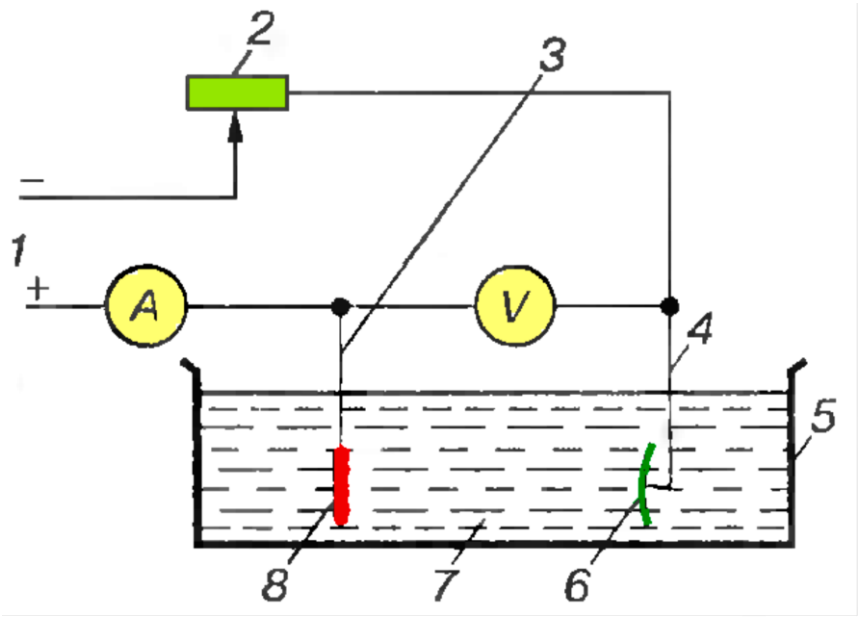


Рисунок 7.15 – Схема отримання металевого покриття методом електролітичного осадження:
1 – подавання постійного струму низької напруги;
2 – регулятор струму; *3* – анодна шина; *4* – катодна шина;
5 – посудина для електролітичного осадження; *6* – виріб, на який наноситься покриття; 7 – електроліт; *8* – анод

Електроосадження металів відбувається за законами Фарадея: маса металу, що утворюється при електролізі, прямо пропорційна кількості електрики, яка пропускається крізь розчин, і хімічному еквіваленту металу. Таким чином, середню товщину покриття, що осаджується, можна легко розрахувати, знаючи силу струму, час нанесення покриття, площу поверхні, яка обробляється, і хімічний еквівалент металу, який використовується для покриття.

Існує ще один додатковий фактор, який впливає на результати розрахунку: ККД катода під час електроосадження. Наприклад, для міді значення ККД приблизно дорівнює 100 %, якщо осадження здійснюється з кислотного розчину сульфату міді. Однак для іншого розчину чи металу ККД може значно зменшуватись і досягати, наприклад, для хрому 8-18%.

Крім того, товщина осаду залежить від відстані між анодом і катодом. Здатність розчину електроліту при нанесенні гальванічних покриттів долати цю залежність називається його розсіювальною здатністю. Наприклад, мідь – метал із доброю розсіювальною здатністю, хром – з поганою. На цю власти-вість може впливати також склад ванни і режим її роботи.

Перспективним напрямом розвитку технологій гальванічних покриттів є композиційні електро-хімічні покриття (КЕП), які складаються з металевої матриці і тонкодисперсних частинок іншої фази, розподілених в її об'ємі. Розмір таких частинок становить 0,01-50 мкм, об'ємна частка – 1-50 % (рис. 7.16).

Як дисперсну фазу використовують порошки окремих елементів, але найчастіше застосовують хімічні сполуки на органічній чи неорганічній основі – безкисневі тугоплавкі сполуки, оксиди, полімери та ін.

Тонкодисперсні частинки в необхідній кількості вводять в електрохімічні ванни, які в процесі електролізу осаджуються на катоді і зарощуються іонами металів, що виділяються на ньому (рис.7.16).

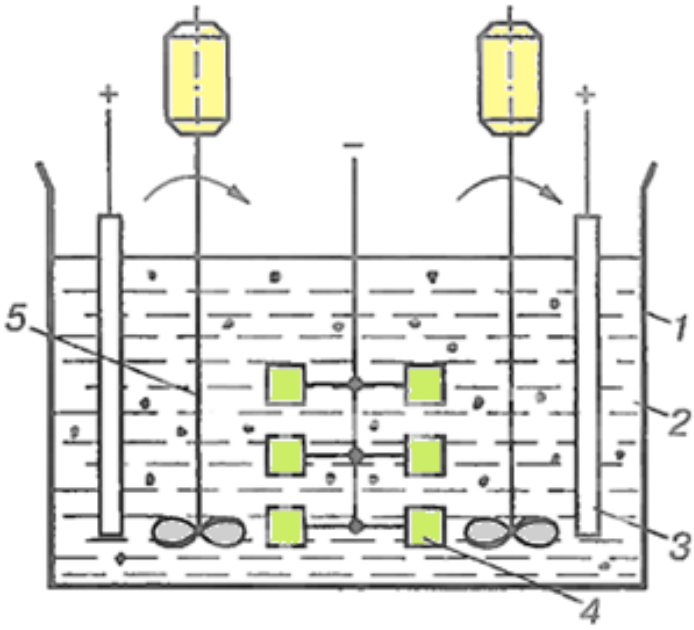


Рисунок 7.16 – Схема отримання композиційних електрохімічних покриттів:
1 – ванна; *2* – електроліт із неметалевими включеннями;
3 – анод; *4* – виріб; *5* – мішалка

Залежно від властивостей і кількості дисперсної фази КЕП можуть мати високі твердість і зносостійкість, жароміцність, жаро- і корозійну стійкість, анти- і фрикційні властивості та інші необхідні експлуатаційні характеристики (рис. 7.17).

Композиційні комбіновані електролітичні покриття поділяються на одношарові (рис. 7.17 а) і багатошарові (рис. 7.17 *б, в*).

За характерними ознаками і призначенням КЕП поділяють на:

– моно– і поліметалеві;

– моно – і полікомпозиційні;
– тонко – і товстошарові;
– моно – і поліфункціопальні.

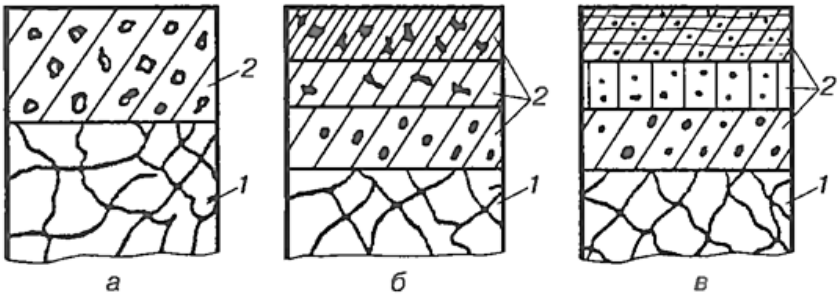


Рисунок 7.17 – Композиційне комбіноване
електролітичне покриття:
а – одношарове покриття; *б, в* – багатошарове покриття;
1 – матеріал основи; *2* – композиційне покриття

КЕП отримують із суспензій у вигляді електропровідних рідких розчинів із додаванням високодисперсних твердих частинок чи з емульсій, які утворюються при введенні в електроліти гідрофобних рідин або середовищ, які утворюють піни.

Електроліти можуть бути слобкокислими, слабколужними або близькими до нейтрального (тобто значення pH коливається в діапазоні 6,5-7,5) середовища. Однією з основних умов забезпечення можливості застосування дисперсних частинок є їх індиферентність, нечутливість до електроліту, а також відсутність на їх поверхні шкідливих домішок.

З метою перевірки придатності частинок до співосадження з металом їх кип'ятять у відповідному електроліті протягом 0,5-1,0 год. Якщо після такої операції електроліт зберігає свою активність і дає якісне покриття, то частинки вважаються чистими і можуть бути застосовані в процесі осадження КЕП.

Механізм утворення КЕП визначається двома основними

факторами: складом і властивостями електроліту-суспензії (ЕС) та умовами електролізу. До таких параметрів належать: для ЕС – склад електроліту, значення pH середовища, температура, концентрація дисперсних частинок в об'ємі ЕС, і форма; для умов електролізу – вид електричного струму (постійний, нестаціонарний – реверсивний, імпульсний, асиметричний), його густина, спосіб перемішування ЕС та ін.

За певних умов електролізу можливе отримання покриттів, що містять у собі частинки від мінімального розміру до частинок, розмір яких близький до товщини осаду.

Зарощування великих частинок із низькою електропровідністю спочатку відбувається в основі, а потім поширюється далі (рис.7.18 а, б). Зарощування великих частинок з високою електропровідністю відбувається по всьому їх периметру (рис7.18. в, г).

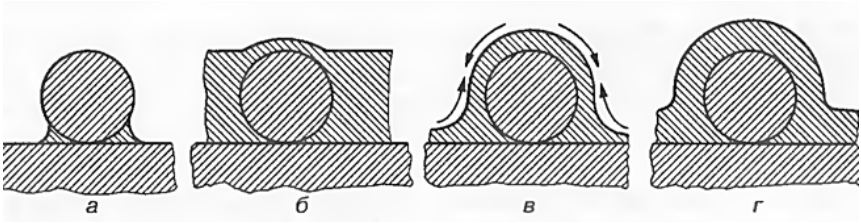


Рисунок 7.18 – Схема зарощування частинок з низькою (а, б) та високою (в, г) електропровідністю

По товщині матриці частинки розміщуються нерівномірно: найбільша їх кількість осаджується ближче до основного металу в місцях з високою густиною силових ліній струму. Збільшення розміру частинок супроводжується зменшенням їх кількості в осаді.

Структура і властивості покриттів. При КЕП електролітичні осади без включень і з включеннями дрібнодисперсних частинок мають чотири характерні типи структур (рис. 7.19).

1. У структурі є видовжені (7.19, а), інколи перехрещені

тріщини як сліди релаксації внутрішніх напружень.

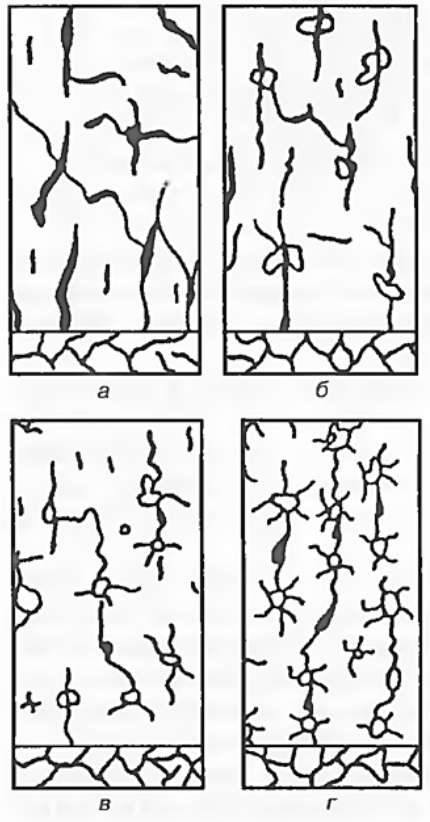


Рисунок 7.19 – Моделі структури КЕП, отриманих з електролітів без включень (а) і з введенням в їх склад частинок різної міцності (б-г)

2. За наявності в осаді дрібнодисперсних частинок з міцністю, меншою, ніж міцність матриці, релаксація внутрішніх напружень відбувається внаслідок утворення тріщин (7.19, б).

3. При значеннях міцності матриці, близьких до значень міцності частинок, можливі два випадки: 1) частинки не є перешкодою для тріщин; 2) частинки є пере-

шкодою для утворення тріщин у матриці (7.19, в).

4. Велика міцність дрібнодисперсних включень порівняно з міцністю матеріалу матриці зумовлює релаксацію напружень між близькоприлеглими включеннями (7.19, г). Крім того, навколо включень утворюється значна кількість мікротріщин розмірами на кілька порядків меншими, ніж у першому випадку. При цьому захисна здатність покриття поліпшується.

Властивості КЕП визначаються переважно фізико-хімічними і механічними властивостями металевої матриці в КЕП. Загалом властивості КЕП залежать як від співвідношення компонентів (матриці і дисперсних включень, їх характеристик), так і від розподілу в об'ємі покриття, умов осадження і наступної (за потреби) обробки – термічної, лазерної, дифузійного легування.

Для отримання відповідних властивостей покриття рекомендовані такі метали матриць КЕП:

– твердість і зносостійкість: Fe, Ni, Co, Cr;

– жаростійкість: Cr, Ni, Co;

– захист від корозії: Zn, Cd, Sn, Cu, Ag, Cr, Ni, Au, Pt;

– відновлення розмірів: Fe, Cr, Ni, Cu;

– антифрикційність: Fe, Ni, Cr, Cu, Pb, Sn;

– надання поверхні притиральних властивостей: Cu, Sn, Cd, Ag.

Дисперсні матеріали, які поліпшують властивості КЕП:

– твердість і зносостійкість: Al_20_3, $Si0_2$, $Ti0_2$, WC, TiC, SiC, B_4C, TiB_2, CrB_2, алмаз, B, Si, C;

– зносостійкість при сухому терті і підвищених температурах: SiC, B4C, BN, TiB_2, CrB_2;

– термостійкість: оксиди, карбіди, нітриди;

– самозмащення: графіт;

– теплопровідність: політетрафторетен;

– ерозійна стійкість: оксиди, карбіди.

Розмір частинок вибирають залежно від товщини КЕП і чистоти (шпаруватості) поверхні катода за формулою:

$$d = l = \frac{\delta}{n} \qquad (7.3)$$

де d (чи l) – діаметр (чи довжина) частинки; δ – товщина покриття; n – кількість частинок.

КЕП для більшості електроосаджених матеріалів характеризуються надзвичайно значним зчепленням включень із матеріалом матриці. Це пояснюється положеннями теорії пластичної деформації і абразивного руйнування твердих тіл з урахуванням особливостей формування структури електролітичних осадів.

Відповідно до цього навколо дрібнодисперсних частинок можлива поява зворотних мікропластичних деформацій, які спричинюють зміцнення осаду і відповідно поліпшення фізико-механічних властивостей КЕП.

У формуванні механічних властивостей КЕП значну роль відіграють дефекти дислокаційного типу. Під час переміщення дислокацій при стиканні з частинками вони огинають ці перешкоди, залишаючи після себе замкнені петлі.

Збільшення кількості частинок в осаді та зменшення відстані між ними спричинюють підвищення опірності переміщенню, оскільки зростає кількість бар'єрів, які мають подолати дислокації. Це викликає збільшення кількості дислокаційних петель, їх накопичення навколо твердих включень, що зумовлює додаткове активне напруження і зміцнення матриці.

6. Хімічне осадження

Закономірності осадження. При газофазному осадженні покриття утворюються внаслідок перебігу хімічних реакцій поблизу поверхні, на поверхні чи в приповерхневому шарі основи. Вихідними продуктами є газоподібні галогеніди, карбоніли чи металоорганічні сполуки, при розкладанні чи взаємодії яких з іншими газоподібними складовими сумішей (воднем, аміаком, вуглеводнями, оксидом вуглецю та ін.) можуть утворюватись і осаджуватись на оброблюваній поверхні потрібні матеріали (рис. 7.20).

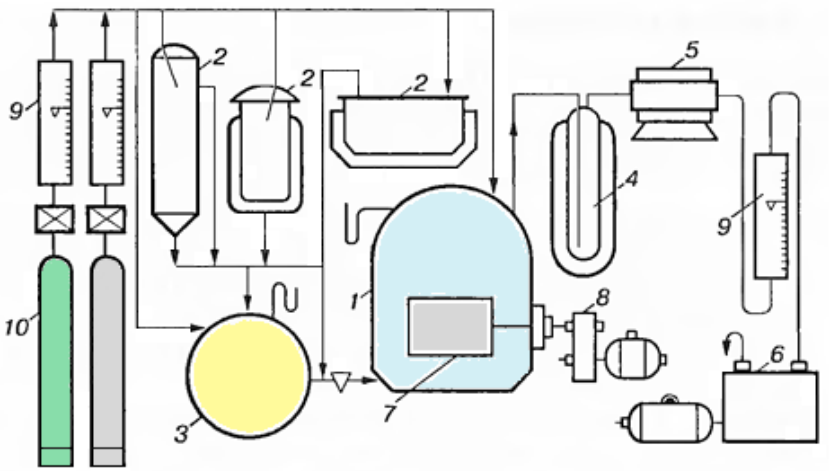


Рисунок 7.20 – Універсальна схема установки для газофазного осадження покриттів:
1 – реактор; 2 – резервуари з рідкими і кристалічними карбонілами; 3 – змішувач газів; 4 – морозильний уловлювач; 5 – піч дорозкладання; 6 – вакуумний насос; 7 – основа; 8 –- система обертання основи; 9 – ротаметри; 10 – балони з воднем і азотом

При термічному розкладанні основу нагрівають до температури розкладання газоподібних робочих сполук з осадженням їхніх нелетких компонентів на поверхні основи. Процес здійснюється у вакуумі $1 \cdot 10^{-1}$ Па, а також у нейтральному чи іншому підібраному середовищі газів-носіїв. Осадження простих речовин відбувається за реакціями:

$$W(CO)_6 \rightarrow W + 6CO$$

$$ZrI_4 \rightarrow Zr + 2I_2$$

$$B_2H_6 \rightarrow 2B + 3H_2$$

$$SiH_2 \rightarrow Si + 2H_2$$

оксидів:

$$Si(OC_2H_5)_4 \rightarrow SiO_2 + 4C_2H_4 + 2H_2O$$

$$2Al(OC_2H_5)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 6C_2H_4 + 3H_2O$$

боридів:

$$2Ti(BH_4)_3 \rightarrow 2TiB_2 + B_2H_6 + 9H_2$$

Температури розкладання для різних робочих сполук коливаються у межах від 300 до 2300°С і вище.

Леткі сполуки *відновлюються* воднем, аміаком та іншими речовинами, які містять у собі водень, а також парами металів. Осадження простих речовин відбувається за реакціями:

$$SiCl_4 + 2H_2 \rightarrow Si + 4HCl$$

$$WF_6 + 3H_2 \rightarrow 2W + 6HF$$

$$2BCl_3 + 3H_2 \rightarrow 2B + 6HCl$$

$$MeГ + 1/2H_2 \rightarrow Me + HГ$$

Пари металів (*K, Na, Mg, Zn, Cd*) осаджуються аналогічно, наприклад

$$SiCl_4 + 2Zn \rightarrow Si + 2ZnCl_2$$

Гідроліз газоподібних галогенідів водяною парою (H_20) чи парою H_2 + $C0_2$ використовується для отримання покриттів оксидів.

$$SiCl4 + 2H2O \rightarrow SiO2 + 4HCl$$

$$2AlCl3 + 3H2O \rightarrow Al2O3 + 6HCl$$

$$SiCl4 + 2H2 + 2CO2 \rightarrow 4HCl + 2CO$$

Високотемпературне пряме окиснення киснем газоподібних галогенідів чи металоорганічних безкисневих сполук використовується для отримання покриттів з оксидів:

$$2AlCl_3 + 1{,}5O_2 \rightarrow Al_2O_3 + 3Cl_2$$

$$TiCl_4 + O_2 \rightarrow TiO_2 + 2Cl_2$$

Аналогічно осаджується більшість інших елементів (*Fe, Ni, Be, Al, Cr, Ti, Hf, Th, V, Nb, Mo, Ta*) та їхніх боридів, нітридів, карбідів і оксидів.

Газофазне нанесення покриттів умовно можна подати як послідовність елементарних процесів:

1) хімічне випаровування, пов'язане з отриманням металовмісних сполук;

2) перенесення газоподібної металовмісної речовини;

3) взаємодія газоподібної металовмісної речовини з поверхнею основи;

4) формування покриття

Структура і властивості газофазних покриттів. Структура газофазних покриттів може бути трьох типів, які є наслідком отримання покриттів при певному температурному режимі (низько-, середньо- і високотемпературному) (рис. 7.21). Інтервал кожного з режимів залежить від природи осаджених матеріалів і в більшості випадків відповідає приблизно 0,1; 0,2; 0,3 температури їх плавлення.

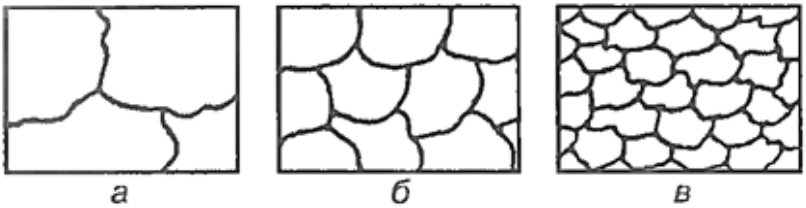


Рисунок 7.21 – Морфологія поверхні газофазних покриттів, отриманих при низькотемпературному (а), середньотемпературному (*б*) і високотемпературному (*в*) режимах

Поверхня покриттів, отриманих у низькотемпературній ділянці, цілком складається з великих сфероїдів. У середньотемпературній ділянці сфероїди другого типу з розмірами в 5-10 разів меншими. А у високотемпературній ділянці поверхня складається з малих кристалів, розміри яких у 10-15 разів менші, ніж розміри сфероїдів другого типу.

Внутрішня будова покриттів, одержаних у низько-, середньо- і високотемпературних ділянках, має також три типи структури (рис. 7.22).

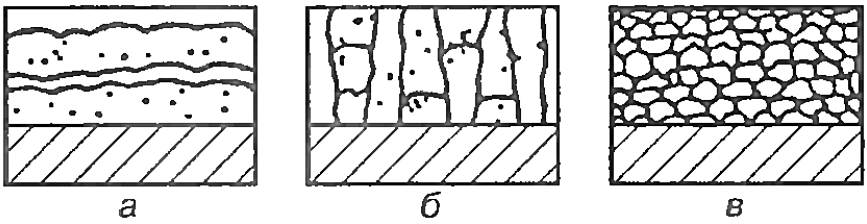


Рисунок 7.22 – Внутрішня будова покриттів, отриманих в низько-температурній (а), середньотемпературній *(б)* і високотемпературній *(в)* ділянках

Внутрішня структура покриттів, отриманих у низькотемпературній ділянці, має горизонтально-шаровий характер будови. Покриття складаються лише з поперечних шарів з темними включеннями. Домішки концентруються переважно по межах зерен (7.22, а).

Другий тип структури утворюється за середнього інтервалу температур і складається з характерних вертикально-стовпчастих утворів, іноді – з горизонтальними примежовими шарами (7.22, *б*). У високотемпературній ділянці утворюються покриття з дрібнокристалічною структурою (7.22, *в*).

Залежність швидкості наростання газофазних покриттів від темпера-тури основи характеризується кривою з максимумом (рис.7.23).

Початкову ділянку визначають кінетичні фактори реакції термічного розкладання. Максимум швидкості зростання покриття досягається за умови рівності потоків - металовмісної речовини до основи і продуктів розпаду від неї. Вона сприяє утворенню стовпчастих кристалів.

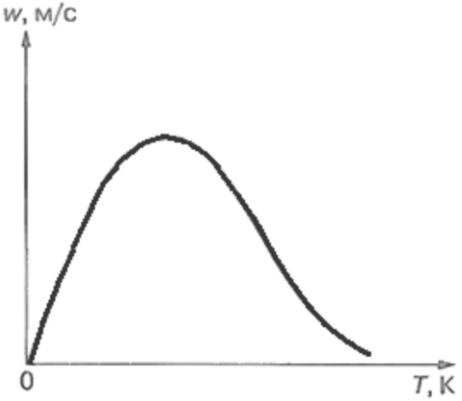


Рисунок 7.23 – Залежність швидкості наростання газофазного покриття від температури

Кінцеву ділянку визначає процес розкладання частини металовмісної сполуки, який збільшується при високих температурах реакційного газу.

Властивості газофазних покриттів оцінюються насамперед отриманням на основному металі поверхневого шару за умови найекономнішого легування.

7. Дифузійне насичення

Закономірності дифузійного насичення. Механізм дифузії є основою утворення дифузійних покриттів. Його схему можна розглянути на прикладі утворення покриттів із парогазової фази (рис. 7.24).

Із загальної кількості частинок N_0 речовини А, які досягають поверхні тіла В за одиницю часу, одна частина Np ревипаровується (відбивається), друга $N_к$ – конденсується і залишається в чистому вигляді на поверхні третя, $N_д$ – поглинається тілом В. Поглинання відбувається внаслідок як дифузії А в В, так і зворотної дифузії – В в А.

Швидкість зворотного процесу іноді може на два-три порядки перевищувати швидкість прямого процесу.

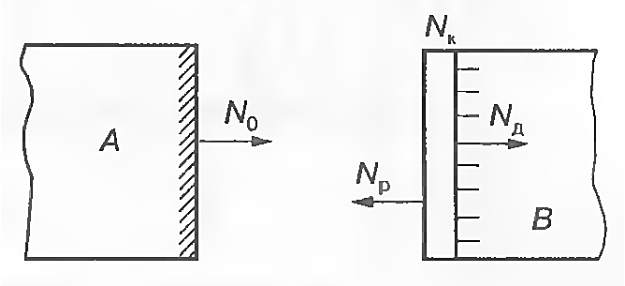


Рисунок 7.24 – Схема утворення покриттів із парогазової фази

Результуючу всіх процесів можна записати у вигляді рівняння:

$$N_0 - N_p \rightarrow N_к + N_д \qquad (7.4)$$

Від швидкості кожного з цих потоків залежать товщина і характер покриття, яке утворюється (нашароване, дифузійне, комбіноване) (рис. 7.25).

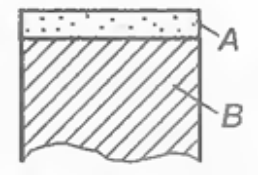


Рисунок 7.25 – Схема утворення нашарованого покриття

Із загальної кількості частинок N_0 речовини А, які досягають поверхні тіла В за одиницю часу, одна частина $N_р$ ревипаровується (відбивається), друга $N_к$ – конденсується і залишається в чистому вигляді на поверхні, третя $N_д$ – поглинається тілом В. Поглинання відбувається внаслідок як дифузії А в В, так і зворотної дифузії – В в А.

Якщо речовина А конденсується (осаджується) на холодній поверхні тіла В, і дифузія практично відсутня

(Nд=0), то утворюється нашароване покриття з чітко вираженою межею поділу з основою (рис.7.25).

Якщо поверхня тіла В достатньо нагріта та активна і дифузійний потік дорівнює потоку речовини (7.5), яка конденсується, або випереджує його, то утворюється типове дифузійне покриття (рис.7.26).

$$N_0 - N_\text{р} = N_\text{д} \tag{7.5}$$

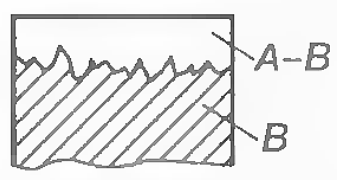


Рисунок 7.26 – Схема утворення дифузійного покриття

Якщо поверхня тіла В недостатньо нагріта і дифузійний потік відстає від потоку речовини, яка конденсується (7.6), то утворюється покриття комбінованого типу (рис. 7.27), де верхній шар складається з чистої речовини А, а нижній – із різного поєднання речовин А і В.

$$N_0 - N_\text{р} > N_\text{д} \tag{7.6}$$

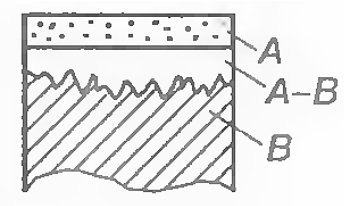


Рисунок 7.27 – Схема утворення комбінованого покриття

Таким чином, для отримання дифузійних покриттів необхідно, щоб основа добре розчиняла матеріал покриття, який

наноситься, і температура основи була достатньою для інтенсивного проходження дифузійних процесів.

У практиці дифузійного насичення розраховують ефективний коефіцієнт дифузії, як правило, для багатокомпонентного сплаву. При цьому використовують феноменологічне рівняння Фіка. Згідно з першим законом Фіка, потік елемента в часі крізь одиницю площі поверхні можна подати так (7.7):

$$\frac{dm}{dt} = -D\frac{\partial C}{\partial x} \tag{7.7}$$

де dt/dt – кількість елемента dt, що продифундував за час dt через одиницю площі; D – коефіцієнт дифузії; $\partial C/\partial x$ – градієнт концентрації в напрямку дифузії; x – координата в напрямку потоку.

Зміна концентрації в часі в певній точці по глибині дифузійного шару описується за другим законом Фіка (7.8):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) \tag{7.8}$$

де $\partial C/\partial t$ – швидкість зміни концентрації в часі на певній площі дифузійної зони, перпендикулярної до потоку.

Структура і властивості. В процесі дифузійного насичення при триманні покриттів важливо знати характер утворення і росту шарів, а також кінетичні параметри, які характеризують зміну концентрації елемента насичення за глибиною покриття в часі. Схема формування двокомпонентного покриття з фазовим переходом представлена на рис. 7.28.

Можливість створення дифузійних покриттів визначається насамперед різницею діаметрів атомів металу основи.

Наприклад, при дифузії в залізо елементів з великим діаметром атомів така різниця не повинна перевищувати 15-16 %, інакше напруження, які виникають у кристалічній гратці заліза, будуть перевищувати границю її пружної стійкості. Гратка стає нестійкою і виключає можливість дифузійного проникнення таких великих атомів у гратку заліза. Крім цьо-

го, елемент, який наноситься, має розчинятися в металі основи при кімнатній і підвищеній температурах.

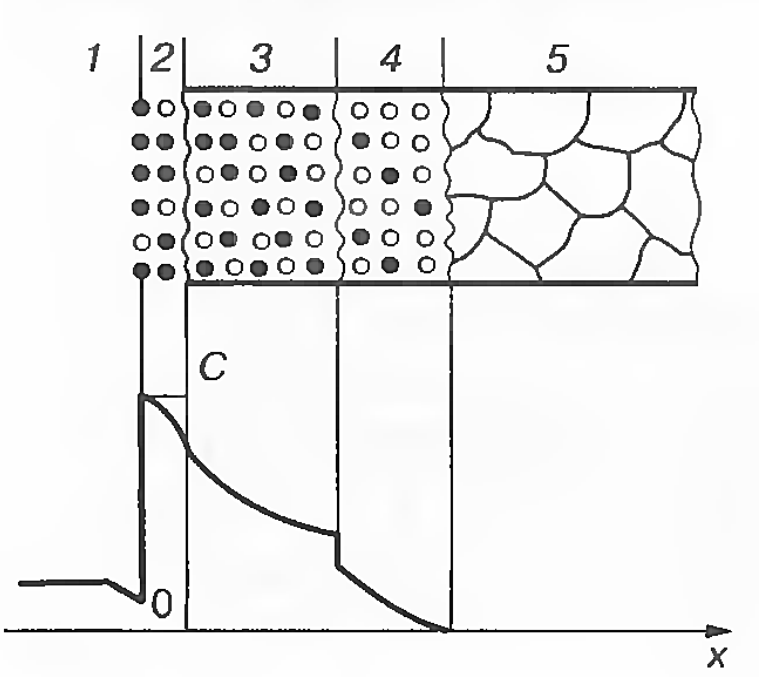


Рисунок 7.28 – Схема формування двокомпонентного покриття з фазовим переходом:
1 – насичене середовище; *2* – адсорбований шар;
3 – з'єднання; *4* – твердий розчин; 5 – основний метал

Для підвищення зносостійкості використовують різні способи насичення, які поділяють на дві групи: насичення хімічними елементами (однокомпонентні, двокомпонентні і багатокомпонентні покриття); насичення хімічними сполуками (карбідами, нітридами, оксидами) (рис. 7.29).

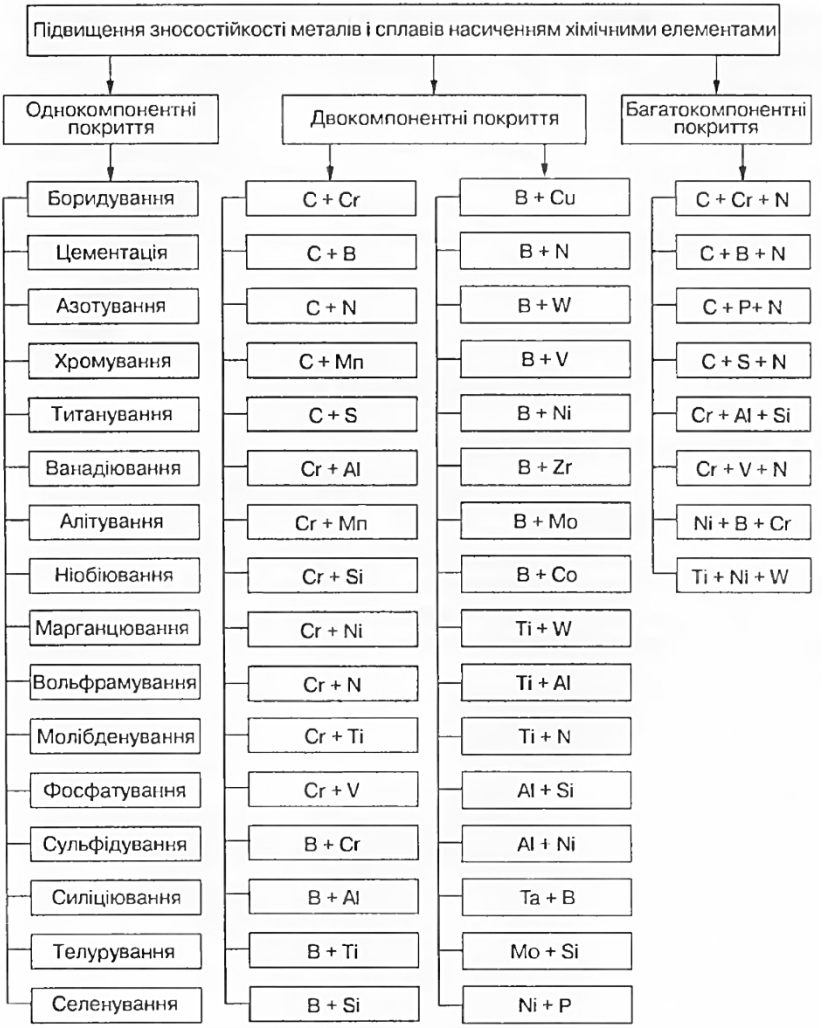


Рисунок 7.29 – Схема видів покриттів чорних металів і сплавів насиченням хімічними елементами

Контрольні питання

1. У чому полягає фізична суть лазерного випромінювання?

2. Тип легуючого елемента впливає на твердість легованого шару?

3. У чому полягає суть лазерного легування матеріалів?

4. У чому полягає суть модифікування поверхні електронним променем?

5. Які основні схеми електронно-променевого модифікування поверхні?

6. У чому полягає суть іонної імплантації?

7. Якої величини вакуум застосовується для іонного легування?

8. Як змінюється при іонному бомбардуванні коефіцієнт тертя?

9. У чому полягає фізична суть плазмового зміцнення?

10. Які основні технологічні варіанти плазмового зміцнення?

11. Які основні закономірності структурних перетворень при плазмовому зміцненні?

12. Яка схема отримання металевого покриття методом електролітичного осадження?

13. На які типи за характерними ознаками і призначенням поділяють КЕП?

14. Якими можуть бути електроліти?

15. Які характерні типи структур мають при КЕП електролітичні осади без включень і з включеннями дрібнодисперсних частинок?

16. Який механізм утворення покриття при газофазному осадженні?

17. Скількох типів буває структура газофазних покриттів?

18. Яка схема утворення покриттів із парогазової фази?

19. Яким законом описується зміна концентрації в часі в певній точці по глибині дифузійного шару?

ЛЕКЦІЯ 8

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНІ ТА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

1. Якість покриття. 2. Методика визначення товщини відновлювальних покриттів, які забезпечують необхідний ресурс. 3. Вибір технології відновлювання деталей. 4. Перспективи застосування наноструктурованих матеріалів у машинобудуванні.

1. Якість покриття

Типовий технологічний процес відновлення (зміцнення) деталей нанесенням покриттів включає наступні операції: підготовка напилюваної поверхні, нанесення підшару (при необхідності), напилення покриття, обробка покрит-тя. Кожна технологічна операція характеризується певною кількістю факторів, які роблять вплив на властивості покриттів.

Якість покриття характеризується наступними властивостями: міцність зчеплення покриття з основою, міцністю напиленого шару, пористістю, рівномірною товщиною покриття, рівнем залишкових напружень, однорідністю структури та властивостей покриття, рис.8.1

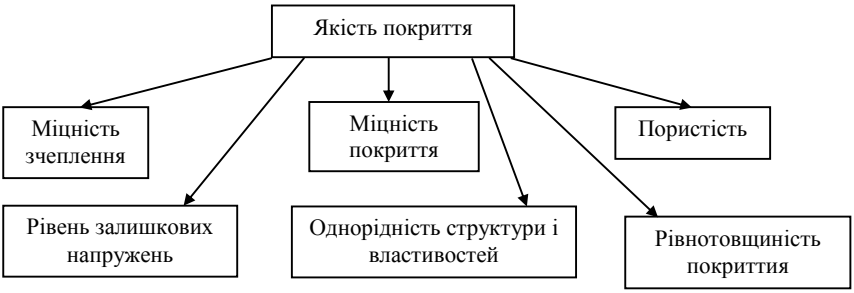


Рисунок 8.1 – Якість покриття

При нанесенні покриття всі фактори, що впливають на

його якість, можна розділити на дві групи.

До першої групи належать фактори, які визначають параметри процесу напилення: склад і витрата горючої газової суміші, властивості напилюваного матеріалу, конструкція пальника, швидкість і температура струменя горючої газової суміші, а також напилюваних частинок.

До другої групи відносяться: твердість і шорсткість напилюваної поверхні, дистанція напилення, температура основи, швидкість переміщення напилюваної поверхні по відношенню до пальника, умови охолодження покриття, додаткові дії на деталь і покриття.

На рис. 8.2 представлена структура загальних принципів управління якістю покриттів.

2. Методика визначення товщини відновлювальних покриттів, які забезпечують необхідний ресурс

1. По нормативно-технічній документації на транспортний засіб установлюємо величини граничного зазору ($З_г$) у сполученні й максимальний зазор по кресленнях ($З_к$).

2. Визначаємо граничну величину зношування сполучення взаємодіючих поверхонь деталей

$$\Delta И = З_г - З_к \tag{8.1}$$

3. Визначаємо товщину відновлювального покриття (T) з урахуванням співвідношення швидкостей зношування поверхонь деталей, які сполучаються

$$T = \frac{\Delta И}{k\left(\frac{V_c}{V_в}+1\right)} = \frac{З_г - З_к}{k\left(\frac{V_c}{V_в}+1\right)} \tag{8.2}$$

де Vc, Vв – швидкість зношування серійної й відновленої деталей; k – коефіцієнт, рівний: 1 – при нанесенні покриття на одну сторону; 2 – при нанесенні покриття на протилежні сторони деталі й циліндричні поверхні.

Після визначення товщини відновлювального покриття (формула 8.2) розробляємо ремонтне креслення (рис. 8.3) де-

талі або її елементу (рис. 8.4) на основі моделі відновлюваного контуру.

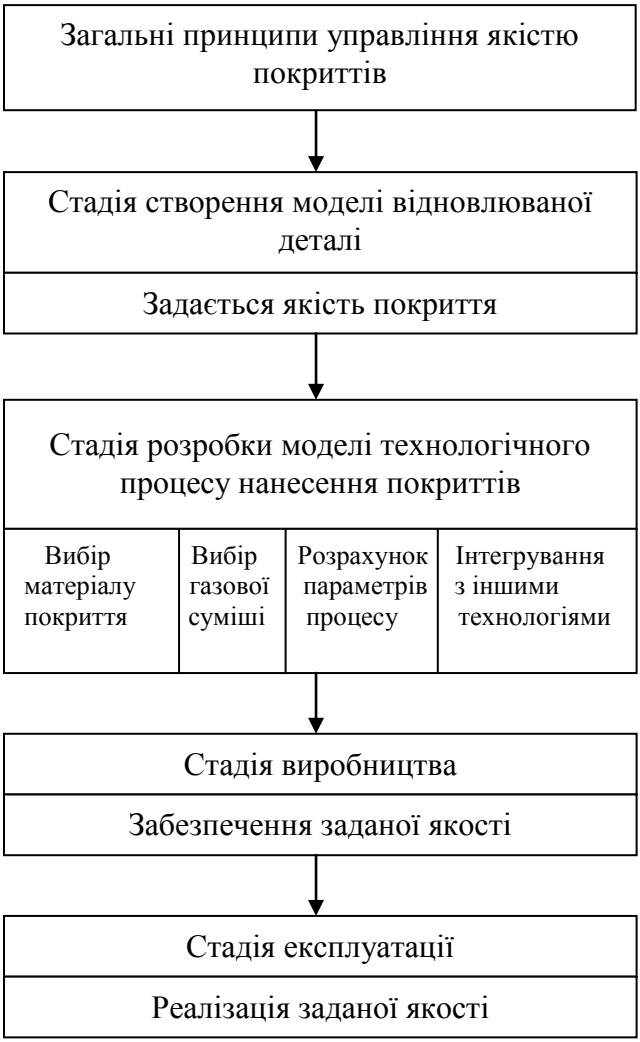


Рисунок 8.2 – Структура загальних принципів управління якістю покриттів

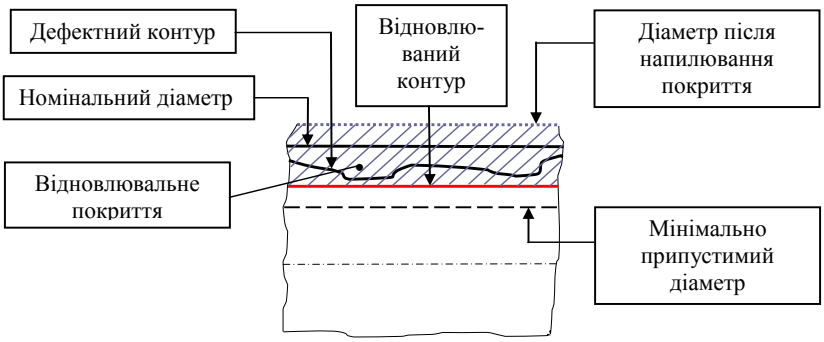


Рисунок 8.3 – Модель утворення відновлюваного контуру елементу деталі

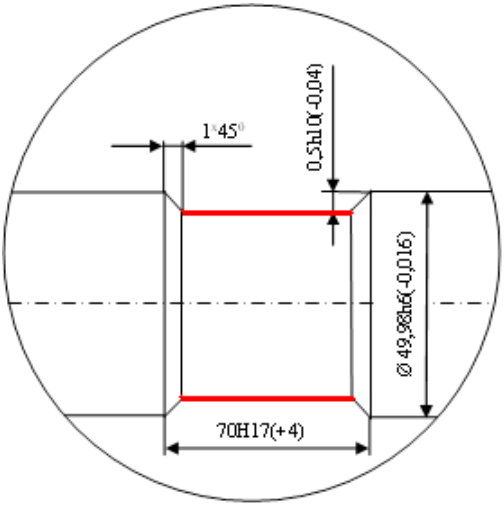


Рисунок 8.4 – Ремонтне креслення елементу деталі, яка відновлюється

3. Вибір технології відновлювання деталей

Вибір технології відновлювання деталей пропонується здійснювати з використанням критеріїв економічної доцільності відновлювання, технологічного і комплексного техніко-економічного, який враховує швидкість зношування і питомі витрати по напилюванню покриття (рис. 8.5).

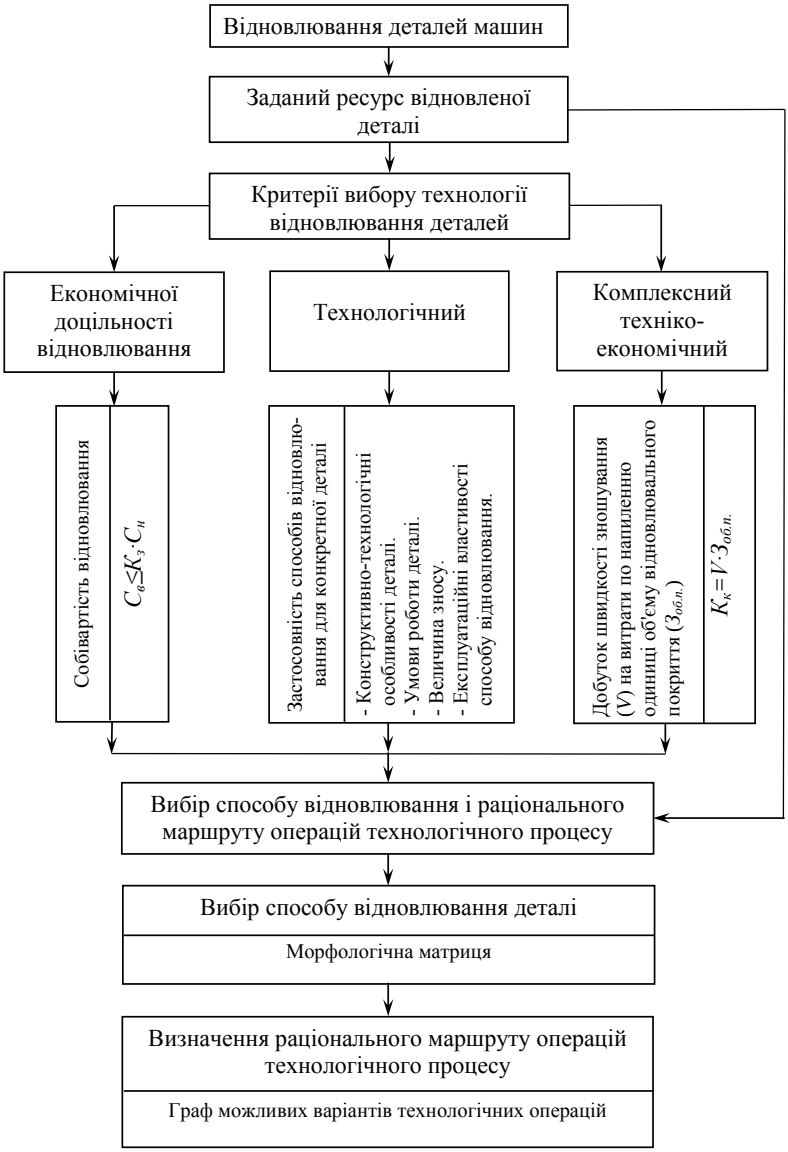


Рисунок 8.5 – Вибір способу і визначення раціонального маршруту технології відновлювання деталей машин по техніко-економічних критеріях

Для забезпечення економічної доцільності відновлювання деталей необхідно, щоб собівартість їх відновлювання $C_в$ не перевищувала добутку собівартості виготовлення нових $C_н$, на коефіцієнт зносостійкості, тобто повинна виконуватися умова:

$$C_{\text{в}} \leq K_{\text{з}} C_{\text{н}} \tag{8.3}$$

де, Vв и Vн – швидкість зношування відповідно відновленої і нової деталей у вагових або лінійних величинах, що приходиться на машино-годину або кілометр пробігу.

Технологічний критерій дозволяє визначити застосовність способів відновлювання до конкретних деталей. Вибір способів відновлювання залежить від конструктивно-технологічних особливостей і умов роботи деталей, величини їх зносу, експлуатаційних властивостей самих способів, що визначають довговічність відремонтованих деталей і вартості їх відновлювання.

Вибір оптимального способу відновлювання деталей з урахуванням їх ресурсу і економічної доцільності пропонується виробляти по комплексному техніко-економічному критерію (Кк), який є добутком швидкості зношування (V) на витрати по напиленню одиниці об'єму відновлювального покриття ($З_{об.п}$), оскільки мінімальний рівень витрат не завжди може відповідати необхідній зносостій-кості відновленої деталі (8.4):

$$K_к = V \cdot З_{об.п} \tag{8.4}$$

Формула (8.5) є багатопараметричною техніко-економічною моделлю, що дозволяє визначити витрати на отримання одиниці об'єму відновлювального покриття, що і є критерієм економічної ефективності технологічного процесу.

$$З_{об.пі} = \frac{1}{60 Q_i}\left(\frac{E_н K_i}{Ф_i} + C_{mi}\right) \tag{8.5}$$

Задачу вибору способу відновлювання деталі, який від-

повідає комплексному техніко-економічному критерію, і структури технологічного процесу вирішуємо на основі графового представлення можливих варіантів поєднання технологічних операцій, які забезпечують мінімальне значення цільової функції (табл. 8.1, рис. 8.6).

Таблиця 8.1 – Морфологічна матриця основних операцій технологічного процесу

№ етапу	Операція		Координати вершин
	Тип	Вид	
1	2	3	4
1	Визначення номенклатури способів відновлення деталей	1. Газополуменеве напилення. 2. Інтегроване газополум'яне напилення. 3. Плазмове напилення. 4. Детонаційне напилення. 5. Електродугова металізація. 6. Осталивание. 7. Вибродуговая наплавлення. 8. Наплавлення під шаром флюсу. 9. Хромування. 10. Наплавлення в вуглекислому газі. 11. Ручне наплавлення.	1–1 1–2 1–3 1–4 1–5 1–6 1–7 1–8 1–9 1–10 1–11
2	Вибір способів відновлення деталі за критерієм застосовності	1. Газополуменеве напилення. 2. Інтегроване газополуменеве напилення. 3. Плазмове напилення. 4. Детонаційне напилення. 5. Електродугова металізація. 7. Вибродуговая наплавлення. 10. Наплавлення в вуглекислому газі.	2–1 2–2 2–3 2–4 2–5 2–7 2–10
3	Вибір способу відновлення деталі з комплексного техніко-економічного критерію	2. Інтегроване газополуменеве напилення.	3–6

Продовження таблиці 8.1

1	2	3	4
4	Формування ремонтного контуру	1. Видалення поверхневого шару на технологічно максимальну або мінімально необхідну глибину. 2. Оброблення та видалення дефектів.	4–4 4–8
5	Підготовка відновлюваної поверхні	1. Струминно-абразивна. 2. Механічні способи: –нарізування рваною різьби; – фрезерування насічки, канавок клиноподібної форми; – нарізування кільцевих канавок; – щіткова обробка. 3. Хімічне травлення. 4. Електроіскрова обробка.	5–3 5–5 5–7 5–9
6	Формування відновного покриття (шару)	2. Інтегроване газополуменеве напилення.	6–6
7	Обробка покриття	1. Точіння. 2. Фрезерування. 3. Шліфування. 4. Полірування.	7–2 7–4 7–6 7–8

Безліч вершин графа відповідає безлічі складових операцій. Горизонтальні ряди вершин графа відповідають підмножини видів i = n операції j - го типу. Вибране підмножина вершин, взятих за однією з кожного ряду графа, визначає один з варіантів технологічного процесу.

Найкоротший шлях L_{i+1} між зазначеними вершинами визначається шляхом рішення рекурентного рівняння в кожній вершині графа.

$$L_{i+1} = \min(по\ всем\ i, по\ всем\ n)[L_{(i+1)-1} + L_i]$$

де i – кроки рішення; n – число видів технологічної операції j-го типу; L_i – витрати на виконання i-ї операції за умови, що відповідний ділянку графа обраний оптимальним чином;

L_{i+1} – витрати, віднесені до i+1 операціями; $L_{(i+1)-1}$ – витрати, віднесені до приєднання (i+1)-й операції процесу до і його операціями.

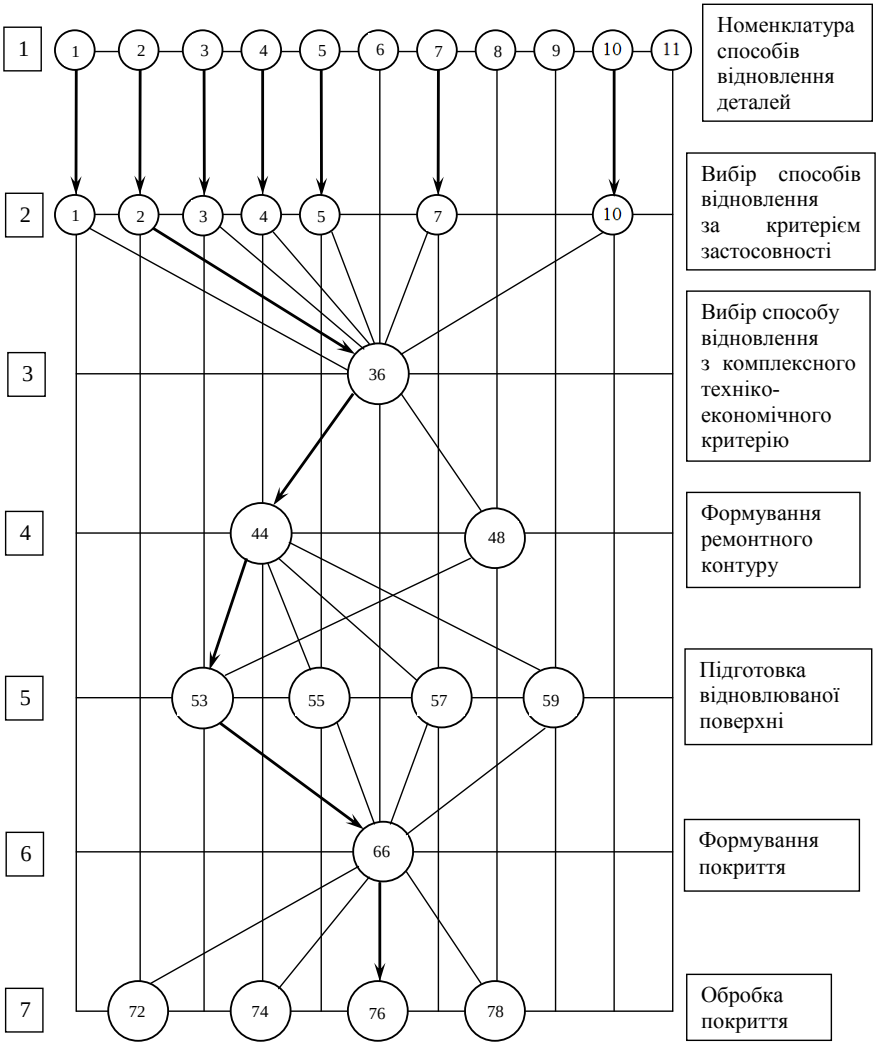


Рисунок 8.6 – Граф варіантів технологічного процесу відновлення деталей

Вибір оптимального способу відновлення (вершина 36) здійснюється в напрямку від 1-го ряду на 2-му за критерієм застосовності і від 2-го до 3-го ряду з комплексного техніко-економічного критерію. Довжину кожного ребра графа розглядаємо як витрати на виконання наступної операції. Оптимізація завдання полягає в пошуку найкоротшого шляху з вершини 36 в одну з вершин нижнього ряду 7 графа і відповідно підмножина вершин на цьому шляху визначає оптимальний склад операцій технологічного процесу. Значення цільової функції проставляється у верхній вершині графа 36.

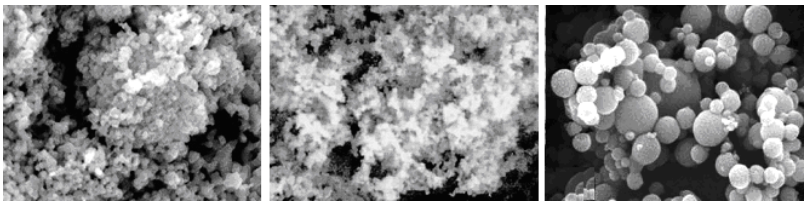
4. Перспективи застосування наноструктурованих матеріалів у машинобудуванні

Одним з пріоритетних напрямів розвитку науково-технічного прогресу у світі є нанотехнології. Істотний ефект очікується від впровадження технологічних процесів нанесення зносо-, корозійно-, жаростійких покриттів на деталі машин. Поліпшення відповідних якісних показників може бути досягнуто двома способами: введенням нанорозмірних добавок у процесі здійснення технологічного процесу зміцнення і за рахунок відповідних технологічних параметрів виготовлення заготовок або деталей.

Наноматеріали – це матеріали, що містять структурні елементи (кристаліти, волокна, шари, пори), геометричні розміри яких хоча б в одному напрямку не перевищують нанотехнологічного кордону – 100 нм (від 1 до 100 нм), які мають якісно інші в порівнянні з традиційними матеріалами фізичні, хімічні, механічні і біологічні властивості, функціональні та експлуатаційні характеристикі.

Верхня межа діапазону зумовлена тим, що істотні зміни властивостей матеріалів починаються при розмірах структурних елементів менше 100 нм.

Нанопорошки (НП) хімічних сполук (інша назва - ультрадисперсні) є тонкодисперсними наддрібнозернистими кристалічними або аморфними утвореннями, розмір яких не перевищує 100 нм.



а б в

Рисунок 8.7 – Нанопорошки:
а – карбид вольфрама (размер частиц ~ 30 нм); б – карбид титана (размер частиц ~ 10 нм); в – алюминий (размер частиц ~ 30…100 нм)

Кількість атомів у поверхневому шарі і в об'ємі НП стає сумірною, і через це вони набувають унікальних фізико-хімічних та механічних властивостей, які суттєво відрізняють їх від властивостей звичайних матеріалів.

Внаслідок того, що атоми на поверхні наночастинок мають сусідів лише з одного боку, їх рівновага порушується, і проходить структурна релаксація, яка призводить до зміщення міжатомної відстані в шарі товщиною 2-3 нм.

Таким чином, поверхневі шари частинок стають розтягнутими, а внутрішні – стиснутими.

У наночастинках реалізуються умови, при яких міжатомна відстань закономірно змінюється при переході від центра частинки до її поверхні. Наночастинки мають істотно спотворену кристалічну ґратку, що впливає на енергію активації більшості процесів, в яких вони беруть участь, змінюючи їх послідовність і звичний хід.

Малі кристалічні або аморфні частинки, з яких складаються нанопорошки, займають проміжну позицію між кластерами і однорідними матеріалами. Для частинок такого розмірного діапазону характерне різке (до 300 К) зниження температури плавлення, зменшення в 1,4 раза коефіцієнта лінійного розширення, зниження концентрації вакансій відносно макроскопічних розмірів.

Поява нанорозмірних компонентів у складі композицій-

них покриттів стабілізує структуру матриці, перешкоджає руху дислокацій, а сама наявність фази з високими фізико-механічними властивостями призводить до покращення інтегральних функціональних характеристик у цілому.

Підвищення властивостей наноструктурованого металу при використанні замість звичайного дозволяє:

1. Знизити витрату металу за рахунок полегшення маси виробу в зв'язку з високими фізико-механічними властивостями наноматеріалів.

2. Знизити витрати в процесі експлуатації більш легких виробів.

3. Знизити витрати на обробку, наприклад в результаті поліпшення штампуемости.

4. Підвищити надійність і ресурс виробів.

5. Підвищити стійкість інструменту.

Застосування наноструктурованих матеріалів забезпечує інноваційне переозброєння промисловості, в тому числі машинобудування. Ресурс виробів різного призначення, виготовлених за новою технологією, може збільшитися на 200-500%.

Контрольні питання

1. Якими властивостями характеризується якість покриття?

2. На скільки груп поділяються фактори, які впливають на якість покриття?

3. За якими критеріями проводиться вибір технології відновлення деталей?

4. Якими способами утворення наноструктурованих матеріалів можливо покращити якісні показники деталей?

5. Які матеріали належать до наноматеріалів?

6. Як впливають нанорозмірні компоненти на рух дислокацій?

7. Як впливає наноструктурування металу на ресурс виробів?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Інженерія поверхні: Підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наукова думка, 2007. – 559 с.

2. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.

3. Ремонт машин та обладнання: Підручник. / О.І. Сідашенко, О.А. Науменко, Т.С. Скобло, О.В. Тіхонов та ін.: За ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К.: Агроосвіта, 2014. –665 с.

4. Лузан С.А. Газотермическое напыление покрытий [Текст]: Монография. / С.А. Лузан– Харьков: Издательство "НТМТ", 2009. – 134 с.

5. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учебное пособие по курсу "Технология конструкций из металлокомпозитов" / А.Ф. Пузряков– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с.

6. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. – М: Машиностроение, 2008. – 320 с.

7. Сідашенко О.І. Українсько-англійський словник термінів технологічних систем ремонтного виробництва / О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонов, Н.М. Пільгуй та інші.: Навч. посібник – Харків: ХНТУСГ, 2016. – 412 с.

8. Сідашенко О.І. Технологія ремонту машин та обладнання. Курс лекцій / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Лузан С.О. та інші. Навч. посібник – Харків: ХНТУСГ, 2017. – 361 с.

9. Sidashenko O. Repair Technology of Machinery and Equipment. Lecture course. / Sidashenko O., Tikhonov O., Luzan S., and others. Textbook. – Kharkiv: KhNTUA, 2017. – 340 p.

10. Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення

деталей машин. Том 1 / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Скобло Т.С. та інші. Навчальний посібник. – Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. – 416 с.

11. Практикум з ремонту машин. Технологія ремонту машин, обладнання та їх складових частин. Том 2 / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Скобло Т.С. та інші. Навчальний посібник. – Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. – 491 с.

12. Основи трібології: Підручник / Антипенко А.М., Бєлас О.М., Войтов В.А. та ін. / За ред. Войтова В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342с.

13. Солових Е.К. Тенденции развития технологий поверхностного упрочнения в машиностроении. Монография. / Е.К. Солових– Кировоград: КОД, 2012. – 92 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Лузан Сергій Олексійович
Сідашенко Олександр Іванович

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

Курс лекцій

Комп'ютерна верстка: Маніло В.Л., Тіхонов О.В.
Підписано до друку 27.12. 2018р
Формат 70х108 1/16 Папір офсетний. Друк різографічний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 4,89
Обл. – друк. арк. 7,73
Наклад 100 прим. Зам № ___

ТОВ «Пром-Арт»
61023, м. Харків, вул. Весніна, 12
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія: ДК № 5748 від 06.11.2017.
тел. (057) 717-28-80
www.promart.in.ua
E-mail: promart_order@ukr.net

9 786177 634019