

**МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ
У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

2015

**Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет
ім. Олеся Гончара**

**МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЩЕННЯ
У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Ухвалено на вченій раді університету
як навчальний посібник*

**Дніпропетровськ
РВВ ДНУ
2015**

УДК 621.91
М 55

Автори: А.Г. Фесенко,
К.В. Бечке,
С.В. Манжеліївський,
М.М. Убизький,
О.В. Кулик,
В.В. Хуторний

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Р.П. Дідик
д-р техн. наук, проф. Є.О. Джур

М 55 Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.

Наведено методи локальної поверхневої обробки та відновлення виробів, застосовних у ракетно-космічній техніці. Викладено основні відомості щодо параметрів стану поверхневого шару деталей машин, механізму і видів спрацьовування деталей, пар тертя, робочих органів. Розглянуто конструктивні, експлуатаційні та технологічні методи підвищення зносостійкості деталей машин, основи їх хіміко-термічної обробки і т.д.

Для студентів фізико-технічного факультету ДНУ, які навчаються за напрямками «Інженерне матеріалознавство», «Авіа- та ракетобудування», «Двигуни та енергетичні установки літальних апаратів», «Машинобудування».

ПЕРЕДМОВА

Переважає більшість деталей вузлів механізмів і машин працюють у контакті з відповідними деталями, а саме різні пари тертя, вали, ролики, шестерні або інструменти, корпуси виробів, бойки тощо. Специфічні вимоги до цих деталей обумовлені особливостями експлуатації останніх. Як правило, під час виготовлення деталей з одного матеріалу неможливо дотриматися всіх вимог. Переважно це стосується вимог поєднання високих міцнісних характеристик матеріалу внутрішнього об'єму деталі та значної твердості того ж матеріалу на її поверхні, яка контактує з відповідною деталлю. Крім того, поверхня деталей за певних умов повинна мати високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя (антифрикційні деталі) або високий коефіцієнт тертя (деталі фрикціонів), або самозмінюваний у процесі наклепки поверхневий шар, а інколи вся поверхня повинна мати певну пористість і пітніти у процесі експлуатації. Тому в разі проектування вузлів і деталей машин спеціалістам-матеріалознавцям доводиться вирішувати досить складні проблеми щодо вибору існуючих або розробки нових технологій, застосування яких дозволить надати матеріалам сполучних деталей потрібних високих, а іноді навіть унікальних експлуатаційних характеристик.

У першому розділі посібника детально розглянуто параметри поверхневого шару деталей машин в аспекті механізму спрацьовування останніх, якому, у свою чергу, присвячений другий розділ. У матеріалі, поданому в наступних розділах, приділено увагу конструктивним, експлуатаційним та технологічним методам підвищення зносостійкості деталей машин за допомогою способів різної фізичної, хімічної та механічної природи.

У даному посібнику охоплено основний теоретичний матеріал, знання якого потрібне для розробки нових технологічних процесів, що забезпечують за параметром «зносостійкість» необхідну працездатність виробів.

Розділ 1

ПАРАМЕТРИ СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1. Параметри стану поверхневого шару

Поверхневий шар деталі – це шар, у якого структура, фазовий і хімічний склад відрізняються від основного матеріалу, з якого виготовлена деталь.

У поверхневому шарі можна виділити такі основні зони (рис. 1):

1 – зона адсорбованих із навколишнього середовища молекул і атомів органічних і неорганічних речовин. Товщина шару – $1 \dots 0,001$ мкм;

2 – зона продуктів хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем (зазвичай оксидів). Товщина шару – $10 \dots 1$ мкм;

3 – гранична зона із товщиною декількох міжатомних відстаней, яка має іншу кристалічну та електронну структуру;

4 – зона зі зміненими порівняно з основним металом структурою, фазовим і хімічним складом, який виникає під час виготовлення деталі та змінюється в процесі експлуатації;

5 – основний метал.

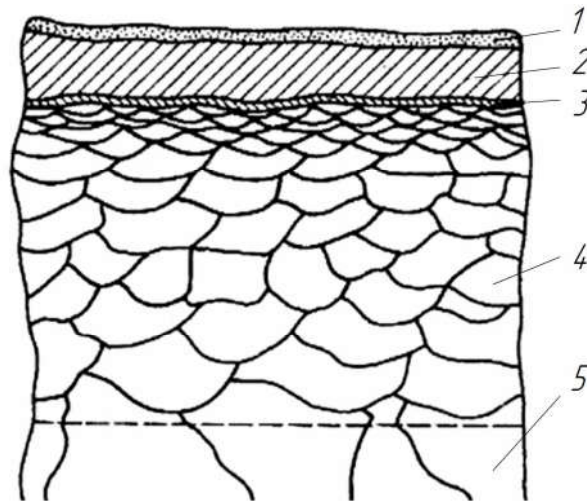


Рис. 1. Схема поверхневого шару деталі

Товщина і стан зазначених зон поверхневого шару можуть змінюватися залежно від складу матеріалу, методу обробки, умов експлуатації. Оцінюють даний стан за допомогою методів хімічного, фізичного та механічного аналізу. Різноманітність параметрів стану поверхневого складу й методів їх оцінки не дозволяє виділити єдиний параметр, який визначає якість поверхневого шару. Тому в науковій та інженерній практиці стан поверхневого шару оцінюють набором одиничних або комплексних параметрів.

До параметрів, які характеризують якість поверхневого шару, належать: геометричні параметри нерівностей поверхні, фізичний стан, хімічний склад, механічний стан.

Геометричні параметри нерівностей поверхні оцінюють параметрами шорсткості, регулярних мікрорельєфів, хвилястості.

Шорсткість поверхні – це сукупність нерівностей із відносно малими кроками. Приблизне відношення висоти нерівностей до кроку менше 50.

Хвилястість поверхні – це сукупність нерівностей, що мають крок більший, ніж базова довжина, яку застосовують для вимірювання шорсткості. Відношення висоти нерівностей до їх кроку більше 50 і менше 1000.

Хвилястість не стандартизована, тому для її оцінки застосовують параметри шорсткості.

Регулярні мікрорельєфи – це нерівності, які, на відміну від шорсткості та хвилястості, однакові за формою, розмірами і взаєморозташуванням.

Регулярний мікрорельєф отримують за допомогою різання або поверхневого пластичного деформування.

Фізичний стан поверхневого шару деталей у технології зміцнення найчастіше характеризують параметрами структури та фазового складу.

Структура – це характеристика металу, яка залежить від методів вивчення його будови. Визначають такі типи структур:

- кристалічна структура;
- субструктура;
- мікроструктура;
- макроструктура.

Кристалічна структура. Метали являють собою кристали з тривимірною періодичністю. Основою кристалічної структури є тривимірні ґрати, у просторі яких розташовуються атоми. Залежно від характеру розташування атомів у кристалічних ґратах структури чистих металів розподіляють на певні типи (рис. 2).

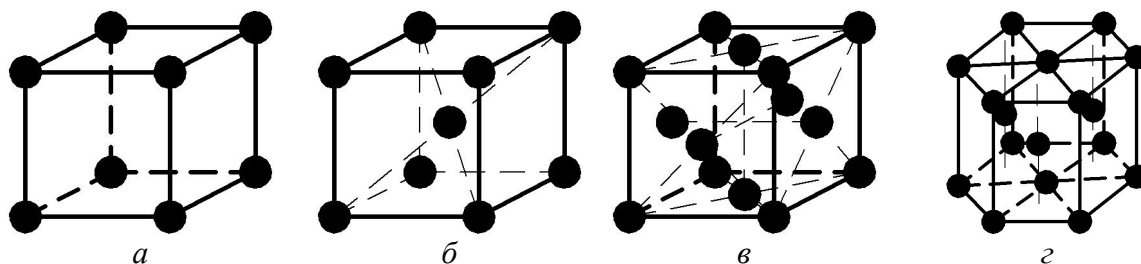


Рис. 2. Типи кристалічної структури:

a – проста кубічна; *б* – об'ємно центрована кубічна;
в – гранецентрована кубічна; *г* – гексагонально-щільноупакована

Субструктура. У реальному металі кристалічна структура має багато дефектів, які головним чином визначають його властивості. Сукупність дефектів ґрат і їх просторове розподілення у кристалі називають субструктурою. Тут кристали можуть утворювати більші фрагменти – кристаліти, блоки, зерна, фрагменти, полігони. Розмір субмікрозерна – $10^{-4} \dots 10^{-5}$ см.

1.2. Структурні дефекти в реальних кристалах

Відповідно до сучасних поглядів на будову металу суттєві відмінності теоретичної та фізичної міцності обумовлені наявністю структурних дефектів кристалів.

Структурні дефекти суттєво впливають на зміцнення і руйнування металу під час обробки.

Дані дефекти виникають у кристалах у результаті кристалізації металу, термічної обробки, пластичної деформації тощо. За геометричними ознаками їх поділяють на 4 групи: точкові, лінійні, поверхневі (плоскі), об'ємні.

Точкові дефекти за своїми розмірами порівнювані з розмірами атома. У чистих кристалах можливі два типи точкових дефектів (рис. 3, *a*): вакансії або міжвузлові атоми.

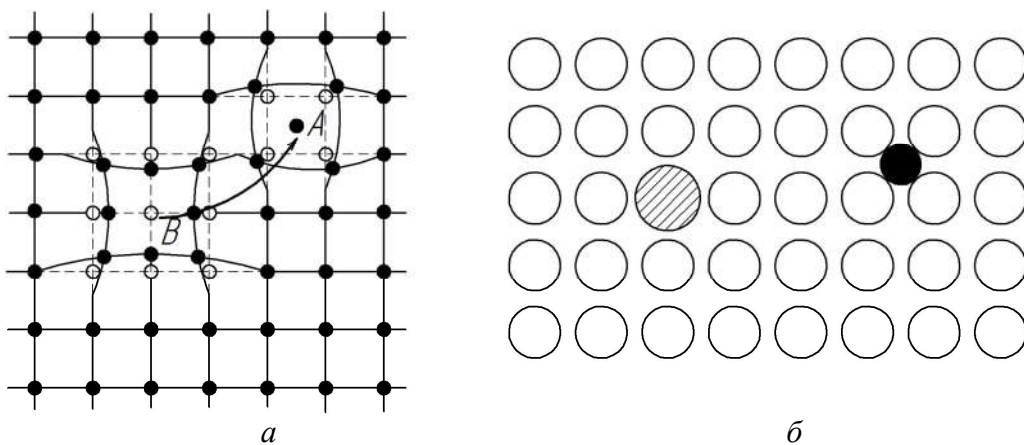


Рис. 3. Точкові дефекти в площині простих кубічних ґрат:

a – дислокований атом А та вакансії В;

б – домішкові атоми проникнення та заміщення

Вакансії утворюються в разі видалення атома з вузла ґрат, а міжвузловий атом – у випадку введення атома в міжвузловий простір.

Створення вакансій і міжвузлових атомів пов'язане з тим, що атоми в положенні рівноваги можуть під впливом привнесеної ззовні енергії виходити з цього положення, створюючи після себе у вузлі кристалічних ґрат порожнину (вакансію) та відповідно – міжвузловий атом. Більшість вакансій і міжвузлових атомів може бути збільшена різким охолодженням металу, пластичною деформацією, опромінюванням високоенергетичними променями, магнітним полем та ін. Наприклад, кількість точкових дефектів у кристалах під час пластичної деформації можна визначити за формулою

$$n/N = (10^{-5} \dots 10^{-6})\varepsilon,$$

де n – гранична кількість рівноважних точкових дефектів; N – загальна кількість атомів; ε – деформація, %.

Як точкові дефекти чистих металів можна також розглянути домішкові атоми заміщення та проникнення (рис. 3, *б*).

Усі точкові дефекти спричиняють локальні спотворення кристалічних

грат, збільшуючи таким чином енергію взаємодії атомів, яка залежить від розміру введених атомів і відстані між ними.

Лінійні дефекти кристалічних ґрат мають розміри, близькі до атомних, у двох вимірах і значну протяжність у третьому. До цього виду дефектів належать дислокації, найпростішими з яких є крайові та гвинтові.

Модель крайової дислокації на прикладі простого кубічного кристала (рис. 4) створюють шляхом введення в кристал зайвої площини атомів ABCD, яку називають екстраплощиною. Межа екстраплощини – лінія CD – це крайова дислокація. Екстраплощина діє як клин, спричиняючи значне викривлення кристалічних ґрат, особливо навколо атомів, розташованих на лінії дислокації CD.

Якщо екстраплощина розташована над дислокацією, то останню називають додатною та позначають знаком $\perp$. Дислокація від'ємна, якщо екстраплощина розташована під нею. У цьому випадку її позначають знаком ∇ .

Гвинтова дислокація (рис. 5) утворюється в разі зміщення частини кристала, розподіленого площиною ABCD, відносно іншої в напрямку AB. Лінія CD – це гвинтова дислокація. Залежно від напрямку руху вирізняють дислокації правого та лівого обертання.

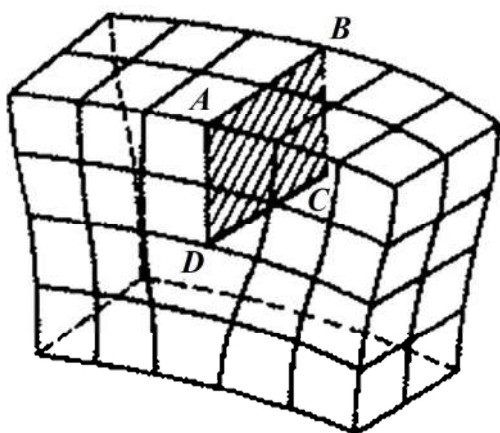


Рис. 4. Модель додатної крайової Дислокації

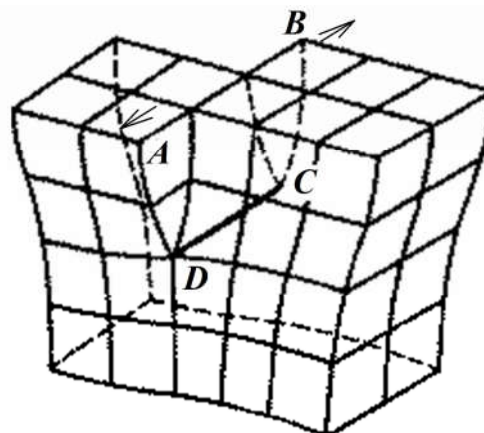


Рис. 5. Модель гвинтової дислокації

До лінійних відносять і змішані дислокації, які містять частини крайової та гвинтової дислокацій.

Поверхневі дислокації – це дефекти, які мають значну довжину у двох напрямках. До них належать межі між субзернами, зернами, міжфазні межі, дефекти упаковки кристалічних ґрат, скупчення дислокацій в одній площині та ін.

Об'ємні дефекти мають протяжність в усіх трьох вимірах. До них належить сукупність точкових, лінійних і поверхневих дефектів, які призводять до спотворення кристалічних ґрат за великих об'ємів кристала. Крім того, до об'ємних дефектів відносять наявність фаз, дисперсних виділень, різних вкраплень, а також нерівномірність розподілу напружень і деформацій у макрооб'ємах.

Наявність дефектів у кристалічних ґратах спричиняє їх спотворення. Мірилом спотворення ґрат є вектор Бюргерса (рис. 6), що характеризує енергію дислокації та сили, які діють на них.

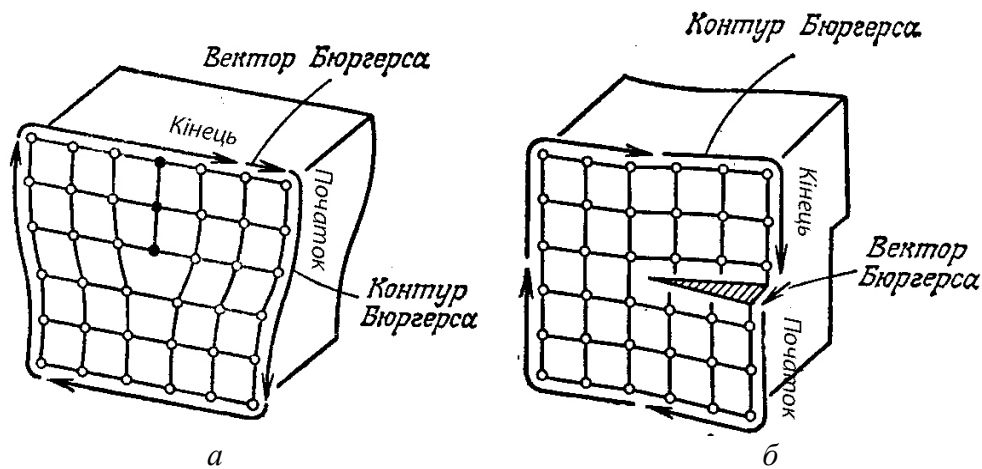


Рис. 6. Контур Бюргерса:

a – для крайової дислокації; *б* – для гвинтової дислокації

Вектор, який необхідно вводити в досконалий кристал для замкнення контуру Бюргерса (відрізок MQ на рис. 6, б), і є вектор Бюргерса.

Щільність дислокацій розраховують за формулою

$$\rho = L_{\Sigma} / V,$$

де ρ – щільність дислокацій, см^{-2} ; L_{Σ} – сумарна довжина усіх дислокаційних ліній, м; V – об'єм, м^3 .

1.3. Виникнення та розмноження дислокацій

Дислокації виникають під час кристалізації або охолодження кристалів після завершення рідкої фази.

У теорії дислокацій вивчають численні механізми виникнення останньої. Вони обумовлюють утворення локальних ділянок концентрації напружень на межі твердих і рідких фаз. Концентрація дислокацій залежить від термічних градієнтів, зміни складу та структури кристала, наявності домішок, вакансій, різних типів кристалів, їх утворення і розмноження на перших етапах кристалізації та ін.

У полікристалічних тілах (металах) кристали (зерна) відрізняються просторовою орієнтацією. Усередині зерен існують субзерна, у яких є блоки, дезорієнтовані відносно один одного на кут, менший 10° . Межі зерен і блоків – джерела зародження дислокацій.

Як бачимо зі схеми малокутової межі (рис. 7), ґрати блоків пружно сполучаються в усіх сферах, крім тих, у яких знаходяться дислокації. Відстань між дислокаціями на межі визначають таким чином:

$$D = b_0 / \alpha_3,$$

де b_0 – вектор Бюргерса; α_3 – кут дезорієнтування зерен.

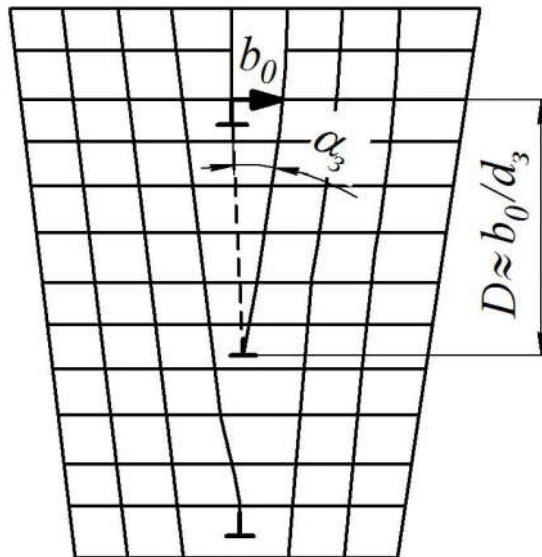


Рис. 7. Схема малокутової межі:

D – відстань між дислокаціями; b_0 – вектор Бюргерса; α_3 – кут дезорієнтування зерен

Дислокації призводять до виникнення дефектів упаковки, тобто порушення чергування шарів кристалічних ґрат.

Дислокації, які виникли під час кристалізації, можуть розмножуватися або зникати під час пластичної деформації, термообробки або інших видів енергетичного впливу. Одну з моделей множення дислокацій за пластичної деформації, запропоновану Франком і Рідом, подано нижче (рис. 8).

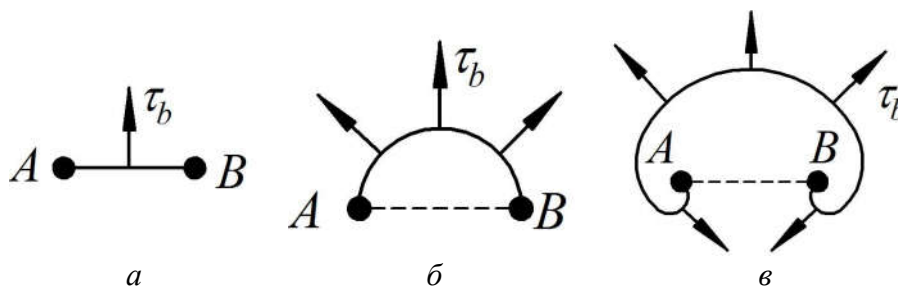
Відрізок дислокації $AB = L$ (рис. 8, а) закріплений на кінцях. На нього діє нормальна сила τ_b . Під дією зростаючого напруження лінійна дислокація поводить себе як пружна нитка – вигинається. З умови рівноваги напруження, що перешкоджає цьому згину, визначають за формулою

$$\tau = 0,5 Gb/R,$$

де G – модуль зсуву; b – вектор Бюргерса; R – радіус кривини.

Максимальне значення напруги $\tau_{\max}$ відповідає $R = L/2$ (рис. 8, б).

Збільшення довжини відбуватиметься за напружень, менших $\tau_{\max}$.



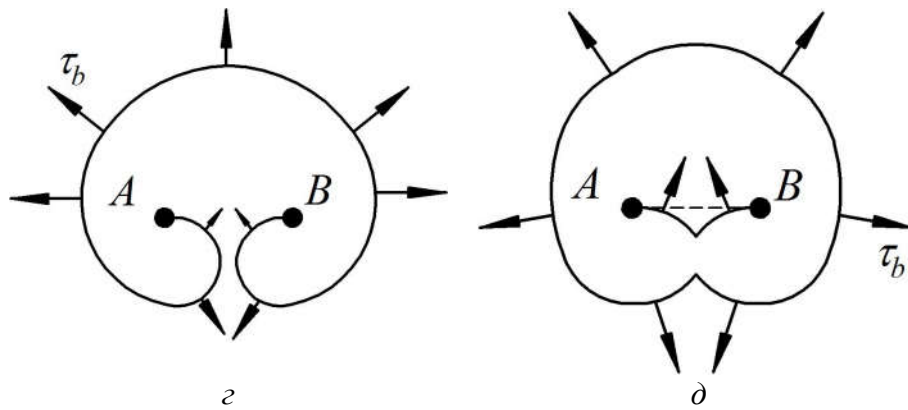


Рис. 8. Схема дії джерела Франка – Ріда

Подальший цикл розмноження дислокацій показано на рис. 8, в, г. Цикл завершується створенням замкненої петлі дислокації (рис. 8, д), а ділянка AB «готується» для генерації нової петлі. Пластична деформація та термічна обробка призводять до збільшення щільності дислокацій.

Щільність дислокацій:

- для монокристалу – $10^2 \dots 10^4 \text{ см}^{-2}$;
- відпаленого монокристалу – $10^4 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}$;
- відпаленого полікристалу – $10^7 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$;
- металу після холодного пластичного деформування – $10^9 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

1.4. Параметри фізичного, хімічного та механічного стану металу

Мікроструктура – це структура, яку визначають за допомогою металографічних мікроскопів. Проаналізувавши мікроструктуру, можна визначити наявність, кількість і форму структурних складників сплаву. Розмір субзерна: $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ см}$.

Макроструктура – це структура, яку можна побачити неозброєним оком або за невеликих збільшень. За допомогою макроаналізу можна визначити тріщини, неметалеві вкраплення, домішки тощо. Розмір зерна: $10^{-1} \dots 10^{-2} \text{ см}$.

Фізичний стан металу характеризують кількість та концентрація фаз, розподіл фаз по поверхневому шару, об'єм сплаву тощо. Дослідження фізичного стану здійснюють експериментальними методами фізики твердого тіла: дифракційними та мікроскопічними.

Хімічний склад характеризують елементний склад сплаву і фаз, концентрація елементів в об'ємі фаз, в об'ємі сплаву тощо. Дослідивши хімічний склад поверхневого шару, можна оцінити адсорбцію з навколишнього середовища молекул і атомів органічних і неорганічних речовин, дифузійні процеси, процеси окиснення, які відбуваються під час обробки металів.

Механічний стан металу визначають такі параметри:

- опір деформуванню: межа пружності, пропорційності, плинності, міцності, твердість тощо;
- пластичність: відносне подовження, звуження, ударна в'язкість та ін., які встановлюють спеціальними дослідженнями зразків. Наприклад, у процесі

пластичної деформації, що завжди супроводжує механічну обробку, усі характеристики механічного стану поверхневого шару змінюються: показники опору деформуванню збільшуються, а показники пластичності зменшуються. Це явище називають деформаційним зміцненням.

В інженерній практиці деформаційне зміцнення поверхневого шару визначають вимірюванням твердості або мікротвердості. Для цього твердість визначають на поверхні та всередині металу (за допомогою пошарового травлення). У результаті встановлюють товщину зміцненого шару h_H і ступінь деформаційного зміцнення δ_H :

$$\delta_H = (H_{обр.} - H_{вих.}) / H_{вих.},$$

де $H_{обр.}$ і $H_{вих.}$ – відповідно твердість (мікротвердість) металу після обробки та перед нею.

Товщину зміцненого шару також визначають за графіком (рис. 9).

Важлива характеристика стану поверхневого шару – залишкові напруження в деталі після обробки.

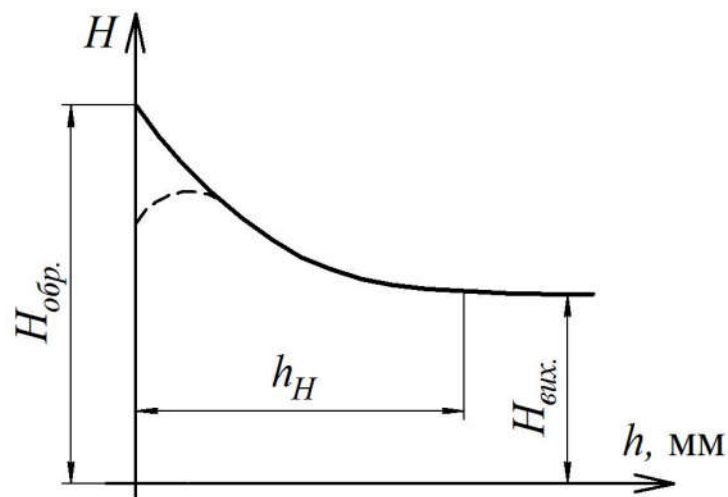


Рис. 9. Епюра розподілу твердості в поверхневому шарі після зміцнення:

h – глибина шару металу; H – твердість металу

Залежно від об'єму тіла, у якому розраховують залишкові напруження, їх умовно поділяють:

- на залишкові напруження першого роду, зрівноважені в макрооб'ємах тіла;
- залишкові напруження другого роду, зрівноважені в межах розміру зерен;
- залишкові напруження третього роду, зрівноважені в межах декількох міжатомних відстаней.

Залежно від характеру та інтенсивності фізико-механічних процесів, які відбуваються під час обробки, залишкові напруження можуть бути розтягальними і мати знак «+» або стискувальними і мати знак «-».

За умовою рівноваги сума проекцій усіх сил в об'ємі деталі повинна дорівнювати нулю. Тому в деталі є область зі стискувальними та розтягальними залишковими напруженнями.

В інженерній практиці залишкові напруження першого роду прийнято зображати у вигляді проекції на осі заданої системи координат. Наприклад, для тіла обертання застосовують поняття осьових σ_x^0 , обводових (тангенціальних) σ_τ^0 і радіальних σ_r^0 залишкових напружень.

Узагальнено можна сказати, що залишкові напруження першого роду є результат нерівномірних пластичних деформацій різних шарів деталі. Приклад – викривлення деталі в той чи інший бік.

Залишкові напруження суттєво впливають на міцність і довговічність деталей машин і конструкцій: залишкові стискувальні напруження (–), які виникають у поверхневому шарі, підвищують циклічну міцність деталей, оскільки вони розвантажують поверхневі шари від напруг, викликаних навантаженнями, а розтягальні залишкові напруження (+), навпаки, зменшують міцність деталей за рахунок підвищення напруженості поверхневого шару.

Контрольні запитання і завдання

1. Як за геометричними ознаками поділяють структурні дефекти?
2. Що називають поверхневою дислокацією?
3. Назвіть основні типи кристалічних структур.
4. Які дефекти відносять до точкових?
5. Як поділяють залишкові напруження?

Розділ 2

МЕХАНІЗМ СПРАЦЬОВУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ, ПАР ТЕРТЯ, РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА ЙОГО ОСНОВНІ ВИДИ

2.1. Основні поняття

Пара тертя – сукупність двох рухомих сполучних поверхонь деталей у реальних умовах експлуатації або випробувань. Пару тертя утворюють стичні поверхні деталей, які входять до машинного вузла.

Спрацьовування – зміна розмірів і форми деталі в результаті її експлуатації. Спрацьовування виражають в одиницях довжини, об'єму або маси.

Інтенсивність спрацьовування – відношення спрацьовування деталі до шляху тертя або об'єму виконаної роботи.

Швидкість спрацьовування – відношення спрацьовування деталі до часу, упродовж якого відбувалося спрацьовування.

Зносостійкість – величина, протилежна інтенсивності або швидкості спрацьовування.

Взаємодія поверхонь може бути механічна або молекулярна. Механічну взаємодію виражають у взаємному проникненні та зачепленні нерівностей поверхонь у сукупності з їх співударянням у випадку ковзання грубих поверхонь. Молекулярна взаємодія проявляється у вигляді адгезії та тужіння. Адгезія тільки обумовлює необхідність прикладання дотичної сили для відносного зсуву поверхонь, але й може призвести до виривання матеріалу. Тужавіння властиве тільки металевим поверхням і відрізняється від адгезії міцнішими зв'язками. Молекулярна взаємодія обов'язкова в разі руйнування мастильної плівки.

Зміни на поверхнях тертя через деформації, підвищення температури та хімічні дії навколишнього середовища

Зміни, спричинені деформацією, полягають у такому:

1. Багаторазові пружні деформації обумовлені недосконалістю структури матеріалу, призводять за певних умов до утомного викришування поверхонь кочення, а багаторазові пружні деформації мікронерівностей поверхонь ковзання розпушують структуру.

2. Пластичне деформування змінює структуру матеріалу поверхневого шару. Пластичне деформування твердих тіл включає чотири важливі елементарні процеси: ковзання по кристалографічних площинах (ковзання в окремих зернах полікристалічного тіла відбувається зазвичай за наявності декількох площин, кількість яких зростає із підвищенням напруження); двійникування кристалів; відхилення атомів від правильного розташування в ґратах і їх тепловий рух; руйнування структури.

Руйнування структури – це заключний етап пластичної деформації внаслідок збільшення силового впливу у випадку одноразового навантаження. Зміщення кристалічних зерен супроводжується частковим порушенням

зчеплення, у результаті чого в разі збільшення напруження або багаторазового його повторення відбувається послаблення, розпушення, а в подальшому і розрив структури.

3. Пластична деформація за температури, нижчої температури рекристалізації, приводить до наклепу поверхневого шару – його зміцнення. Проте в самій поверхні структура послаблена, мікротвердість знижена. Мікротвердість досягає максимуму на деякій глибині, надалі зменшуючись до вихідної.

4. У разі багаторазового навантаження матеріалу із дуже відмінними за твердістю структурними складниками спочатку відбувається інтенсивне спрацьовування м'якої основи. Унаслідок цього підвищується тиск на виступні тверді складники, що призводить до їх втиснення в м'яку основу, додаткового подрібнення й переміщення деяких із них під дією сил тертя. У результаті такого вибіркового спрацьовування поверхня збагачується твердими структурними складниками та набуває рядкової структури.

Вплив підвищення температур

1. Якщо за умовами експлуатації або в результаті тертя температура поверхневих шарів вища температури рекристалізації металу, то поверхневий шар не наклепується, а перебуває в стані підвищеної пластичності, розм'якшення – відбувається згладжування поверхні за рахунок розтікання всього металу або тільки одного складника сплаву.

2. Висока температура та пластична деформація сприяють дифузійним процесам; у результаті можливі збагачення поверхні деякими елементами (наприклад, поверхні сталі вуглецем), коагуляція окремих структурних складників, взаємне дифузійне розчинення матеріалів деталей пар тертя.

3. Під час інтенсивного локального підвищення температури (температурного спалаху) та подальшого різкого охолодження поверхні холодною масою металу на поверхні можуть утворюватися гартівні структури. Цьому сприяє високий тиск (від навантаження), який знижує температуру, за якої відбуваються структурні перетворення.

4. Пластична деформація, можливі високі температурні градієнти та структурні перетворення спричиняють напруження в матеріалі, які можуть впливати на його розпушення.

Хімічна дія середовища полягає в такому:

1. У повітряному середовищі на обдертих під час спрацьовування чистих металевих поверхнях у результаті дії газоподібного або наявного в мастилі кисню утворюються окисні плівки, які захищають поверхні від взаємного тужавіння та пов'язаного з ним глибинного виривання. Вони – важливий фактор не тільки під час тертя без мастильного матеріалу та граничного змащування, але й у разі наявності напіврідкого мастила. Дослідження у вакуумі, середовищі азоту, аргону та гелію у випадку тертя без мастильного матеріалу та за наявності граничного мастила, коли утворення окисних плівок неможливе (тільки за наявності кисню в мастилi), показали високу інтенсивність спрацьовування поверхонь тертя.

2. Металеві поверхні, які взаємодіють із хімічно активними присадками в мастилі, укриваються плівками хімічних сполук, роль яких аналогічна ролі окисних плівок. Плівки ефективно захищають поверхню від спрацьовування, якщо швидкість їх утворення перевищує швидкість спрацьовування.

3. Можливе насичення поверхні вуглецем у результаті розкладання мастильного матеріалу за високих температур.

4. Агресивна рідина та газові середовища прискорюють спрацьовування.

Руйнування поверхонь тертя, яке можливо виявити візуально або під мікроскопом, можна класифікувати як окремі елементарні процеси, поєднання остання залежить від матеріалів і умов тертя. Елементарні види руйнування поверхонь тертя такі.

Мікрорізання. У разі проникнення на достатню глибину тверда частинка абразиву або продукту спрацьовування може здійснити мікрорізання матеріалу з утворенням мікростружки. Мікрорізання під час тертя та спрацьовування відбувається не часто, оскільки глибина проникнення недостатня для різання за визначених навантажень.

Дряпання (пластичне видавлювання). Втиснута ділянка поверхні або частинка під час ковзання видавлює та підминає матеріал, залишаючи подряпину. Остання закінчується в місці виходу прониклого елемента із зони фактичного контакту під час подрібнення частинки, її впресування або винесення за межі області тертя. Повторне дряпання по одній трасі з однією й тією ж інтенсивністю в парах тертя трапляється рідко, частіше відбувається дряпання, за якого область пластичного видавлювання перекриває раніше створену подряпину. Поверхня тертя вкривається подряпинами, які майже паралельні шляху ковзання, а між подряпинами розташовується матеріал, що зазнав багаторазової пластичної деформації, перенаклепки, тобто вичерпав здатність пластично деформуватися. Під час навантаження в такій ділянці легко утворюються тріщини, зі збільшенням яких матеріал відокремлюється від основи.

Очевидно, що не тільки ковзні, але й перекочувальні частинки можуть залишити на поверхні подряпини. Проникла частинка, упираючись під час свого руху у твердий складник матеріалу, може відхилитися вбік, і тому напрямок подряпини на поверхні не проходить уздовж чіткого напрямку переміщення деталі.

Відшаровування. Матеріал під час пластичного руху може видавлюватися вбік від поверхні тертя та після вичерпання здатності до подальшого подовження відшаровуватися. У процесі руху матеріал «напливає» на окисні плівки та відділяється від основи. Якщо в разі лінійного та точкового контакту тіл напруга за глибиною шару більша, ніж опір утомлюваності матеріалу, то під час роботи утворюються тріщини, які призводять до лускоподібного відшаровування матеріалу. Таке явище має місце на поверхнях загартованих або цементованих деталей. Дефекти металу у вигляді шлакових укралень, вільного цементиту та значні розтягальні залишкові напруження спричиняють відшаровування.

Окрихчування – це поширений вид пошкодження робочих поверхонь деталей в умовах кочення. Для окрихчування характерна довільна форма вибоїнок із рваними краями. Можуть окрихчуватися: тверді структурні складники сплаву після спрацьовування м'якої основи останнього; частинки білого шару чавуну; острівці основної маси сірого чавуну, облямовані графітовими вкрапленнями; частинки антифрикційного металевго шару в разі утомних пошкоджень; тверді окисні плівки (на залізовуглецевих і алюмінієвих сплавах); частинки металізаційного покриття та ін.

Окрихчування спричиняють високі розтягальні залишкові напруження в поверхневому шарі після обробки, тріщини після цементації, гартування або старіння, а також значні термічні напруження, які виникають під час тертя або внаслідок незадовільного змащування.

Безпосередньо окрихчуванню передують утворення та розвиток тріщин, які обмежують поодинокі малі об'єми від решти матеріалу. Таким чином, тріщиноутворення – складова частина процесу окрихчування, а також відшаровування. Тріщиноутворення через термічні напруження може охопити значну площу та на певній стадії розвитку тріщин навіть слугувати бракувальною ознакою, тому його слід розглядати як особливий вид пошкодження поверхонь тертя.

Глибинне виривання виникає під час відносного руху зчеплених тіл, коли створені в результаті молекулярної взаємодії спаї міцніші одного або обох матеріалів. Руйнування відбувається в глибині одного з тіл. Поверхні руйнування в пластичних матеріалах – це виступні витягнуті за напрямком руху гребні та звужувані всередину матеріалу конуси. Прилеглі до місць виривів ділянки пластично деформуються більшою або меншою мірою. Вирваний матеріал залишається на сполучній поверхні. Це одна з причин перенесення матеріалу під час тертя. Може спостерігатися тужавіння окремих складників сплаву, решта складників потрапляють у змашувальний матеріал або «виходять» із зони тертя.

У процесі спрацьовування руйнування поверхонь може відбуватися в субмікроскопічних масштабах, коли разом із мастильним матеріалом або повітрям виносяться уламки кристалічних утворень. Продукти спрацьовування можуть мати розміри від мікрметра до декількох міліметрів.

Чисті поверхні в процесі створення окиснюються, самі продукти спрацювання в подальшому подрібнюються, злипаються, прилипають до сполучних поверхонь і упресовуються. Дані продукти беруть участь у процесі спрацьовування як проміжне середовище між поверхнями тертя. Взаємне проникнення, глибинне виривання, адгезія, заклинювання та спресовування продуктів спрацьовування обумовлюють перенесення матеріалу з однієї поверхні тертя на іншу.

Перенесення матеріалу з однієї поверхні на іншу властиве всім видам тертя, крім тертя за наявності рідинного мастила, та відбувається під час таких технологічних операцій, як різання, клепаання і складання болтових з'єднань: метал переноситься з пневматичного молотка на заклепки, із ключа на гайки, із

різця на метал. Перенесення матеріалу відбувається окремими частинками, середній розмір яких має визначену величину для певних умов тертя. Тертя без мастильного матеріалу порівняно з тертям під час граничного змащування може знизити перенесення у 20 000 разів і більше, головним чином за рахунок зменшення середнього розміру частинок. Перенесення матеріалу на металеву поверхню може спричиняти корозію металевої поверхні.

Перенесення матеріалу не характеризує спрацьовування поверхонь тертя. Перенесена частка може багаторазово переходити з однієї поверхні тертя на іншу та назад. Спрацьовування відбуватиметься в тому випадку, якщо перенесена частинка опиниться поза зоною тертя. Це пов'язано з процесами прямого та зворотного перенесень і залежить від кінцевого механізму відриву перенесеної частинки, зокрема, від її окиснення або від виникнення несприятливих напружень на межі розподілу між частинкою та підкладкою.

2.2. Фізичні основи руйнування металів

Руйнування металів і сплавів відбувається шляхом утворення та збільшення тріщин. Воно нараховує декілька етапів:

- зародження субмікротріщин (зародження тріщин);
- злиття субмікротріщин у мікроструктуру;
- злиття субмікротріщин у макроструктуру;
- зростання мікротріщини та поділ металу на складові частини.

Теорія дислокацій пояснює механізм зародження субмікротріщин, ґрунтуючись на декількох моделях (рис. 10 – 14).

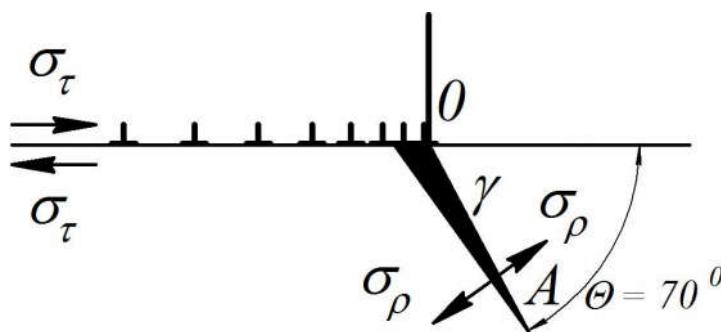


Рис. 10. Схема зародження субмікротріщин за моделлю Зінера, Мота та Стро

Згідно з вищевказаною моделлю перед різними перепонами (дислокаційні стінки, межі двійників, субзерен, зерен, міжфазні межі, побічні укріплення та ін.) виникає сильне скупчення дислокацій, а тому відбувається концентрація напружень, що призводить до утворення тріщин, причому під кутом $0 - 70^\circ$ до площини ковзання.

Модель Котрелла (рис. 11) пояснює утворення тріщин шляхом злиття із розкладаючими дислокаціями.

Модель розриву утворення тріщин шляхом дислокаційної стінки показано нижче (рис. 12).

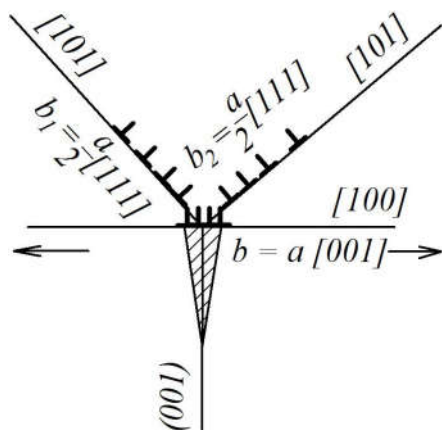


Рис.11. Схема зародження субмікротріщин за моделлю Котрелла

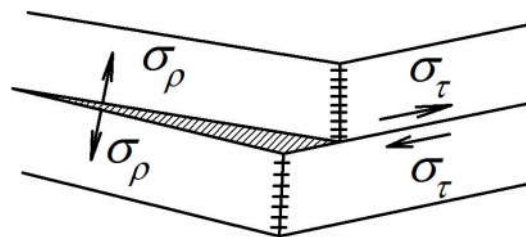


Рис. 12. Схема зародження субмікротріщин за моделлю розриву дислокаційної стінки

У разі наявності в кристалі малокутових меж із великим орієнтуванням можливе утворення мікротріщин за рахунок зсуву кристалів уздовж дислокаційної стінки. В основу цих механізмів покладено уявлення щодо концентрації напружень, створених дислокаціями. У випадку міжзеренної деформації можливе утворення тріщини на межах, які переміщуються відносно одна одної. Субмікротріщини мають розмір приблизно 10^{-1} мкм. Вони можуть об'єднуватися або взаємодіяти з вакансіями та скупченнями дислокацій, призводячи до виникнення мікротріщини порядку 1 мкм.

Можливе утворення тріщин від взаємодії двійників (рис. 13, 14).

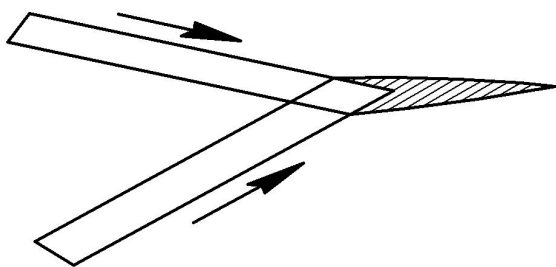


Рис. 13. Схема утворення тріщини під час зустрічі двох двійників

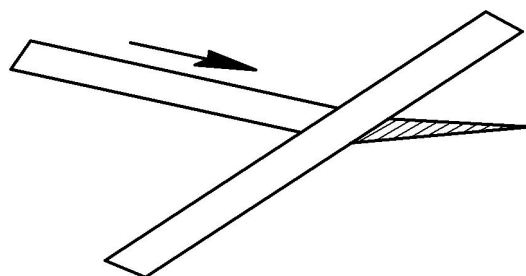


Рис. 14. Схема гальмування одного двійника іншим

Подальша поведінка тріщин залежить від того, за яким механізмом (крихким або в'язким) буде відбуватися їх зростання.

Крихке руйнування являє собою розрив середовища із незначною попередньою пластичною деформацією. Воно потребує мало енергії та поширюється з великою швидкістю за рахунок саморозвинутої тріщини перпендикулярно напрямку дії напруження розтягання. Поширення тріщини триває до тих пір, поки місцеві напруження, які виникають у фронті тріщини, не стануть за значенням нижчі межі міцності.

В'язке руйнування супроводжується значною пластичною деформацією та поширюється в напрямку найбільших дотичних напружень. Для в'язкого руйнування потрібні значні витрати енергії.

В'язке руйнування відбувається декількома етапами. На першому етапі в металі утворюються пори, які поєднуються одна з одною з утворенням тріщини. Другий етап – зростання тріщини. На третьому етапі відбувається відокремлення частин металу з площинами, розташованими під кутом, близько 45° до осі розтягання.

Крихке руйнування найчастіше відбувається за кристалографічними площинами всередині зерна. Таке руйнування називають транскристалітним або внутрішньозеренним. Проте за низьких температур і наявності на межах зерен дисперсних фаз і домішок метали та сплави можуть руйнуватися по межах зерен – так зване інкристалітне (міжзеренне) руйнування.

Крихке руйнування спостерігається в металах і сплавах з ОЦК-гратами та виявляється особливо за наявності домішок, які утворюють тверді розчини проникнення.

Одні й ті самі метали можуть руйнуватися і крихко, і в'язко залежно від умов, серед яких основними є швидкість деформації, температура та структурний стан.

Крихке руйнування виникає в разі низьких температур і різкого прикладання навантаження. В'язке руйнування пов'язане з високими температурами та малими швидкостями навантаження. Температура переходу від в'язкого до крихкого руйнування не постійна для даного металу. Вона залежить від чистоти металу, величини зерна, режимів термообробки.

2.3. Класифікація вузлів тертя

Щоб визначити умови спрацьовування деталей у вузлах тертя для обґрунтованого застосування зміцнювальної обробки і підвищення зносостійкості поверхонь потрібне застосування класифікації вузлів тертя (рис. 15), яка враховує вплив параметрів якості поверхневого шару, утвореного в процесі виготовлення деталей.



Рис. 15. Класифікація видів спрацьовування

2.4. Водневе спрацьовування

Водневе спрацьовування залежить від концентрації водню в поверхневих шарах тертьових деталей. Він виділяється з матеріалів пари тертя або з навколишнього середовища (мастильний матеріал, паливо, вода тощо) та прискорює спрацьовування. Водневе спрацьовування обумовлене процесами, що відбуваються в зоні тертя:

- інтенсивним виділенням водню під час тертя в результаті трибодеструкції матеріалів, які містять водень (утворюється джерело безперервного надходження водню в поверхневий шар сталі або чавуну);
- адсорбцією водню на поверхнях тертя;
- дифузією водню в деформований шар сталі, швидкість якої визначають градієнти температур і напружень, що створює ефект накопичення водню в процесі тертя;
- особливим видом руйнування поверхні, пов'язаного з одночасним розвитком великої кількості зародків тріщин по всій зоні деформування та ефектом накопичення водню.

Сутність водневого спрацьовування в тому, що під час тертя двох тіл максимальна температура створюється не на поверхні тіл, а на деякій глибині. Це створює умови, за яких водень під дією температури дифундує вглиб поверхні, там концентрується і викликає окрихчування поверхневих шарів, а отже, посилює спрацьовування.

Сфера виявлення водневого спрацьовування дуже поширена. Практично всі тертьові поверхні сталей і чавунних деталей містять підвищену кількість водню і, отже, зазнають підвищеного спрацьовування. Наявність у повітрі пари води створює сприятливі умови для водневого спрацьовування, яке може бути викликане не тільки воднем, що утворюється під час тертя, але й воднем, який може утворюватися в результаті різних технологічних процесів. Під час витоплювання чавуну в доменному процесі з вологи дуття виділяється водень, який і потрапляє в метал. Під час термічної обробки, наприклад, у результаті азотування (у разі дисоціації аміаку), водень, який виділяється, дифундує в сталь, що негативно впливає на міцність. Це явище називають водневим окрихчуванням. Існує декілька видів окрихчування, розподілених на дві групи:

- окрихчування першого роду, обумовлене джерелами, наявними у вихідному матеріалі за підвищеного вмісту водню;
- окрихчування другого роду, обумовлене джерелами, які розвиваються в металі з підвищеним вмістом водню в процесі пластичної деформації.

Окрихчування першого роду і зворотне і посилюється з підвищенням швидкості деформації, другого роду – розвивається за малих швидкостей деформації та може бути як зворотним, так і незворотним.

Теорії водневого окрихчування можна розподілити на чотири групи.

1. Теорія тиску молекулярного водню, згідно з якою окрихчування є результат тиску молекулярного водню в макро- та мікропустотах, а також у тріщинах всередині металу. Тиск виникає в результаті молізації атомарного

водню.

2. Адсорбційні гіпотези, якими пояснюють зниження руйнівного напруження в результаті зменшення поверхневої енергії всередині тріщин у разі адсорбції водню (водень діє як поверхнево-активна речовина).

3. Теорія взаємодії водню з ґратами металу; водень є різновид дефекту, що знижує міцність когезійного металевого зв'язку.

4. Теорії, що ґрунтуються на взаємодії водню з дислокаціями; водень чинить блокувальну дію на дислокації.

Для захисту металів від впливу водню рекомендують застосовувати такі методи:

- уведення в сталь сильних карбідотвірних елементів (хром, молібден, ванадій, ніобій і титан) для стабілізації карбідного складника та попередження знеуглецювання сталі;

- футерування сталі металами, які мають більш низьку воднепроникність (наприклад, мідь, алюміній та ін.);

- зменшення вмісту в сталі сполук сірки, сурми, селену тощо, які сприяють проникненню в метал водню.

Водневе спрацьовування не має спільних рис із водневим окрихчуванням сталі ні за інтенсивністю та характером розподілу водню в сталі, ні за характером руйнування. Воно пов'язане тільки з процесом тертя та обумовлене тертям: тертя створює умови для дифундування водню з мастильного матеріалу на певну глибину від поверхні тертя, де температура досягає максимуму під час тертя. Там утворюються багато тріщин, які, поєднуючись, руйнують метал.

Методи зменшення та попередження водневого спрацьовування:

1. Вибираючи матеріал для вузлів тертя, необхідно враховувати ступінь їх збагачення воднем і окрихчування. Уведення в сталь міді, хрому, ванадію, титану знижує проникнення в неї водню.

Холоднодеформована сталь може поглинути в 1000 разів більше водню, ніж відпущена.

Водневу крихкість виявляють в основному в сталях феритного класу. У загартованих і слабо відпущених сталях крихке руйнування може бути навіть за дуже малої кількості водню.

Необхідно, де можливо, вилучати з вузлів тертя полімери, здатні до швидкого розпаду та виділення водню.

2. У мастильну рідину корисно вводити інгібітори проникнення водню (кремній і органічні сполуки, які містять декілька атомів хлору). Механізм їх дії: під час електролізу іони водню розряджаються на зовнішній поверхні іонів, у результаті порушується безпосередній контакт іонів водню з поверхнею катода.

3. Водневе спрацьовування можна знизити вилученням із зони контакту речовин, які сприяють проникненню водню: селену тощо.

2.5. Абразивне спрацювання

Абразивним матеріалом називають мінерал природного або штучного походження, зерна якого мають достатню твердість і властивість різання (скобління, дряпання).

Абразивне спрацювання – руйнування поверхні деталі в результаті її взаємодії з твердими частинками за наявності відносної швидкості. Такими частинками є:

- нерухомо закріплені тверді зерна, які контактують по дотичній або під невеликим кутом атаки із поверхнею деталі (наприклад, шаржування сторонніми твердими частинками м'яких антифрикційних матеріалів);
- незакріплені частинки, які контактують із поверхнею деталі (наприклад, насипні вантажі під час їх транспортування відповідними пристроями, абразивні частинки в ґрунті під час роботи);
- вільні частинки, які перебувають у щілині сполучних деталей;
- вільні абразивні частинки, утягнуті в потік рідиною або газом.

Абразивного спрацювання зазнають деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівельних, гірничих, транспортних машин і транспортувальних пристроїв, вузли металургійного устаткування, металорізальних верстатів, шасі літаків, робочі колеса та напрямні апарати гідравлічних турбін, лопатки газових турбін, труби водяних економайзерів та парових котлів, лопати димососів, труби та насоси земснарядів, бурильне обладнання нафтової та газової промисловості, підшипники валів гребних коліс, підшипники гребних валів суден під час плавання на мілководді тощо.

На процес абразивного спрацювання може впливати:

- природа абразивних частинок;
- агресивність середовища;
- властивості спрацьовуваних поверхонь;
- ударна взаємодія;
- нагрівання та інші фактори.

Спрацювання у разі дії твердих зерен. Під час контакту абразивні частинки (зерна), залишаючись цілими або руйнуючись, пружно деформують метал. При цьому зерна можуть втискуватися в метал, повертатися або навіть припинити контакт, залишивши подряпину.

Спрацювання під час удару абразивних частинок. Цей процес ще називають ударно-абразивним спрацюванням. На нього впливає природа та геометрична форма, твердість, крихкість абразивних частинок, товщина шару абразиву, енергія удару, твердість досліджуваного матеріалу, наявність рідини в зоні удару тощо. У результаті ударно-абразивного спрацювання на поверхні залишаються ямки.

Спрацювання в зонах пари тертя. Абразивні частинки, які потрапляють у щілини пар тертя, зазнають впливу застосованого навантаження та можуть залежно від умов впресовуватися в поверхню тертя, подрібнюватися на більш дрібні фракції, перекочуватися вздовж поверхні спрацювання,

пружно та пластично деформуючи її.

Спрацьовування в потоці газу або рідини. У вказаному середовищі контакт із деталлю може відбуватися під різними кутами атаки рідини або газу. Спрацьовування залежить від маси частинок, швидкості їх падіння, властивостей абразиву, фізико-механічних властивостей металу. При цьому на поверхні деталі може виникнути або пружна, або пластична деформація, крихке руйнування, перенаклепування з виділенням металу у вигляді лусок.

2.6. Окиснювальне спрацьовування

Окиснювальне спрацьовування відбувається в тому випадку, коли на стикових поверхнях утворюються плівки окисів, які в процесі тертя руйнуються та знову утворюються; продукти спрацьовування складаються з окисів. Тут немає агресивного середовища, процес спрацьовування відбувається за нормальних і підвищених температур під час тертя без мастильного матеріалу.

Для окиснювального спрацьовування необхідно, щоб проміжок часу між послідовними руйнуваннями плівки був достатній для створення плівки відносно великої товщини.

Окиснювального спрацьовування зазнають калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань тяг і підвісних пристроїв машин, що працюють без мастильного матеріалу; колеса фрикційних передач тощо.

Підвищення температури призводить до зростання окиснювальних плівок, а вібрація – до руйнування.

2.7. Спрацьовування в результаті зминання

Спрацьовування в результаті зминання полягає в зміні розмірів або форми деталі внаслідок пластичної деформації її мікрооб'ємів. Зминання характерне для шпонкових пазів і шпонок, шліцьових з'єднань, штифтів і підпорок, нарізних з'єднань і т.д.

Зминання характерне для деталей, які зазнають удару.

У тихохідних зубчастих передачах із колесами невеликої твердості виникають значні пластичні деформації з утворенням канавок біля ведучих зубців. Пластичної деформації також зазнають рейки, колеса рухомого складу залізниці. Вм'ятини та заглиблення можуть з'явитися на підшипниках кочення за рахунок потрапляння сторонніх частинок. На підшипниках ковзання з'являються пошкодження через витискування бабітового шару із зони контакту.

2.8. Спрацьовування в результаті диспергування

Багато деталей тертя не мають на робочих поверхнях слідів скріплення та помітних подряпин; вони працюють за достатнього змащування і помірних температур. У тонких поверхневих шарах таких деталей не виникає будь-яких

хімічних і структурних змін. За цих умов руйнування поверхневого шару відбувається в результаті диспергування (подрібнення) окремих ділянок контакту. Інтенсивність цього виду спрацьовування невисока.

2.9. Спрацьовування в результаті викрихчування новостворених структур

За важких умов роботи на поверхнях тертя відбуваються фізико-хімічні зміни. Вони – результат пластичного деформування, підвищення температури шарів металу, які межують із зоною контакту, подальшого швидкого охолодження та хімічної дії навколишнього середовища. Ці фізико-хімічні зміни, що полягають у створенні нових структур, у свою чергу, змінюють вид взаємодії та характер руйнування поверхонь.

На поверхнях тертя сталевих і чавунних деталей іноді утворюються блискучі білі плями або смуги, які повністю травляться або майже не травляться звичайними металографічними реактивами. Цей шар отримав назву білого шару. Твердість цих шарів вища, ніж твердість основного металу. Шар відрізняється високою крихкістю, його структура високодисперсна. В основному білі шари складаються з мартенситу, цементиту та фериту.

Одночасно з утворенням білого шару формується система внутрішніх напружень, яка разом із робочими напруженнями призводить до розтріскування шару й викрихчування його окремих частинок. Продукти спрацьовування, які потрапляють у щілини між сполучними деталями, можуть спричиняти інтенсивне спрацьовування.

2.10. Корозія

Корозією називають руйнування поверхні металу в результаті хімічного або електрохімічного впливу середовища. Чиста металева поверхня легко зазнає хімічного впливу середовища. Однак, якщо на початку корозії її продукти створюють міцно пов'язану з металом плівку, яка ізолює поверхню від корозійного середовища, то метал стає пасивним щодо неї. Процес штучного створення тонких окисних плівок на поверхні металу для захисту його від корозії та надання виробу кращого вигляду називають пасивуванням.

Хімічна корозія відбувається шляхом взаємодії металів із сухими газами, випарами та рідкими неелектролітами.

Газової корозії зазнають циліндри двигунів внутрішнього згоряння, випускні клапани, елементи парових котлів тощо. На вуглецевій сталі газова корозія проявляється у вигляді плівки окисів уже за температури 200 ... 300°C, із підвищенням температури приблизно до 600 °C у зв'язку зі створенням під дією внутрішніх напруг тріщин у захисній плівці швидкість корозії зростає та утворюється окалина.

Електрохімічна корозія обумовлена неоднорідністю металу, що контактує з електролітом. Ця неоднорідність проявляється в різних формах:

1. Неоднорідність сплавів, обумовлена двома і більше структурними складниками.

2. Неоднорідний фізичний стан металу, обумовлений різницею між зерном і його межею, неоднорідністю структури (ліквація, газові пузири та неметалеві вкраплення).

3. Різний напружений стан суміжних ділянок деталі під навантаженням змінює фізичний стан навіть одного металу.

4. Різниця в концентрації розчину електроліту, який змочує метал, і неоднакові умови підвищення кисню до різних ділянок поверхні – інша категорія неоднорідності стану. Наявність на поверхні металу мікроділянок із різними електричними потенціалами спричиняє утворення великої кількості гальванічних мікроелементів, у результаті взаємодії яких відбувається корозія.

На швидкість корозії впливає температура (із її підвищенням корозія пришвидшується) та швидкість омивання середовищем металевої поверхні; за значної швидкості середовища корозія посилюється під дією ерозії.

У деяких машинах може мати місце щілинна корозія, за якої корозійні ушкодження зосереджені в проміжку між поверхнями. Проміжком можуть бути щілини між листами, проміжки в сполученнях і стиках, зони тріщин у металі, а також щілини між побічними речовинами, які осіли на поверхні або прилипли до неї.

Щілинної корозії зазнають навіть метали, стійкі до інших видів корозії завдяки створенню на їх поверхнях плівок, які мають високі захисні властивості. Вібрації та епізодичні відносні мікрозміщення поверхонь пошкоджують захисну плівку в щілині, призводять до її вилучення та, створюючи умови для більшої нерівномірності концентрації середовища, спричиняють більш інтенсивну корозію в щілині.

Корозія робочих поверхонь деталей у непрацюючих машин знижує зносостійкість пар тертя з таких причин: у непрацюючих пар погіршується якість поверхні та після пуску машини її деталі починають спрацьовуватись; продукти корозії діють як абразив; спрацьовування продуктів корозії, що відбувається за короткий час, спричиняє швидку негативну зміну лінійних розмірів деталі.

2.11. Кавітаційне спрацьовування

2.11.1. Гідродинамічне спрацьовування

Кавітація дослівно означає порожнину, каверну. Однак під кавітацією розуміють утворення в потоці рідини, що рухається по поверхні твердого тіла, пустот у вигляді пузирів, смуг та мішків, наповнених випарами, повітрям або газами, розчиненими в рідині й виділеними з неї. Це явище обумовлене такими чинниками. У потоці, який рухається з великою швидкістю, у разі його звуження та наявності перепон на шляху тиск може знизитися до рівня, відповідного до тиску пароутворення за даною температурою. При цьому, залежно від опору рідини розтяжним зусиллям, може відбутися розрив,

порушення суцільності потоку. Створена пустота заповнюється парою та газами, виділеними з рідини. Повітря, втягнене в потік, полегшує виникнення кавітації. Утворені парогазові бульбашки розмірами близько десятих часток міліметра, переміщуючись разом із потоком, потрапляють у зони великого тиску. Пара конденсується, гази розчиняються, і у створені пустоти з великим прискоренням спрямовуються частинки рідини; відбувається відновлення суцільності потоку, яке супроводжується ударом.

Досліди довели, що кавітаційна бульбашка може зрости за 0,002 с до 6 мм у діаметрі та повністю зруйнуватися за 0,01 с. У певних типах кавітації на площі 1 см² протягом 1 с можуть створюватися та руйнуватися понад 30 млн кавітаційних бульбашок.

Кавітація спостерігається в трубопроводах, гідромоніторах і потоках, які обтікають лопатки відцентрових і пропелерних насосів і лопатей гідравлічних турбін і гребних гвинтів. Кавітація спричиняє вібрації, стукотіння та струси, що призводить до розхитування кріпильних з'єднань, обривання болтів, змінання різей, фрикційної корозії стиків, порушення ущільнення та утомного пошкодження. Попередити кавітацію можна, проектуючи гідромеханічну систему так, щоб в усіх точках потоку тиск не знижувався нижче тиску пароутворення.

Кавітаційну стійкість матеріалу визначають його склад і структура. Підвищення вмісту вуглецю у вуглецевій сталі збільшує її стійкість. Проте, коли він досягає 0,8 % С, стійкість починає спадати. Пластинчатий перліт більш стійкий, ніж зернистий. Уведення нікелю і хрому в сталь підвищує її стійкість за рахунок зниження кількості фериту, збільшення ступеня дисперсності тощо.

Найбільш стійкий низьколегований чавун (1% Ni, 0,3% Mo) із кулястим графітом. Гартування із нагріванням струмами високої частоти, цементация, поверхневе зміцнення збільшують стійкість.

2.11.2. Вібраційна кавітація

Вібраційна кавітація виникає під час коливання твердого тіла відносно рідини або рідини відносно твердого тіла. Тиск у рідині на межі розподілу рідини і твердого тіла може знизитися і викликати утворення кавітаційних бульбашок. Умови кавітації залежать від зовнішнього тиску на систему та насиченості рідини повітрям.

Вібраційну кавітацію можуть викликати звукові коливання, особливо ультразвукові. Звукові хвилі прискорюють окисно-відновні реакції, обумовлюють внутрішньомолекулярні перегрупування речовин, посилюють диспергування, прискорюють процеси миття й знежирювання поверхонь та викликають коагуляцію дрібних частинок.

Вібраційна кавітація зазвичай відбувається у двигунах внутрішнього згоряння, особливо на зовнішніх поверхнях гільз у результаті їх коливань від ударів поршня. Спрацьовування від кавітації зовнішньої стінки гільзи може бути в 3 – 4 рази більше, ніж спрацьовування внутрішньої поверхні від дії поршневих кілець.

2.12. Ерозійне спрацьовування

Ерозія в широкому розумінні – процес поверхневого руйнування речовини під впливом навколишнього середовища. У машинобудуванні ерозія має більш вузьке значення: руйнування поверхні матеріалів у результаті механічного впливу високошвидкісного потоку рідини, газу або пари. Руйнування металів під дією електричних зарядів також відносять до ерозії.

Ерозійна дія високошвидкісного потоку рідини, газу або пари в чистому вигляді включає тертя безперервного потоку і його ударів об поверхню.

У результаті тертя відбувається розхитування та вимивання певних об'ємів матеріалу. Залежно від властивостей матеріалу можливі вириви окремих об'ємів або груп зерен. Рідина, потрапивши під час ударів у мікротріщини, поводить себе подібно до клина, розсуваючи бічні стінки. Якщо потік містить абразивні частинки, то спрацьовування стає ерозійно-абразивним.

2.13. Тужавіння та заїдання поверхонь під час тертя

Тужавіння – міцне з'єднання металів у результаті взаємного тертя або сумісного деформування за температури, нижчої температури рекристалізації. При цьому в зонах безпосереднього контакту поверхонь. У місцях тужавіння зникає межа між дотичними тілами, відбувається зрощування одно- та різнойменних металів.

На здатності металів створювати міцні зв'язки засновані такі технологічні процеси, як ковальсько-пресове зварювання, контактне зварювання опором, плакування методом гарячого вальцювання. Для цих процесів характерне з'єднання металів за значного тиску й температури, вищої температури рекристалізації. На явищі тужавіння ґрунтуються технологічні процеси холодного зварювання металів.

Сутність тужавіння: якщо прикласти навантаження до двох дотичних металевих поверхонь, то в результаті контакту (на міжатомних відстанях) відбудеться схоплювання поверхонь із виділенням енергії.

Якщо в одному й тому ж металі контактують два кристаліти з однаковою орієнтацією, тобто з паралельним розташуванням кристалографічних площин, то відбувається їх просте зрощування в один загальний кристаліт.

Якщо контактують два кристаліти з різною орієнтацією, то між ними створюється перехідна зона. Для створення перехідної зони застосовують поверхневу енергію, яка вивільнюється в результаті перебудови структури. Під час цього процесу утворюються вузли зварювання.

Процес утворення та руйнування вузлів зварювання видозмінюється залежно від деталей, які контактують, їх матеріалів і режимів тертя. У разі контакту двох тіл можуть відбуватися виривання матеріалу в макро-, мікро- та субмікроскопічних частинках із однієї поверхні та перенесення їх на іншу. І хід подальшого контакту приварені частинки спрацьовуються, вириваються та виносяться із зони тертя. При цьому інтенсивність спрацьовування буде різною.

Під час експлуатації машин для якісної оцінки ступеня пошкоджень поверхонь застосовують нижченаведені терміни.

Натирання – ділянка поверхні тертя, яка відрізняється за кольором від прилеглих ділянок і зазнає найбільшого тиску. Натирання буває світлого (результат згладжування мікронерівностей поверхні або утворення найдрібніших рисок у напрямку ковзання) і темного кольору (результат місцевих підвищених температур і утворення окисних плівок). Натирання може утворюватися за будь-якого виду спрацьовування.

Задирка – найбільш показова форма виявлення тужовіння. При цьому утворюються широкі та глибокі борозни з нерівними краями, які іноді зливаються; наявні великі нарости; можливе оплавлення поверхні, а також повне заклинювання деталей.

2.14. Спрацьовування у випадку фретинг-корозії

Фретинг-корозія – це процес руйнування щільно контактувальних поверхонь пар метал-метал або метал-неметал у результаті малих коливальних відносних переміщень. Для збудження фретинг-корозії достатні переміщення поверхонь із амплітудою 0,025 мкм. Руйнування полягає у створенні на дотичних поверхнях дрібних вибоїн. Продукти корозії можуть бути у вигляді нальоту, плям і порошку. Даного виду спрацьовування зазнають не тільки вуглецеві, але й корозійностійкі сталі в парах тертя сталь-сталь (можуть бути як однойменні, так і різнойменні), сталь-олово або алюміній, сурма, а також чавун-бакеліт або хром і багато інших пар тертя.

Через малу амплітуду переміщення дотичних поверхонь пошкодження зосереджуються на невеликих площадках дійсного контакту. Продукти спрацьовування не можуть вийти із зони контакту, у результаті виникає високий тиск і збільшується їх абразивна дія на основний метал.

Продукти фретинг-корозії сталевих виробів в атмосфері повітря мають колір від світло-червоно-коричневого до темно-коричневого залежно від марок матеріалів, тиску, вологості та частоти циклів мікротріщин.

Фретинг-корозія відбувається також у вакуумі, у середовищі кисню, азоту й гелію. Інтенсивність спрацьовування в разі фретинг-корозії в атмосфері повітря вища, ніж у вакуумі та в середовищі азоту, а в кисні більша, ніж у гелії.

Вибоїни і продукти корозії на сполучених поверхнях валів та напресованих на них дисків, колес, муфт і кілець підшипників кочення, на осях і ступицях коліс рухомого складу залізниці, запресованих у картерах вкладишах підшипників, пригнаних поверхнях шпонок і їх пазів, на центрувальних поверхнях шліцьових з'єднань, опорах силовимірювальних приладів, опорних поверхнях пружин, затягнутих стиках, у заклепкових з'єднаннях між листами, на заклепках і в отворах, на болтах тощо – результат прояву фретинг-корозії.

Необхідні для цього процесу відносні мікрозміщення сполучених поверхонь відбуваються в результаті деформації деталей під навантаженням і їх вібрації, а також коливань у пружних системах.

Універсальних засобів боротьби з фретинг-корозією немає, але для її зменшення необхідно зменшити мікрозміщення, підвищити сили тертя, зосередити ковзання в проміжному середовищі.

Зменшити відносно мікрозміщення можна, надавши деталям відповідних конфігурацій або підвищивши сили тертя. Сили тертя можна підвищити, збільшуючи тиск шляхом зменшення площі дотикання деталей або підвищуючи коефіцієнт тертя за рахунок збільшення шорсткості поверхні. Шорсткість довго впливатиме на коефіцієнт тертя, якщо один із елементів пари – неметал. Інший метод збільшення сили тертя полягає в нанесенні на поверхню електролітичного шару міді, олова, кадмію, срібла або золота.

Якщо усунути вібрацію неможливо, то необхідно або зменшити силу тертя, або перенести ковзання в проміжне середовище: додати свинцеве білило, парафін; на поверхні нанести фосфатне, свинцеве або індієве покриття.

Зменшити пошкодження від фретинг-корозії можна, підвищуючи твердість однієї деталі; при цьому зменшується взаємне проникнення деталей, що знижує інтенсивність спрацьовування.

2.15. Тріщиноутворення на поверхні тертя

2.15.1. Утомне спрацьовування

Утомне спрацьовування відбувається в деталях, які зазнають тривалого навантаження змінних за напрямком та величиною зусиль. Тріщини утворюються на поверхні тертя і входять, звужуючись, у глибину шару. Розвиваючись по довжині, дрібні тріщини створюють сітку на окремих обмежених або великих ділянках поверхні. Розкриття тріщин відбувається під дією пульсуючого тиску мастила. На найпізнішій фазі тріщина, досягнувши основи антифрикційного шару, змінює свій напрямок, поширюючись по стику між шаром і основою, у результаті окремі ділянки поверхневого шару відокремлюються від решти шару, а потім викришуються. Значну роль у відокремленні частинок відіграє мастильний матеріал, який, проникнувши в тріщину, ніби «підриває» метал над нею. Іноді тріщина не доходить до стику і просувається близько від нього та паралельно йому. Викришування значних шматків шару може супроводжуватися поверхневими вибоїнами.

Утомне руйнування поділяють на чотири стадії.

1. *Інкубаційна.* В окремих зернах після певної кількості циклів навантаження розвиваються смуги ковзання, а в локальних об'ємах накопичуються викривлення кристалічних ґрат, що призводить до підвищення мікротвердості та межі жорсткості за зниження модуля пружності. На певному етапі цієї стадії мікротвердість почне знижуватися, залишаючись вище вихідної.

2. *Розпушення.* У деяких зернах, розташованих у найбільш напружених об'ємах, у результаті зсувів утворюються широкі смуги ковзання, де зароджуються пори та субмікроскупчення тріщин, які можуть розвинути до мікроскопічних розмірів.

3. *Поширення*. Порожнє ковзання за межі зерен і зростання мікротріщин у результаті концентрації напружень із їх кінців до критичного розміру (макротріщин).

4. *Остаточне руйнування*. Відбувається в результаті довільного поширення макротріщин у зразках малого розміру або з крихких матеріалів.

Якщо утомне руйнування відбувається по межах зерен, то воно може завершитися ще до утворення широких смуг ковзання.

Субмікроковзання тріщини як дефект структури існує у вихідному матеріалі або відбувається вже за малих статичних або циклічних навантажень. Під дією змінних навантажень, що перевищують певний граничний діапазон, у найбільш напруженій зоні поверхневого шару утворюються тріщини, подальші зміни яких визначають загальні умови контакту.

Утомне спрацювання залежить від режиму роботи і конструкції деталей, фізичних властивостей матеріалу та покриття тощо.

2.15.2. Тріщиноутворення термічного походження

Розтріскування поверхонь тертя в результаті термічного впливу спостерігаються на поверхнях залізничних колес і гальмівних колодок. Під час гальмування відбувається інтенсивне нагрівання коліс і колодок, а потім охолодження. При цьому на їх поверхні утворюються тріщини та відбувається підплавлення металу. Утворення тріщини пришвидшує спрацювання поверхонь тертя. Плоска кільцева поверхня колес переформовується у хвилеподібну, а на поверхні з'являються темні смуги, які чергуються із світлими.

Утворення тріщини на робочих поверхнях неминує і на деяких стадіях знижує надійність гальмування, тому існують допуски на тріщини. Гальмівні колодки бракують, коли тріщини досягають глибини більше 5 мм.

Як захід боротьби з терморозтріскуванням – вибір матеріалу. Чим вища теплопровідність матеріалу, тим менше температурне поширення, чим пластичніший метал, тим менша ймовірність утворення в ньому тріщин.

Схильні до терморозтріскування крихкі матеріали й ті, які мають малу теплопровідність: скло, кераміка, тверді сплави, загартовані сталі, а також сплави з великим вмістом нікелю або з вісмутом, що мають низьку теплопровідність.

Висока точність обробки поверхонь тертя – додатковий засіб боротьби з розтріскуванням.

Тріщиноутворення в результаті перенаклепування відбувається в умовах тертя кочення, коли твердість поверхні не настільки низька, щоб відбулася помітна пластична деформація, і не настільки висока, щоб попередити мікропластичну деформацію в межах усієї робочої поверхні.

2.16. Вибіркове перенесення під час тертя

У середині 50-х рр. минулого століття під час досліджень технічного стану вузлів тертя літака ІІ на різних етапах його експлуатації було виявлено явище довільного створення тонкої плівки міді на поверхнях деталей важконавантажених вузлів у процесі роботи пари тертя сталь-бронза в разі змащування спиртогліцериновою сумішшю. Плівка міді товщиною 1 ... 2 мкм у процесі тертя покривала як бронзу, так і сталь. Вона різко знижувала спрацьовування пари тертя та зменшувала силу тертя приблизно в 10 разів.

Дослідження показали, що мідна плівка утворюється в результаті анодного розчину бронзи: легуючі елементи уводять мастильний матеріал, а поверхня збагачується міддю. Після того як поверхня бронзи і сталі покриється міддю, розчинення припиниться, установиться режим вибіркового перенесення.

Створену захисну плівку називають «сервовитною». Вона являє собою речовину (метал), створену потоком енергії. Тертя не може знищити плівку, воно її створює. Під час деформування «сервовитна» плівка не руйнується і не зазнає утомного руйнування. Властивості мідної плівки, яка утворюється в процесі тертя, інші, ніж звичайної міді, отриманої відновленням мідних руд.

Дослідженнями доведено, що плівка товщиною 1 ... 2 мкм має пухку, пористу структуру. Параметр ґрат плівки менший, ніж параметр ґрат бронзи. Під «сервовитною» плівкою на межі зі сталлю знаходиться шар окисів міді, легуючих елементів або домішок товщиною близько 0,1 мкм. У верхньому шарі плівки немає скупчення дислокацій, тобто немає пошкоджень, які призводять до руйнування поверхні. Установлено, що стан матеріалу плівки подібний до розплавленого. Плівка не придатна до наклепування, має малі зсувні зусилля, пориста. У верхній частині вона не має окисів, здатна до тужовіння, під час тертя її частинки можуть переходити з однієї поверхні тертя на іншу, тобто тужовіти без створення пошкоджень і збільшення сил тертя. Тертя бронзи зі сталлю в умовах вибіркового перенесення можна порівняти з ковзанням тіла по льоду, за якого рідкий коефіцієнт тертя замість води забезпечує плівка розплавленого металу.

Вибіркове перенесення відбувається під час тертя сталі по сталі, сталі по чавуну, чавуну по чавуну, сталі по спеченому матеріалу, металополімеру, склу, бронзі, алюмінієвих сплавах.

Вибіркове перенесення застосовують:

- у підшипниках кочення (кульки і поверхні доріжок кочення покривають «сервовитною» плівкою);
- нафтобурильному обладнанні;
- шарнірних з'єднаннях літаків;
- вузлах тертя автомобілів;
- на текстильних машинах;
- у хімічному обладнанні;
- машинах ливарного виробництва;
- побутовій техніці.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називають руйнуванням структури?
2. Дайте визначення мікрорізанню.
3. Назвіть етапи руйнування металу шляхом створення та розвитку тріщин.
4. У чому полягає сутність водневого спрацьовування?
5. Назвіть чинники, які впливають на процес абразивного спрацьовування.

Розділ 3

КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1. Конструктивні методи підвищення зносостійкості

Розвиток конструкцій машин передбачає збільшення їх продуктивності, що майже завжди супроводжується підвищенням механічного і теплового навантажень рухомих сполучних деталей. У зв'язку із цим перед конструктором постає завдання створити нові, сучасніші вузли тертя. Конструктивна розробка вузлів тертя включає:

- оцінку і вибір принципової схеми роботи вузлів тертя з погляду їх впливу на зносостійкість і надійність машин у цілому;
- вибір матеріалів і сполучення їх у парах тертя;
- розробку заходів щодо зменшення загальних і місцевих перенавантажень;
- забезпечення нормального функціонування вузлів тертя в заданих умовах за допомогою мастильної системи, захисту від забруднюючої дії середовища, блукаючих струмів і перегрівання від сторонніх джерел тепла, які впливають на вузол у процесі роботи;
- забезпечення експлуатаційної технологічності конструкції;
- захист тертьових поверхонь деталей і вузлів від можливих аварійних пошкоджень під час експлуатації;
- розробку засобів діагностування вузлів тертя.

3.1.1. Вибір матеріалів для тертьових деталей

Тертьові деталі залежно від призначення виготовляють із конструкційних, фрикційних, зносостійких і антифрикційних матеріалів поширеної номенклатури. У багатьох випадках на конструкційний матеріал наносять зносостійкі покриття, плівки та ін. Із конструкційних сталей виготовляють деталі, які повинні відповідати вимогам високої міцності, жорсткості або піддатливості, а також мати поверхні тертя: деталі типу валів, пальців, болтів, зубчастих колес, силових циліндрів, поршнів та ін.

Фрикційні матеріали – це матеріали, які під час контакту з металевою поверхнею мають високий, більш або менш стабільний коефіцієнт тертя. Ці матеріали розподіляють на органічні (дерево, корок), металеві чавуни, сталі (У6, У7, марганцева сталь та ін.), азбестокаучукові, пластмасові (текстоліт, азбестотекстоліт, фібра), спечені з мідної та залізної основ.

Зносостійкі матеріали – це матеріали, які за тертям у важких умовах навантаження порівняно мало спрацьовуються: конструкційні сталі, зміцнені по всьому об'єму або по всій робочій поверхні, спеціальні сталі, чавуни, спечені метали, гума, пластмаса тощо.

До конструкцій, виготовлених із таких матеріалів, належать: плунжерні пари, зуби ковшів екскаваторів, леміші плугів тощо.

Антифрикційний матеріал – це підшипниковий матеріал (як металевий, так і неметалевий), твердість якого менша, ніж твердість сполученої деталі. Властивості матеріалу: достатня статична та динамічна міцність за підвищених температур; здатність створювати міцний граничний шар мастильного матеріалу та швидко відновлювати його в місцях руйнування; низький коефіцієнт тертя за граничного змащування; висока теплопровідність, теплоємність, припрацьовуваність; краща зносостійкість сполучення; недефіцитність матеріалу й висока технологічність.

3.1.2. Вибір матеріалів у процесі конструювання вузлів тертя

Вибір матеріалів – важке завдання, незважаючи на те, що практика машинобудування має великий досвід із цього питання.

Вибір залежить:

- від конструкції та призначення вузла;
- технології виробництва;
- умов експлуатації;
- вимог до загальної міцності деталей;
- терміну їх служби та надійності з урахуванням вартості матеріалу та його дефіцитності;
- витрати на виготовлення деталей.

Наприклад: сплави з вмістом графіту зносостійкіші, ніж без нього, а вуглецева сталь поступається чавунам із кулястим графітом.

3.1.3. Числові критерії працездатності матеріалів у парах тертя

Перевірку правильності вибору матеріалів пар тертя та ковзання за заданих або означених сполучних розмірів деталей і визначення цих розмірів під час проектного розрахунку виконують за такими критеріями:

– середнім тиском p . Спосіб ефективний для пар тертя, які працюють із малими швидкостями ковзання за невисоких температур навколишнього середовища, та забезпечує з'єднування від можливих заїдань;

– за тиском p і швидкістю V . Суть методу: якщо f – коефіцієнт тертя ковзання, то fpV – питома потужність тертя. Оскільки надійна робота вузла можлива тільки за теплонапруженості, що не перевищує допустиму величину для даної конструкції та відповідає особливостям її експлуатації, то, позначивши через A граничну кількість теплоти, яку знаходять із одиниці площі за одиницю часу, умову напруженості вузла за теплонапруженістю можна записати таким чином:

$$fpV \leq A, \text{ якщо } f = \text{const, то } pV \leq \text{const}.$$

3.1.4. Правила сполучення матеріалів

Правила сполучення матеріалів такі:

1. Сполучати твердий матеріал із м'яким, який має температуру рекристалізації, нижчу від середньої температури поверхні тертя. Така пара металів протистоїть заїданню. Для неї характерна висока надійність.

Результативна є сполучуваність таких пар: хром – гума у випадку змащування мінеральним маслом і водою; хром – бронза в разі змащування пластичними мастилами матеріалів.

2. Сполучати тверді матеріали (сполучення пар з азотованими, хромованими та загартованими сталями). Такі пари тертя мають високу зносостійкість. Нанесення покриття збільшує надійність їх роботи. Висока точність виготовлення та складання, значна жорсткість конструкцій, ретельне припасування, поліпшення умов змащування сприяють значному розширенню сфери застосування пар тертя із твердих матеріалів.

3. Уникати сполучень м'яких матеріалів з м'яким, а також пар із однакових матеріалів. Подібні пари мають низьку зносостійкість і ненадійні в роботі. У разі незначних перенавантажень у парах утворюються осередки тужавіння та відбувається глибоке виривання матеріалів із взаємним налипанням їх на поверхню тертя.

4. Використовувати у важкодоступних для змащування конструкціях пористі спечені матеріали й антифрикційні сплави.

5. Використовувати пластичні маси як фрикційні та антифрикційні матеріали. Вони підвищують надійність і термін служби вузла тертя, знижують масу конструкції та витрати дефіцитних кольорових металів, зменшують вібрації.

6. Намагатися шляхом вибору матеріалів пари тертя, мастильних або присадок до них створювати в процесі роботи умови реалізації режиму вибіркового перенесення під час тертя.

7. Ураховувати під час вибору матеріалів можливість у процесі експлуатації насичення воднем тертьових поверхонь, що різко знижує зносостійкість і надійність роботи вузла. Використовувати матеріали, які не взаємодіють із воднем.

8. Піддавати поверхні сталевих деталей вузлів тертя під час остаточної доводки фінішній антифрикційній безабразивній обробці.

3.1.5. Пористість матеріалу

У багатьох випадках пористість матеріалу тертьових деталей слугує конструктивним або технологічним фактором підвищення надійності їх роботи за рахунок поліпшення режиму змащування або протизадирної стійкості пари.

Деталі зі сталевого лиття працюють краще, ніж отримані тиском через поліпшене змащування мастильними матеріалами. Металізаційне покриття, одержане напиленням, має пористість до 10 % об'єму. Поверхневу пористість створюють шляхом анодування та фосфатування. Пористість матеріалу отримують методом порошкової металургії, електрохімічним способом, у ході звичайного металургійного процесу, а також під час механічної обробки.

3.1.6. Розміщення матеріалів пар тертя за твердістю

Для пари, створеної ковзними поверхнями, які мають твердість і розміри площ тертя, можна виявити такі дві умови:

$$H_1 < H_2 ; S_1 < S_2,$$

$$H_1 > H_2 ; S_1 > S_2,$$

де H_1 і H_2 – значення твердості тертьових поверхонь; S_1 і S_2 – відповідні площі поверхонь тертя.

Пару з розташуванням матеріалів, що задовольняє першу умову, називають прямою парою тертя, а другу умову – зворотною парою. У першому випадку по більшій поверхні ковзає більш тверде тіло, у другому – більш м'яке.

Приклад прямої пари: ковзання загартованого супорта по чавунній термічно необробленій станині.

Приклад зворотної пари: ковзання хромованого поршневого пальця по поверхні циліндра з перлітного чавуну.

3.1.7. Заміна у вузлах машин тертя ковзання тертям кочення

Заміна у вузлах машин тертя ковзання тертям кочення в багатьох випадках доцільна з погляду підвищення надійності роботи деталей і економічності машин.

Переваги підшипників кочення:

- зменшення витрат на тертя, тому опори кочення краще встановлювати у вузлах машин, які працюють із частими пусками та зупинками;
- нижча вартість, на відміну від підшипників ковзання, що потребують великої кількості кольорових металів (мідь, олово, свинець та ін.);
- зменшення витрат мастильних матеріалів;
- немає потреби у примусовому охолодженні;
- спрощення ходу;
- у валів за правильно визначених посадок відсутнє спрацювання шийок;
- підшипники кочення стандартизовані, що спрощує конструювання підшипникового вузла;
- зменшення вартості машини.

Недоліки підшипників кочення:

- недостатня надійність за високих колових швидкостей і динамічних навантажень (викришуються);
- великі діаметральні розміри за меншої довжини, ніж у підшипників ковзання;
- незадовільна робота в умовах вібраційного навантаження;
- висока шумність;
- недостатня корозійна і теплова стійкість;
- значно менша вантажопідйомність і довговічність упорних підшипників;
- незручні у випадку рознімної опори.

3.1.8. Урахування температурних деформацій деталі

Різна температура в окремих частинах і наявність температурних градієнтів по довжині й товщині стінок деталі – причини нерівномірних

теплових деформацій.

Теплові деформації змінюють форму, величину зазорів і натягів у з'єднаннях, а також взаємне розміщення поверхонь, установлених у ході складання.

Урахуванням температурних деформацій під час конструювання деталей вузлів тертя та компонування машини передбачає:

- правильне визначення зазорів у з'єднаннях;
- розробку заходів для якомога меншого викривлення конфігурації тертьових поверхонь у робочому стані та зменшення негативного впливу переміщень на функціональні властивості машини.

Для забезпечення рівномірного і постійного температурного поля в прецизійних, технологічних машинах і апаратурі необхідно:

- виключити її нагрівання машини сонячними променями;
- зменшити місцеве нагрівання підвищенням коефіцієнта корисної дії механізмів;
- винести за межі машини або інтенсивно охолоджувати джерелами теплотворення або тепловіддачі;
- за можливістю застосовувати циркуляційне змащування;
- за необхідності використовувати для підігрівання окремих частин нагріте повітря від вітрових приводів;
- замінити в прецизійних верстатах клиновий привідний пас на плоский, який менше нагрівається в процесі роботи;
- використовувати щитки біля відкритих швидкообертових деталей для охолодження машини або механізму за допомогою повітря.

3.1.9. Засоби встановлення вузлів, які зменшують додаткові навантаження під час монтажу та у процесі експлуатації

Установлення машин і механізмів може бути пов'язане з виникненням початкових напружень у деталях конструкцій, що негативно впливає як на загальну міцність деталей, так і на надійність рухомих з'єднань. Наприклад: установлення механізмів і машин на чотири точки (лапи) за недостатньої жорсткості корпусу. Найменша невідповідність взаємного розташування опорних поверхонь і поверхонь лап за висотою або за площиною затяжки кріплення болтів спричиняє деформацію корпусу. Для встановлення вузла достатньо закріплення у трьох точках. Наприклад: триточкова підвіска двигуна в автомобілях.

3.1.10. Захист робочих поверхонь пар тертя від забруднення

Багато машин і механізмів працюють у запиленому або забрудненому середовищі. На відкриті поверхні тертя можливе потрапляння окалини, іржі, металевої або іншої стружки тощо. У цьому випадку необхідний захист поверхонь тертя від забруднень. Наприклад: напрямні металорізальних верстатів у разі належного захисту зберігають сліди шабрування або шліфування після 8–10 год безперервної роботи.

Способи захисту від забруднення:

- захист критих вузлів тертя;
- герметизація закритих корпусів у місцях виходу валів або інших нерухомих деталей;
- очищення мастила;
- вилучення забруднень із палива, мастильного матеріалу, повітря, газів та рідини.

3.2. Методи підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя машин у ході експлуатації

Конструктивна досконалість і висока якість виготовлення та встановлення машин не гарантує тривалу й безаварійну їх роботу. Додаткова умова – правильна технічна експлуатація та своєчасний ремонт.

Завданням технічної експлуатації машини є забезпечення її справного технічного стану й безаварійної роботи за належної економічності.

Рівень технічної експлуатації машин визначають:

- установами їх у належному місці;
- раціональним використанням відповідно до призначення;
- рівнем кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- ставленням до догляду і технічного нагляду за машинами;
- організацією своєчасного обслуговування та змащування.

Важливою передумовою грамотної експлуатації машини є наявність:

- її технічного опису;
- правил технічної документації;
- основних правил техніки безпеки під час обслуговування машини;
- альбому креслень і карт змащування.

Суттю технічного догляду та ремонту є підтримка працездатності машини.

3.2.1. Змінювання властивостей мастильного матеріалу в процесі експлуатації

Мастильний матеріал під час експлуатації старіє, тобто його первісні властивості в результаті фізичних і хімічних процесів змінюються.

Фізико-хімічні зміни мастила пов'язані окисненням, під яким розуміють сукупність хімічних перетворень у мастилі за наявності кисню. У результаті окиснення мастила змінюється його хімічний склад:

- збільшується вміст вихідних смолистих речовин та утворюються нові;
- підвищується густина і температурна величина;
- мастило темнішає;
- збільшується його в'язкість.

3.2.2. Відкладення на деталях і в мастильній системі

Відкладення – нагар, лак і осадки – утворюються в результаті старіння мастила.

Нагар має зазвичай чорний колір, хоча може бути й білим, помаранчевим, коричневим тощо.

Лак – це полімерні утворення.

Шлак – тістоподібна або напівтверда речовина від світло-коричневого до чорного кольору, яка складається з рідини та нерозчинних у ній речовин, що перетворюють її на емульсію або суспензію. Шлак може мати вигляд окремих згустків, які плавають у мастилі. Він засмічує фільтри та ін.

3.2.3. Піноутворення

Піна – це поєднання мікроскопічних пузирів газу або пари, відокремлених один від одного плівкою рідини товщиною близько 10^{-5} см. Піна утворюється під час взаємодії мастила.

Негативні явища піноутворення:

- зменшується подача масляних насосів;
- виникає пульсація тиску в системі;
- погіршується змащування внаслідок розриву масляної плівки;
- пузирями повітря мастило просочується крізь щілини, стики;
- змінюються показники рівня мастила в картері;
- прискорюється окиснення мастила.

3.2.4. Обкатка машин

Призначення обкатки – припрацьовування у спільному комплексі всіх пар тертя, які входять до складу машини.

Під час обкатки мають бути реалізовані два процеси:

- спрацьовування поверхонь на виступах і шорсткості поверхні на ділянках, де вихідні технологічні неточності, дефекти монтажу перешкоджають поширенню плями контакту;
- ліквідація вихідної шорсткості поверхні та формування нової з певними параметрами й напрямками, що характерно для кожної поверхні тертя в ході роботи машини.

Критерій оцінки остаточного припрацьовування:

- перехід на прямолінійну ділянку кривої спрацьовування;
- досягнення мінімуму потужності, витраченої на холостий хід машини;
- стабілізація моменту тертя і температури;
- досягнення певного ступеня прилягання контактувальних поверхонь.

Тривалість обкатки визначають:

- вихідна величина шорсткості;
- точність обробки деталей і їх складання;
- матеріал деталей;
- режим обкатки.

Контрольні запитання і завдання

1. Назвіть переваги підшипників кочення перед підшипниками ковзання.
2. За якими критеріями визначають рівень технічної експлуатації машин?
3. Залежно від яких умов вибирають матеріали для вузлів тертя?
4. Як проводять захист матеріалів тертя?
5. Для чого проводять обкатку пар тертя?

Розділ 4

ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Технологія підвищення зносостійкості деталей машин передбачає:

- отримання матеріалів і заготовок заданих властивостей;
- виготовлення деталі потрібної форми її точності;
- зміцнення робочих поверхонь деталей;
- складання деталей зі зміцненими робочими поверхнями в агрегати, випробування вузлів і машин.

4.1. Постановка завдання забезпечення якості поверхневого шару

Процес технологічного забезпечення якості поверхневого шару та довговічності деталей машин зміцненням зображено на схемі (рис. 16).



Рис. 16. Процес технологічного забезпечення якості поверхневого шару обробкою поверхневого пластичного деформування

Традиційним є підхід, який установлює зв'язок режиму обробки з експлуатаційними властивостями зміцнюваної деталі (1 – 5) (рис. 16). Недолік такого підходу – це те, що виявлені закономірності недійсні за інших умов, тому в разі переходу до нового виробу виникає необхідність повторення трудомістких досліджень.

Найбільш узагальненим вважають забезпечення довговічності деталі, яке має дві стадії:

- шлях 1–3 (рис. 16) – встановлення зв'язку технологічних факторів із параметрами стану поверхневого шару;
- шлях 3–5 (рис. 16) – визначення впливу цих параметрів на експлуатаційні характеристики деталей.

Обидва підходи мають основний недолік – емпіричний шлях вирішення питання, пов'язаний із великою трудомісткістю експериментів, обмеженою кількістю досліджень параметрів стану поверхневого шару, невисокою точністю (у межах точності методу вимірювання) їх визначення.

Емпіричний шлях не дозволяє застосовувати ЕОМ для моделювання та технологічного проектування механічної обробки деталей із оптимізацією параметрів стану їх поверхневого шару, що забезпечують задану довговічність.

Більш ефективним підходом до технологічного забезпечення експлуатаційних показників деталей є той, що ґрунтується на внутрішніх закономірностях процесу формування поверхневого шару в осередку деформації (шляхи 1 – 2 і 2 – 3). Розкриття таких закономірностей дозволяє глибше визначити вплив параметрів стану поверхневого шару на процес руйнування деталі (шлях 3 – 4) (рис. 16) та експлуатаційні показники (шлях 4 – 5).

Підвищення опору деталі руйнуванню для різних видів експлуатаційного навантаження досягають за допомогою технологічних методів об'ємного або поверхневого зміцнення. Об'ємне зміцнення підвищує статичну міцність деталей, у яких робочі напруги розподілені більш-менш рівномірно. Для виготовлення таких деталей застосовують високоміцні сталі та сплави, композиційні матеріали. Проте більшість деталей працює в умовах, за яких експлуатаційного навантаження (тиск, нагрівання, дія навколишнього середовища тощо) зазнає головним чином їх поверхневий шар. Отже, зносостійкість, зародження та розвиток тріщини від утомленості, поява осередків корозії залежать від опору поверхневого шару руйнуванню. Для деталей, руйнування яких починається з поверхні, розроблено велику кількість методів поверхневого зміцнення, заснованих на нанесенні покриття або зміні стану (модифікації) поверхні.

Наносючи покриття, зміцнення деталей досягають шляхом осаджування на їх поверхні матеріалів, які за своїми властивостями відрізняються від основного металу, але найбільше відповідають умовам експлуатації (спрацювання, корозія, хімічний вплив тощо).

Під час зміни стану (модифікації) поверхневого шару відбувається фізико-хімічне спрацювання в металі, яке підвищує його опір руйнуванню.

Модифікування поверхневого шару переважно здійснюють за допомогою деформаційного зміцнення, поверхневої термообробки, дифузійного нанесення легуючих елементів.

Не існує універсального методу зміцнення деталей, оскільки той самий метод в одних умовах експлуатації має позитивний ефект, а в інших – негативний. Тому в деяких випадках надають перевагу комбінованому зміцненню деталей, заснованому на застосуванні двох або трьох методів зміцнення, кожен з яких дозволяє посилити ту чи іншу експлуатаційну якість. Крім того, вибір того чи іншого методу поверхневого зміцнення залежить від економічних міркувань.

4.2. Класифікація методів зміцнювальної обробки деталей машин

Усі відомі методи зміцнення розподілені на 6 основних класів: зміцнення з утворенням плівки на поверхні; зі зміною хімічного складу поверхневого шару; зі зміною структури поверхневого шару; зі зміною енергетичного запасу поверхневого шару; зі зміною мікрогеометрії поверхні з наклепом; змінюванням структури усього об'єму металу.

4.2.1. Зміцнення з утворенням плівки на поверхні

До методів зміцнення з утворенням плівки на поверхні належать:

а) осадження в результаті хімічної реакції (оксидування, сульфидування, фосфатування, нанесення зміцнювального мастильного матеріалу, осадження з газової фази);

б) осадження з випарів (термічне випаровування тугоплавких сполук, катодно-іонне бомбардування, пряме електронно-променеве випаровування, реактивне електронно-променеве випаровування, електронно-хімічне випаровування);

в) електролітичне осадження (хромування, нікелювання, електрофорез, нікельфосфатування, борування, борохромування, хромофосфатування);

г) наплення зносостійких з'єднань (плазмове наплення порошкових матеріалів, детонаційне наплення, електродугове, лазерне, вихрове, індукційне припікання порошкових матеріалів).

4.2.2. Зміцнення зі зміною хімічного складу поверхневого шару металу

Існують такі методи зміцнення зі зміною хімічного складу поверхневого шару металу:

а) дифузійне насичення (ціанування, азотування, нітроцементация тощо);

б) хімічна й фізико-хімічна дія (хімічна обробка, іонна імплантація, електроіскрова обробка тощо).

4.2.3. Зміцнення зі зміною структури поверхневого шару

До методів зміцнення зі зміною структури поверхневого шару належать:

- а) фізико-термічна обробка (лазерне гартування, плазмове гартування);
- б) електрофізична обробка (електроконтактна, електроерозійна, магнітна);
- в) механічна обробка (зміцнення вібрацією, фрикційно-зміцнювальна, дробоструминна, обробка вибухом, термомеханічна, електромеханічна);
- г) напилення легуючих елементів (газовим полум'ям, електричною дугою, плазмою, лазерним променем, пучком іонів тощо).

4.2.4. Зміцнення зі зміною енергетичного запасу поверхневого шару

Існують такі методи зміцнення зі змінюванням енергетичного запасу поверхневого шару:

- а) обробка в магнітному полі (термомагнітна, обробка імпульсним магнітним та власне магнітним полем);
- б) обробка в електричному полі.

4.2.5. Зміцнення зі зміною мікрогеометрії поверхні з наклепом

До методів зміцнення зі зміною мікрогеометрії поверхні з наклепом відносять:

- а) обробку різанням (точіння, шліфування, надшвидкісне різання);
- б) пластичне деформування (накочування, обкочування, розкочування, вигладжування, вібронакочування, вібровигладжування, калібрування, відцентрово-ударне, віброударне зміцнення тощо);
- в) комбіновані методи (анодно-механічна обробка, поверхневе легування з вигладжуванням, різання із впливом ультразвукових коливань, магнітно-абразивна обробка та ін.).

4.2.6. Зміцнення зі зміною структури всього об'єму металу

Виділяють такі методи зміцнення зі зміною структури всього об'єму металу:

- а) термообробка за температурами, вищими 0°C (гартування, відпуск, поліпшення, гартування струмами високої частоти, нормалізація, термомагнітна обробка);
- б) кріогенна обробка (гартування з обробкою холодом, термоцикування).

Контрольні запитання і завдання

1. Класифікуйте методи зміцнювальної обробки деталей машин.
2. Поясніть, як відбувається зміцнення поверхні деталей машин у процесі утворення захисної плівки.
3. Яким чином можна змінити хімічний склад поверхневого шару металів?
4. Як відбувається зміцнення поверхні деталей машин під час наклепу?
5. За рахунок чого можливе зміцнення металу по всьому об'єму?

Розділ 5

ЗМІЦНЕННЯ ПІД ЧАС ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалу деталі суттєво відрізняються від внутрішніх. Ці відмінності обумовлені спадковістю обробки та впливом експлуатаційних умов.

Атоми, які знаходяться на поверхні деталей, мають однобічні зв'язки з металом, що обумовлює їх активізацію, у результаті чого поверхня деталі адсорбує атоми елементів навколишнього середовища. Дифузійні процеси в поверхневому шарі притаманна поява різних сполук основного металу та речовин, що проникають ззовні. Можливий також перерозподіл легуючих елементів у поверхневому шарі, який призводить до зниження робочих властивостей деталей. Механічний, тепловий, магнітоелектричний, світловий та інші види зовнішніх впливів спричиняють збільшення спрацьовування поверхневих шарів деталі, його ерозії, кавітації, корозії, появу тріщин від утомленості тощо. При цьому суттєво погіршується робота поверхневих шарів із урахуванням негативних впливів у процесі обробки деталей або складання елементів конструкцій, які супроводжуються появою на поверхні рисок, подряпин, ум'ятин, задирок та інших дефектів.

Навіть у разі ретельної механічної обробки важко запобігти мікроскопічним подряпинам на поверхні, які є місцем концентрації напружень. Найбільш сприятливий мікрорельєф поверхні деталі може бути поверхневим зміцненням, що створює на ній залишкові стискувальні напруження. У результаті підвищуються твердість, міцність, опір відриву та утомна міцність поверхневого шару.

Поверхнєве зміцнення завдяки стабільним залишковим напруженням стискування, наклепу та сприятливому мікропрофілю поверхні підвищує витривалість деталей порівняно з механічною обробкою у 2 – 2,5 рази і більше, частково або повністю знижує шкідливий для витривалості деталей вплив конструктивних концентраторів напружень, покриттів і корозійних середовищ.

Основним технологічним способом поверхневого зміцнення є зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД).

Сутність ППД полягає у створенні нерівномірної деформації поверхневого шару конструкції у пружно-пластичній та пластичній сферах, після якої в процесі розвантаження в цьому шарі виникають напруження стискування високої інтенсивності. Ці напруження врівноважуються залишковими напруженнями розтягування низької інтенсивності в серединних шарах матеріалу.

Технологію ППД застосовують практично до всіх конструкцій із металевих матеріалів, зокрема, у механічному, заготівельно-штампувальному, слюсарно-зварювальному та складальному виробництвах.

Тривалими дослідженнями встановлено, що довговічність, а отже, і ресурс деталей із конкретного матеріалу визначають станом поверхневого шару

та його пошкодженням і меншою мірою станом внутрішніх шарів матеріалу деталей. Тому одним із основних питань, які необхідно вирішити під час проектування та виготовлення конструкцій, є забезпечення високої опірності поверхневого шару.

5.1. Класифікація та сфери найбільш раціонального застосування методів зміцнення поверхневого пластичного деформування деталей

Відповідно до ГОСТу 18296-72 методи ППД поділяють на статичні й ударні. У випадку застосування статичних методів обробки інструмент, робочі тіла або середовище впливають на оброблювану поверхню з певною постійною силою P , відбувається плавне переміщення осередків впливу послідовно по всій оброблюваній поверхні.

У разі застосування ударних методів інструмент, робочі тіла або середовище багаторазово впливають на всю оброблювану поверхню або її частину, у результаті чого сила впливу P у кожному циклі змінюється від нуля або деякого значення P до максимуму, а у випадку локальної ударної дії осередок деформування може (як і в статичних методах) послідовно та рівномірно проходити через усю поверхню.

Для ППД як інструмент можуть бути використані ролик, куля з примусовою віссю обертання або без неї, гладилки, дорн з нерізальними кільцями, бойок тощо; як робочі тіла використовують шріт, кульки зі скла, пластмаси та ін.; робочим середовищем можуть бути рідина, газ і їх суспензії з частинками абразиву.

За способом додавання енергії зміцнювальним частинкам струминні процеси освоювали в такій послідовності: пневматичні установки (форсунки), гравітаційні та струминно-механічні апарати.

5.1.1. Ударні способи обробки

Шротоударний спосіб обробки найпоширеніший. Він заснований на застосуванні кінетичної енергії рухомого шроту, який розганяють механічно стиснутим повітрям, рідиною під тиском, гравітацією тощо.

Як робоче тіло використовують переважно сталевий шріт, виготовлений із кольорових сплавів і неметалів, головним чином зі скла. Розміри шроту залежно від призначення можуть змінюватися від 50 мкм до 6 мм.

Спосіб застосовують для зміцнення практично всіх типів деталей і металевих матеріалів для суцільної обробки під час їх виготовлення (можливе застосування для формування), а також місцевої обробки, у тому числі під час збирання або ремонту. Прийняте позначення методу шротоударного зміцнення – ШЗ. Якщо розгін кульок, які знаходяться в замкненому об'ємі, здійснює енергія стиснутого повітря, що надходить у цей об'єм, то такий метод називають пневмодинамічним і позначають ПДЗ.

Барабанно-ударний спосіб обробки заснований на використанні енергії зміцнювального середовища, створюваної за рахунок її розгону центробіжними

силами та гравітацією. Зміцнювані деталі встановлюють на щитах, які складають частину стінок барабана прямокутної чи шестигранної форми, або по осі барабана. Як робоче середовище використовують частинки кубічної форми з високоміцних алюмінієвих сплавів або сталей у випадку зміцнення деталей, виготовлених із високоміцних матеріалів. У процесі обробки під час обертання барабана частинки робочого середовища розганяються, але у верхній точці відриваються від поверхні розгону, потрапляють на поверхню деталі, зміцнюючи її. Цей спосіб застосовують переважно для зміцнення деталей каркасів із алюмінієвих сплавів із тонкими стінками. Він об'єктивний щодо зміцнення та контролю якості. Недолік способу – невелика глибина зміцненого шару й нерівномірність його на поверхні деталі внаслідок будь-якої орієнтації ділянок деталі відносно напрямку обертання барабана. Спосіб досить продуктивний. Умовне позначення – БЗ.

Віброударний спосіб полягає в застосуванні енергії віброуючого середовища. Як робоче тіло використовують сталеві кульки, абразивні гранули тощо. Сутність способу: робоче середовище та оброблювані деталі, розміщені в контейнері (резервуарі) віброустановки, зазнають механічних коливань із прискореннями до 10–15 g, у результаті чого частинки робочого середовища набувають енергії, достатньої для здійснення пластичної деформації поверхневого шару деталі. Висока рухомість частинок середовища забезпечує рівномірність і стабільність величини наклепу та значень залишкових напружень у поверхневому шарі деталей. Для даного способу характерні простота, висока продуктивність ті великі технологічні можливості: здатністю оброблювати деталі будь-яких розмірів і форм незалежно від матеріалу.

Віброзміцнення (ВЗ) у середовищі сталевих кульок дає найкращі результати та має іншу назву – *вібронаклеп (ВН)*. Віброзміцнення в середовищі наповнювача з абразивних частинок (гранул), що забезпечує велике зняття металу за порівняно невеликого підвищення його міцності від утомленості, називають *віброшліфуванням (ВШ)*.

Інтенсивність зміцнення віброударним способом обмежена, якщо потрібна велика глибина зміцнення (для сталей більше 0,3 мм, для алюмінієвих сплавів – більше 0,4 – 0,5 мм), найкраще застосовувати дробоударний спосіб.

Зміцнення деталей, завантажених для ППД у контейнер з абразивом, який здійснює прямолінійний зворотно-поступальний рух, називають *пульсуючим шліфуванням (ПШ)*.

Абразивний матеріал у контейнері відповідно до цього методу зміцнення ППД знаходиться у вільному стані та під час руху через велику інерційну масу зберігає свій статичний стан.

Завдяки тому, що абразивний матеріал нерухомий, а оброблювана деталь здійснює в контейнері зворотно-поступальний рух, відбувається переміщення абразивного середовища по поверхні обробки, спричиняючи зняття металу. Таким чином здійснюють об'ємну абразивну обробку. Одночасно з механізованою зачисткою відбувається зміцнення оброблюваних деталей. Для ПШ характерні такі параметри: амплітуда пульсування для сталевих деталей

110 ... 150 мм, частота 300 ... 500 коливань/хв, для алюмінієвих сплавів відповідно 80 ... 90 мм і 200 ... 400 коливань/хв.

Крім вищеописаних існує низка способів ударного зміцнення, які застосовують у виробництві різних деталей. Їх можна об'єднати в одну групу динамічних видів зміцнення. До них належать: відцентрово-ударний, ультразвуковий, чеканення, зміцнення вибухом та ін.

5.1.2. Статичні види зміцнення

Обкочуванням та розкочуванням роликками та кулями застосовують як спосіб ППД внутрішніх і зовнішніх поверхонь обертання, а також площин. Під час такої обробки може бути застосований додатковий рух вібрацією зміцнювального інструмента, що суттєво підвищує працездатність поверхонь тертя.

У процесі зміцнення за таким способом відбувається силовий вплив на поверхню робочих елементів (роликів або кульок) під час тертя кочення під дією постійного зусилля в разі пружного підтиснення робочих елементів або в умовах постійної деформації у випадку жорсткого розташування робочих елементів відносно зміцнювальної поверхні. Спосіб дозволяє створення практично будь-якої товщини зміцненого шару та може бути застосований до будь-яких матеріалів. Недоліком способу є залежність якості зміцнення від рівня кваліфікації виконавця, оскільки обробку здійснюють переважно на універсальних металорізальних верстатах із використанням спеціальних пристроїв, що потребують наладки.

Процеси обкочування та розкочування супроводжує змінювання діаметрів обкочуваної деталі в межах 0,005 ... 0,03 мм, що потребує встановлення відповідних припусків.

Вигладжування поверхні алмазними та твердосплавними інденторами застосовують для тих же цілей, що й розкочування та обкочування. Інструмент розсуває метал, створюючи канавку на поверхні. Після кожного оберту оброблюваної деталі канавка (слід вигладжувача) переміщується в осьовому напрямку на відстань, яка дорівнює подачі. Відбувається багаторазове перекриття її під час наступних обертів деталі, оскільки ширина канавки більша подачі. У результаті пластичного деформування оброблюваної поверхні згладжуються вихідні нерівності й створюється новий мікрорельєф поверхні зі значно меншою висотою профілю нерівностей R , до того ж розмір деталі зменшується на величину залишкової деформації Δ .

У зв'язку з невеликою площею контакту інструмента з поверхнею для обробки потрібне відносно невелике зусилля – 200 – 300 Н, що дозволяє застосовувати цей спосіб для зміцнення тонкостінних деталей.

Іншою перевагою способу є можливість вигладжування твердих і крихких покриттів і шарів.

Спосіб вигладжування має такі самі недоліки, що й попередній.

Дорнування отвору – один із основних технологічних способів підвищення ресурсів болтових з'єднань. Дорнування створює в поверхневому

шарі отвори, залишкові напруження стискування шляхом перепускання дорна крізь отвір з натягом безпосередньо або крізь проміжкові (розрізні або суцільні) втулки. За призначенням дорнування поділяють на поверхнєве та об'ємне. В останньому випадку пластична плинність відбувається по всьому поперечному перерізу оброблюваної деталі. За призначенням поверхнєве дорнування може бути згладжувальним, калібрувальним і зміцнювальним. Різновидом є гідродорнування, під час якого між поверхнями зубів дорна та оброблюваною поверхнею відбувається постійне витікання рідкого мастила. Для поверхнєвого дорнування характерні натяг (різниця вихідного діаметра отвору та діаметра дорна); сила тяги, швидкість дорнування та геометричні характеристики дорна. У ході дорнування прикладена сила може бути штовхальною (дорн стискування) або тягучою (дорн розтягування). Після дорнування потрібне калібрування отворів різальним інструментом для забезпечення встановленої точності. Якщо деформувальні шари металу не торкаються опорної плити пристрою, торцевий наплив металу її спотворення твірної за опорним торцем стають значно більшими порівняно зі спотвореннями верхнього торця. Ці спотворення можна зменшити, якщо обробку проводити в пристроях, які забезпечують затиск оброблюваної деталі по торцях. Вилучення механічною обробкою матеріалу із зазначених зон знижує ефективність зміцнення. Дорнування можна здійснювати на спеціалізованих горизонтально- чи вертикально-протяжних верстатах або за допомогою спеціального технологічного обладнання. Процес позначають літерою «Д».

5.2. Основні правила призначення та вибір методів зміцнення поверхнєвим пластичним деформуванням елементів конструкцій

Зміцнення ППД бажано проводити за всіма поверхнями деталей і вузлів, тому доцільніше призначати його в таких випадках роботи елементів конструкції:

1. Повторні навантаження в умовах розтягання, розтягання-стискування, згину та скручування.
 2. Тривалий вплив статичних навантажень розтягання, здатних спричинити руйнування від корозії під напругою або інші види крихкого руйнування.
 3. Наявність мікропереміщень, здатних призвести до фретинг-корозії.
 4. Для посилення захисту від корозії (загальної, пітингової та ін.), якщо вона можлива в умовах експлуатації.
 5. Якщо у процесі виготовлення конструкції в поверхнєвій зоні можуть виникнути м'які або тверді шари (зневуглецювання, припалювання, альфований шар).
 6. За наявності крихкого покриття (хромування, анодування).
 7. У разі можливості виникнення поверхневих та підповерхневих дефектів типу пор і вкраплень (для лиття та суцільних зварювальних з'єднань).
- Вибір технологічних засобів зміцнення ППД здійснюють на основі

технологічних особливостей конструкції, зважаючи на такі умови:

- габарити деталей мають відповідати можливостям того чи іншого виду устаткування;
- за складністю геометричних форм обирають метод зміцнення, технології та устаткування, а за жорсткістю деталі – можливість проведення зміцнення без викривлення форм;
- від товщини стінок залежить вибір оптимальних режимів і умов зміцнення;
- за наявністю, характером і глибиною послабленого поверхневого шару визначають можливості його повного або часткового вилучення або зміцнення на величину, яка перевищує глибину послабленого шару;
- наявність на деталях дефектів на кшталт мікротріщин у результаті впливу крихких шарів і покриттів враховують для встановлення глибини зміцненого шару, що гальмує поширення таких дефектів;
- раціональність застосування одного або декількох методів зміцнення з'ясовують за точністю і шорсткістю різних поверхонь на одній деталі;
- місце зміцнювальної операції в технологічному процесі виготовлення або збирання залежить від технології визначення елементів конструкцій;
- можливість одночасного зміцнення декількох деталей;
- потрібна шорсткість поверхні служить підґрунтям для вибору методу зміцнення та обладнання, під час застосування яких можливе суміщення зміцнювальної та чистової обробки.

Під час вибору методів і засобів зміцнення ППД необхідно також враховувати технічні можливості досягнення мінімальних шорсткостей і продуктивність устаткування (табл. 1).

Матеріали для робочих тіл інструментів мають вищі фізико-механічні властивості, ніж матеріали оброблюваних деталей, зокрема: високу твердість, здатність протистояти стиранню та ударним навантаженням під час ППД, високу межу міцності на стискування, низький коефіцієнт тертя по металу, велику теплопровідність і теплоємність, властивість оброблювати поверхню до отримання мінімальної шорсткості, високу адгезійну здатність.

Таблиця 1

Залежність шорсткості поверхні від виду зміцнення

Вид зміцнення	Продуктивність зміцнення, м ² /г	Шорсткість, якої треба досягнути, мкм
Струминно-механічний	20 - 30	2,5
Барабанно-ударний	4 - 5	1,25
Вібраційний	0,5 – 1,5	0,63

5.3. Параметри робочих тіл, середовищ та інструментів, застосовуваних під час поверхневого пластичного деформування

Кулі та ролики застосовувані для ППД, виготовляють з підшипникових сталей ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, 18ХГТ, 20Х2Н4ВА, в особливих випадках користуються корозійностійкими сталями 11Х18М, 95Х18, а також

теплостійкою вольфрамованадієвою сталлю 8Х4В9Ф2.

Як матеріал для ударних інструментів використовують інструментальні сталі високої теплостійкості У10, У10А, нормальної теплостійкості Р18, Р6АМ5, підвищеної теплостійкості Р6М5К5, Р9М4К8, Р9К5, а також сплави, які мають високу теплостійкість.

Інструмент для поверхневого дорнування, а в деяких випадках обкатні ролики, гладилки та інше виготовляють з твердих сплавів, які, маючи низку переваг, гірше сприймають ударні та згинальні навантаження. Тверді сплави застосовують залежно від експлуатаційних навантажень.

Для виготовлення вигладжувачів застосовують природні та синтетичні алмази. Синтетичні алмази із зерном розміром більше 3 мм у вигляді полікристалів отримали назву балас (АСБ) та карбонідо (АСПК) за аналогією з найменуваннями відповідних природних алмазів. Алмази АСБ мають кулеподібну форму з чітко вираженою радіально-променевою структурою, розміри їх зерен досягають 6 мм.

5.4. Підготовка поверхонь до зміцнення способом поверхневого пластичного деформування

Поверхні деталей, які підлягають зміцненню, мають бути без дефектів (подряпин, забоїн, слідів корозії тощо). Допустима зачистка місцевих дефектів перед поверхневим зміцненням. Гострі кромки округлені радіусом, не меншим 0,5 ... 1,0 мм. Має бути плавний перехід у місцях з'єднань. Радіуси галтелей та інших з'єднань мають бути не менш 3 мм. У разі наявності з'єднань радіусом, меншим 3 мм, їх рекомендують до зміцнення піддавати піскоструминній обробці. Враховуючи, що підготовка поверхні, особливо для деталей з титанових сплавів, має важливе значення, у ряді випадків застосовують спеціальні заходи щодо зачищення поверхонь.

Після механічної та термічної обробки поверхні різних деталей зачищають механічним або ручним способом до шорсткості Rz 40 мкм або Ra 2,5 мкм, а поверхні деталей у місцях концентрації напружень (у концентраторах) до Ra 2,5 мкм. До процесів спеціальної підготовки поверхонь належить округлення кромки деталей з високоміцних сталей і титанових сплавів до радіусів 1 ... 0,5 мм, а деталей з алюмінієвих сплавів – до радіусів 1,5 ... 0,5 мм. Це округлення необхідне, щоб попередити утворення напливів під час поверхневого зміцнення, які різко знижують його ефект. Безпосередньо перед зміцненням деталі піддаються промиванню, знежиренню в антикорозійних розчинах і сушінню. Для ділянок, які не підлягають зміцненню, застосовують спеціальні покриття для захищення. Шорсткість поверхонь деталей перед зміцненням після механічної обробки не повинна перевищувати:

- для сталей Ra 2,5;
- деталей з алюмінієвих сплавів Ra 5;
- деталей, які підлягають після зміцнення хромуванню, Ra 1,25.

Деталі з алюмінієвих сплавів, поверхні яких механічно не обробляють

(після штампування, пресування тощо), можна не зміцнювати, якщо це спеціально не обумовлено технічними вимогами.

Поверхню деталей із шорсткістю Ra 5, виготовлених точним литтям, зміцнюють вібронаклепом без попередньої їх підготовки.

Для поверхонь після термічної та механічної обробки, виконаних з Ra 5 і грубіше, застосовують віброполірування або віброшліфування з подальшим вібронаклепом. Віброшліфування таких поверхонь рекомендовано, якщо у деталі є концентратори напружень, які не сполучаються з точними поверхнями.

Перед алмазним вигладжуванням вихідна поверхня повинна мати шорсткість у межах Ra 1,25.

Контрольні запитання і завдання

1. Охарактеризуйте ударні способи зміцнення.
2. У чому сутність статичних способів зміцнення?
3. Назвіть основні правила вибору способів зміцнення ППД.
4. Охарактеризуйте матеріали, які застосовують для виготовлення інструментів під час ППД.
5. У чому полягає підготовка поверхні перед зміцненням ППД?

Розділ 6 ОСНОВИ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

6.1. Хіміко-термічна обробка

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають термічну обробку, яка полягає в сполученні термічного і хімічного впливу для зміни складу, структури та властивостей поверхневого шару сталі.

ХТО – найбільш поширений вид обробки матеріалів для надання їм експлуатаційних властивостей. Найбільш широко застосовують методи насичування поверхневого шару сталі вуглецем або азотом, або обома цими елементами. Відповідно розрізняють наступні процеси: цементації – науглецевування поверхні, азотування – насичення поверхні сталі азотом, нітроцементації та ціанування – одночасного введення в поверхневі шари сталі вуглецю та азоту. Іноді застосовують насичення поверхневих шарів сталі іншими елементами (хромом – дифузійне хромування, бором – борування, кремнієм – силіцирування та алюмінієм – алітирування).

Процес ХТО – це багатоступінчастий процес, який відбувається в три послідовні стадії:

1. Утворення активних атомів у насичуючому середовищі поблизу поверхні або безпосередньо на поверхні металу. Потужність дифузійного потоку, тобто кількість створених в одиницю часу активних атомів, залежить від складу та агрегатного стану насичуючого середовища, яке може бути твердим, рідким або газоподібним, взаємодії окремих складників між собою, температури, тиску та хімічного складу сталі.

2. Адсорбція (сорбція) утворених активних атомів поверхнею насичення. Адсорбція – складний процес, який відбувається на поверхні насичення нестационарним способом. Розрізняють фізичну (зворотну) адсорбцію та хімічну адсорбцію (хемосорбцію). У процесі ХТО ці типи адсорбції накладаються один на одного. Фізична адсорбція зумовлює зчеплення адсорбованих атомів насичуючого елемента (адсорбентом) завдяки дії ван-дер-ваальсівських сил. Для неї характерна легка оборотність процесу адсорбції – десорбція. Під час хемосорбції відбувається взаємодія між атомами адсорбату та адсорбенту, що за своїми властивостями і силою близька до хімічної.

3. Дифузія – переміщення адсорбованих атомів в ґратах оброблюваного металу. Дифузії можлива тільки за умови розчинності дифундуючого елемента в оброблюваному матеріалі та достатньо високої температури, яка забезпечує енергією, необхідну для здійснення цього процесу.

Товщина дифузійного шару, а отже, і товщина зміцненого шару поверхні виробу є найважливіша характеристика ХТО. Товщину шару визначають рядом таких факторів, як температура насичення, тривалість процесу насичення (рис. 17), склад сталі, тобто вміст тих чи інших легуючих елементів; градієнт концентрацій насичуючого елемента між поверхнею та межею насичуючого шару в глибині виробу.

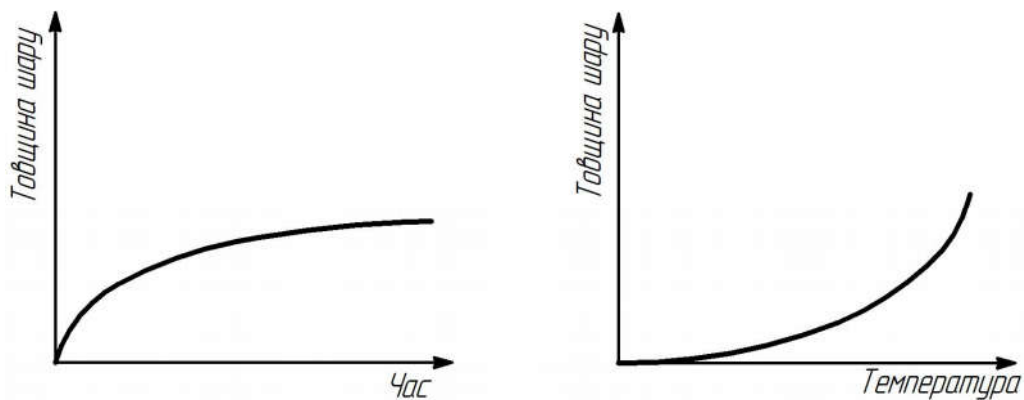


Рис. 17. Глибина дифузійного шару залежно від тривалості процесу та температури

6.2. Цементация

Цементациєю називають процес високотемпературного насичення поверхневого шару сталі вуглецем. Через те що вуглець в α -фазі майже нерозчинений, процес цементациї здійснюють в інтервалі температур 930 ... 950 °С, тобто вище $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворювання. Структура поверхневого шару цементованого виробу являє собою структуру заевтектоїдної сталі (перліт і цементит вторинний), тому для надання сталі остаточних експлуатаційних властивостей після процесу цементациї необхідно здійснити термічну обробку, що складається із гартування та низького відпуску; температурно-часові параметри режиму термічної обробки встановлюють залежно від хімічного складу сталі, призначення та геометричних розмірів цементованого виробу. Звичайно застосовують гартування від температури цементациї безпосередньо після закінчення процесу хіміко-термічної обробки або після охолодження до 800 ... 850 °С та повторного нагрівання центральної (нецементованої) частини виробу. Після гартування відбувається відпуск за температури 160...180 °С.

Цементацию як процес ХТО переважно застосовують для низьковуглецевих сталей типу Ст2, Ст3, 08, 10, 15, 20, 15Х, 20Х, 20ХНМ, 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ, 15ХГНТА, 12ХН3А, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА та ін., проте в ряді випадків цементация застосовується для обробки деталей шарикопідшипників із сталей ШХ15, 7Х3 та деталей із корозійностійких сталей типу 10Х13, 20Х13 та ін. Сталі, пропоновані для цементациї, повинні мати якісне прогартування та загартування цементованого шару, що забезпечують потрібний рівень міцності, зносостійкості та твердості. Прогартування «серцевини» регулюють вузьким діапазоном твердостей, який становить 30 ... 40 HRC. Через тривалість процесу цементациї та високу температуру рекомендовано використовувати спадкоємні дрібнозернисті сталі, розмір зерна яких не перевищує 6 – 8 балів. В іншому випадку в ході цементациї спостерігається значне зростання зерна «серцевини» виробу, що призводить до зниження його експлуатаційних властивостей.

Цементация відбувається у вуглеценасичених твердих, рідких або

газоподібних середовищах, у спеціальних контейнерах, що мають назву карбюризатори.

Під час твердофазної цементації процес здійснюють таким чином. Деталі для цементації упаковують у цементацийні ящики (карбюризатори) так, щоб їх об'єм залежно від складності конструкції деталі займав від 15 до 30% об'єму цементацийного ящика. Ящики завантажують у піч, нагріту до температури від 600 ... 700 °С та нагрівають до температури цементації 930 ... 950 °С. По закінченні процесу цементації ящики виймаються з печі. Охолодження деталей здійснюється на повітрі без виймання з цементацийних ящиків.

Недоліками цементації в твердих карбюризаторах є: неможливість регулювання ступеня насичення та неможливість проведення гартування безпосередньо після цементації, додаткова непродуктивна витрата енергії на прогрівання цементацийних ящиків тощо. Проте простота методу, можливість проводити процес на стандартному пічному обладнанні без встановлення додаткових пристроїв роблять цей метод поширеним в умовах дрібносерійного виробництва ремонтних цехів і дільниць крупних підприємств.

Цементацию в рідкофазному карбюризаторі застосовують для дрібних деталей. Недоліками цього процесу вважають нерівномірність глибини цементованого шару та необхідність частих регенерацій вуглецьнасиченого розплаву.

У випадку серійного та крупносерійного виробництва цементованих виробів найбільшого поширення набула цементация в газоподібних карбюризаторах. Цей метод забезпечує найбільшу рівномірність по товщині та властивостях цементованого шару, зменшує час, витрачений на процес хіміко-термічної обробки, а в ряді випадків дозволяє проводити гартування виробів безпосередньо після цементації. Останнім часом набув поширення процес вакуумної цементації. Печі для вакуумної цементації складаються з нагрівальної камери, що має вентилятор для забезпечення інтенсивної циркуляції повітря, гартувального баку та транспортних приладів. Підготовлені для вакуумної цементації деталі поміщають у нагрівальну піч, вакуумують і нагрівають до 1000 ... 1100 °С, потім у піч подають газоподібний карбюризатор – очищений природний газ, пропан або бутан. Цей метод дозволяє прискорити процес цементації, підвищити якість отриманого шару.

Якість процесу цементації оцінюють за ефективною товщиною цементованого шару, яку встановлюють за одним з двох показників – твердості або структури шару. Структура поверхневого шару цементованої сталі має декілька зон: поверхневу – заевтектоїдну (перліт + цементит), евтектоїдну – перлітну та доевтектоїдну – перлітоферитну. Ефективну товщину цементованого шару за структурою вимірюють за металографічними шліфами у відпаленому стані за збільшення від 100 до 500 разів.

У випадку, якщо критерієм оцінки товщини цементованого шару вважають твердість або мікротвердість після цементації, то оцінку проводять на термічно оброблених зразках, а за кінець цементованого шару беруть зону з твердістю 50 HRC або 540 ... 600 HV.

Існує ще один приблизний метод оцінки глибини цементованого шару. Метод зломів проб в загартованому стані, а також дані щодо впливу температури та тривалість цементації на глибину шару за зломом загартованих проб (табл. 2). Такий метод є найпоширеніший для оцінки глибини цементованого шару. Його застосовують під час твердофазної цементації. Суть методу: в середині передньої стінки цементаційного ящика встановлюють пробні прутки, які час від часу витягують і загартовують; по злому судять про глибину цементованого шару.

Таблиця 2

**Глибина цементованого шару за різних умов проведення цементації
для вуглецевих і легованих сталей**

Тривалість цементації (після досягнення температури ХТО), год	Глибина шару, мм			
	850 °C		900 °C	
	вуглецеві	леговані	вуглецеві	леговані
1	0,4	0,5	0,6	0,8
5	0,8	1,0	1,2	1,3
10	1,2	1,5	1,5	1,8
30	1,5	1,8	2,5	2,8
60	2,5	3,2	4,5	5,2

6.3. Азотування

Азотуванням називають процес дифузійного насичення поверхневого шару сталі азотом. Азотування суттєво підвищує твердість поверхневого шару, його зносостійкість, межу витриманості та опір корозії в таких середовищах, як атмосфера, вода, пара та ін. Твердість азотованого шару значно вища, ніж твердість цементованого, та зберігається під час нагрівання до високих температур (450 ... 500 °C), тоді як твердість цементованого шару, який має мартенситну структуру, зберігається тільки до 200 ... 225 °C.

Азотування проводять у дисоційованому аміаку NH_3 (25 ... 60%). На оброблюваній поверхні відбувається дисоціація NH_3 з утворенням іонів азоту, які адсорбуються поверхнею та дифундують у глибину металу.

Твердість азотованого шару на залізі невелика – близько 300 ... 350 HV. Тому азотуванню підлягають середньовуглецеві сталі, леговані Cr, Mo, V, Al, які набувають високу твердість і зносостійкість під час азотування. В легованій сталі на поверхні утворюються леговані ϵ - та γ' -фази: $(\text{Fe}, \text{M})_{2-3}\text{N}$ і $(\text{Fe}, \text{M})_4\text{N}$. Такі елементи, як Cr, Mo, V та інші, розчинені в фериті (підшар), підвищують розчинність азоту в α -фазі та створюють спеціальні нітриди MN і M_2N .

За низьких температур азотування в α -твердому розчині спочатку утворюються сегрегації на кшталт зон Гін'є-Престона. За вищих температур виникають дисперсні нітриди легуючих елементів (Cr, Mo, V та ін.). Зони Гін'є-Престона та окремі виділення нітридів перешкоджають руху дислокацій і тим самим підвищують твердість азотованого шару. Найсильніше підвищують твердість Al, Cr, Mo та V. Товщину шару леговані елементи зменшують.

Якщо головними вимогами до азотованого шару є висока твердість на

поверхні та зносостійкість, то застосовують сталь 38X2MЮА, яка містить 0,35 ... 0,42% С; 1,35 ... 1,65% Cr; 0,7 ... 1,10% Al та 0,15 ... 0,25% Мо, решта Fe. Одночасна присутність алюмінію, хрому та молібдену дозволяє підвищити твердість азотованого шару на поверхні до 1200 HV. Молібден, крім того, усуває відпускну крихкість, яка може з'являтися у разі повільного охолодження від температури азотування.

Зносостійкість азотованої сталі вища, ніж зносостійкість цементованої та загартованої. В азотованому шарі виникають залишкові напруження стискування, величина яких на поверхні становить 600 ... 800 МПа. Це підвищує межу витривалості та переносить осередок руйнування від утомленості під азотований шар. Межа витривалості гладких зразків зростає на 30 ... 40%, а за наявності концентраторів напружень (гострих надрізів) – більше ніж на 100%.

Технологічний процес азотування передбачає декілька операцій.

1. Попередня термічна обробка заготовки. Ця операція складається із гартування та високого відпуску сталі для отримання підвищеної міцності та в'язкості в «серцевині» виробу.

Відпуск проводять за високої температури 600 ... 675 °С, яка перевищує максимальну температуру наступного азотування та забезпечує отримання твердості, за якої сталь можна оброблювати різанням. Структура сталі після цього відпуску – сорбіт.

2. Механічна обробка деталей, а також шліфування, що забезпечує остаточні розміри деталі.

3. Захист ділянок, які не підлягають азотуванню, нанесенням тонкого шару (0,01 ... 0,015 мм) олова електролітичним методом або рідкого скла. Олово за температур азотування розплавляється на поверхні сталі у вигляді тонкої непроникливої для азоту плівки.

4. Азотування.

5. Остаточне шліфування або доведення виробу.

Азотування тонкостінних виробів складної конфігурації зі сталі 38X2MЮА пропонують здійснювати за 500 ... 520 °С. Тривалість процесу залежить від потрібної товщини азотованого шару. Чим вища температура азотування, тим нижча твердість азотованого шару та більша товщина шару (рис. 18). Зниження твердості азотованого шару пов'язане з коагуляцією нітридів легуючих елементів. У разі азотування бажано, аби товщина шару становила 0,3 ... 0,6 мм. За таких умов процес азотування за 500 ... 520 °С тривалий і складає 24 – 60 год.

Для прискорення процесу азотування застосовують двоступінчатий процес: спочатку азотування проводять за 500 ... 520 °С, а потім за 540 ... 560 °С. Двосторонній процес забезпечує скорочення тривалості азотування без втрати високої твердості поверхневого шару.

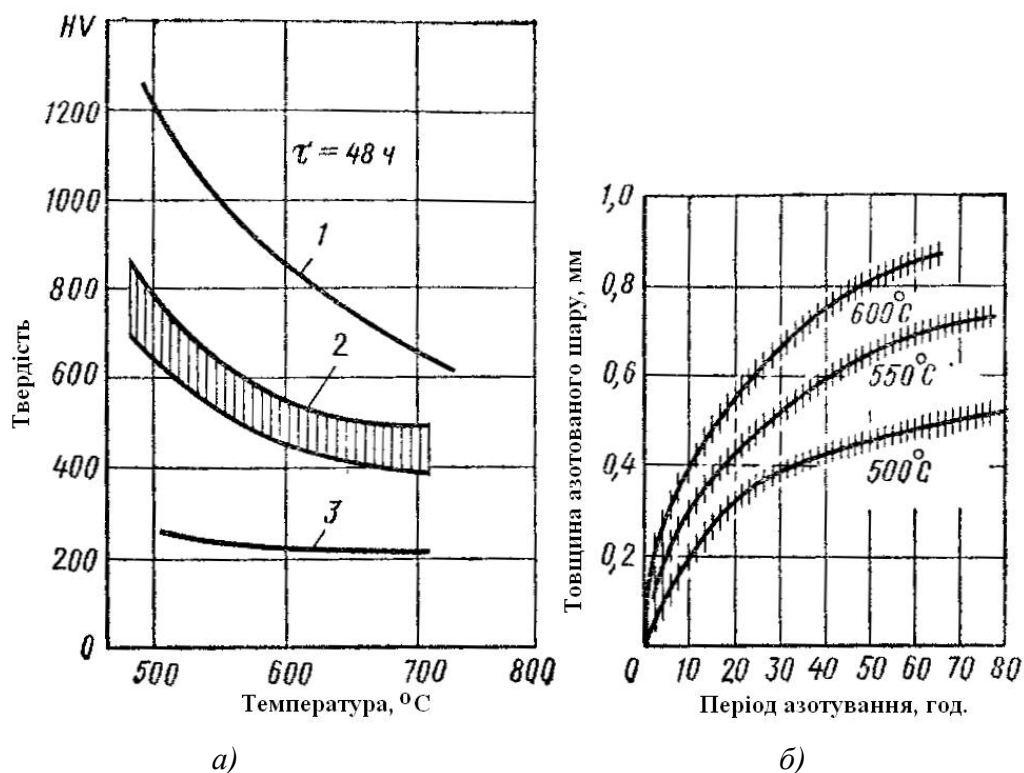


Рис 18. Вплив температури та тривалості процесу:
 а – на поверхневу твердість, б – ефективну товщину азотованого шару
 1 – сталь 38Х2МЮА; 2 – конструкційні середньовуглецеві леговані сталі,
 які не містять алюміній; 3 – вуглецеві сталі (0,2 – 0,4 % С)

6.4. Нітроцементация

Нітроцементацияю називають процес дифузійного насичення поверхневого шару сталі одночасно вуглецем і азотом за температури 840-860 °С у газовому середовищі, яке складається з науглецьовування газу та аміаку. Тривалість процесу 4 – 10 год. Основне призначення нітроцементации – підвищення твердості, зносостійкості та межі витривалості сталевих деталей.

Встановлено, що під час одночасної дифузії вуглецю та азоту прискорюється дифузія вуглецю. Швидкість зростання нітроцементованого та цементованого шарів на глибину 500 мкм практично однакова, хоча температура нітроцементации майже на 100 °С нижча температури цементации.

Для нітроцементации легованих сталей рекомендовано застосовувати контрольовану ендотермічну атмосферу, до якої додають 1,5 – 5,5 об. % необробленого природного газу та 1 ... 3,5 об. % HN_3 .

Після нітроцементации здійснюють гартування безпосередньо з печі, інколи після повторного нагрівання застосовують ступінчасте гартування. Після гартування проводять відпуск за 160 ... 180 °С.

За оптимальних умов насичення структура нітроцементованого шару складається з дрібнокристалічного мартенситу, невеликої кількості дрібних рівномірних розподілених карбонітрідів та 30 ... 50 % залишкового аустеніту.

Твердість шару після гартування та низького відпуску 58 ... 60 HRC, 570 ... 690 HV. Високий вміст остаточного аустеніту забезпечує добру припрацьовуваність, наприклад, нешліфованих автомобільних шестерень, що забезпечує їх безшумну роботу. Максимальних показників міцності досягають тільки за оптимального для даної сталі вмісту на поверхні нітроцементованого шару вуглецю та азоту.

Уміст азоту в шарі має бути не менший тієї кількості, яка усуває шкідливі наслідки внутрішнього окислювання ($\geq 0,1 \dots 0,15\%$). Висока кількість азоту ($0,4 \dots 0,5\%$) у шарі призводить до утворення так званого темного складника, який виявляється на поверхні у вигляді темної точкової сітки. Темний складник, можливо, являє собою шпари, що утворилися в результаті виділення з твердого розчину молекулярного азоту під високим тиском. Темний складник знижує межу витривалості сталі на 30 ... 70 % та межу контактної витривалості в 5 ... 6 разів. Оптимальний уміст вуглецю в сумі C + N залежить від марки сталі та має широкий діапазон у межах ($1,0 \dots 1,65\%$). За низької концентрації вуглецю у структурі шару по границях зерен мартенситу з'являється тростит. У разі високого вмісту вуглецю в сталі, яка містить Cr, Mn, Ti, V, утворюються карбонітриди, розташовані переважно по границі зерен у вигляді безперервної або розірваної сітки. Перехід вуглецю та легуючих елементів у карбонітриди знижує стійкість аустеніту, що також зумовлює створення в шарі троститу. Утворення сітки карбонітридів і троститу знижує межу витривалості, пластичність і в'язкість сталі.

Товщина нітроцементованого шару становить зазвичай 200 ... 800 мкм. Вона не повинна перевищувати 1000 мкм. У випадку більшої товщини в ньому утворюється темний складник та інші дефекти, які знижують механічні властивості сталі.

Нітроцементатії зазвичай підлягають деталі складної конфігурації, схильні до жолоблення. Порівняно з газовою цементатією нітроцементатія має такі переваги: процес відбувається за більш низької температури ($840 \dots 860^\circ\text{C}$ замість $910 \dots 930^\circ\text{C}$); товщина шару менша; зазнають менших деформацій та жолоблення деталей; підвищується опір зносу та корозії.

Нітроцементатію широко застосовують на автомобільних і тракторних заводах. Так, на ВАЗі 94,5 % деталей, які проходять хіміко-термічну обробку, піддають нітроцементатії.

6.5. Азотування штампових сталей перед гартуванням

У процесі азотування штампів значно підвищується їх твердість, теплостійкість і зносостійкість. Це пояснюють переважно тим, що під час азотування, яке здійснюють після остаточної обробки, утворюється невеликий шар і виникає значний перепад твердості між поверхневим шаром і «серцевиною». Великий інтерес у зв'язку з цим викликає азотування сталей перед гартуванням. Найбільше таким вимогам відповідають штампові сталі, а саме: високохромісті (X6BФ, X12M, X12Ф1), хромомарганцевисті 7ХГ2ВМ та

хромовольфрамів 3Х2В8Ф та 4Х5В2ФС.

Перші дві сталі змінюються мінімально в об'ємі завдяки тому, що мають малу концентрацію вуглецю в мартенситі та багато залишкового аустеніту, проте для таких сталей характерна підвищена анізотропія деформації, зумовлена впливом великої кількості надлишкових карбідів. Крім того, внаслідок підвищеної температури гартування цих сталей (980 ... 1050 °С) можлива втрата азоту.

Сталь 7ХГ2ВМ загартовують з охолодженням на повітрі, що різко зменшує жолоблення; вона має мало надлишкових карбідів і майже не чутлива до анізотропії деформацій. До того ж для сталі 7ХГ2ВМ властива низька температура гартування – 850 °С.

Сталі третьої групи мають високі температури гартування (1000 ... 1050 °С), але невеликі об'ємні зміни за малої анізотропії деформацій.

Температуру гартування обирають на 50 ... 150 °С нижчу прийнятої, яка б забезпечувала високу твердість «серцевини».

У процесі нагрівання сталі для гартування відбувається додаткова дифузія азоту всередину металу і часткове вивільнення газу в навколишнє середовище. Проте під час нагрівання деталей в солі або в захисній атмосфері втрата азоту не дуже значна і висока твердість досягається за товщини отриманого шару, не меншої 0,12 ... 0,22 мм. Ця товщина більша товщини шару, отриманого азотуванням після остаточної обробки.

Для цього азотувати треба за температури 560 ... 600 °С або 520 ... 540 °С, але тоді час азотування необхідно збільшити до 8 – 12 год.

Твердість шару, отримана після попереднього азотування та подальшого гартування, менша (800 ... 1080 НV) твердості шару, отриманого азотуванням після гартування та відпуску (1080 ... 1150 НV). Проте вона значно вища твердості шару, отриманого гартуванням неазотованої «серцевини»: 740 ... 780 НV для сталі Х12М та 700 ... 730 НV для сталі 7ХГ2ВМ.

Товщина шару значно збільшується порівняно з отриманою безпосередньо після азотування: від 0,12 ... 0,14 до 0,20 ... 0,23 мм для сталі Х12М (гартування від 950°С), від 0,19 ... 0,20 до 0,25 ... 0,27 мм для сталі 3Х2В8Ф (гартування від 1000°С), від 0,18 ... 0,20 до 0,25 ... 0,26 мм для сталі 7ХГ2ВМ (гартування від 850°С).

На твердість і товщину шару впливає склад сталі. Найбільшу твердість (1000 ... 1080 НV) після гартування та меншу товщину (0,20 ... 0,23 мм) має сталь Х12М (Х12Ф1). Навпаки, найбільшу товщину шару (0,25 ... 0,26 мм) і меншу твердість (900 ... 950 НV) має сталь 7ХГ2ВМ. Такі ж параметри азотованого шару має сталь 38ХМЮА. Проміжне положення за цими показниками займають хромовольфрамів сталі (3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС).

Різницю в твердості пояснюють різною стійкістю проти коагуляції створюваних нітридних фаз та неоднаковою дифузією азоту під час змінювання концентрації аустеніту. Найбільша стійкість властива нітридній фазі, утворюваній у вольфрамовій сталі (3Х2В8Ф), і найменша – характерна для нітридної фази в хромомарганцевистій сталі 7ХГ2ВМ.

Розвиток дифузії під час нагрівання для гартування добре впливає на механічні властивості, зменшуючи перепад твердості між шарами та «серцевиною» (табл. 3). Перепад твердості становить 200 ... 300 HV під час азотування перед гартуванням та 500 ... 700 HV під час азотування після остаточної обробки.

За даними мікроаналізу встановлено, що нітридна сітка в шарі сталі X12M і е-фаза в сталі 7ХГ2ВМ, які виявляються безпосередньо після азотування та посилюють його крихкість, відсутні в цьому ж шарі після гартування. Азотований шар загартованої сталі являє собою твердий розчин, легований азотом, з рівномірно розподіленими по всьому об'єму нітридами.

Висока твердість азотованого шару (780 ... 830 HV) зберігається після відпуску за температурою 350 °С і тільки після нагрівання до 550 °С твердість його зменшується до 730 ... 780 HV (52 ... 60 HRC), проте і після нагрівання такий показник можна вважати відносно високим (рис. 19). Теплостійкість шару, отриманого азотуванням перед гартуванням, нижча, ніж шару, отриманого після остаточної обробки, однак вища на від відміну від неазотованої «серцевини» (табл. 4).

Таблиця 3

Характеристика шару, азотованого (упродовж 12 год за температури 520°С) до гартування та після нього

Сталь	Температура гартування, °С	Шар				Твердість «серцевини» після гартування, HV
		до гартування		після гартування		
		Твердість, HV	Товщина, мм	Твердість HV	Товщина шару, мм	
X12M	900	1100...1150	0,10...0,12	950...1000	0,15...0,20	660...730
	950			1000...1080	0,18...0,22	730...750
	900			660...730	0,18...0,22	460...480
3X2B8Ф	950	1080...1100	0,18...0,20	730...780		480...490
	1000			780...830	0,20...0,24	540...560
4X5B2ФС	900	1100...1150	0,15...0,7	660...700	0,17...0,20	460...480
	1000			900...950	0,20...0,25	520...540
7ХГ2ВМ	800	1080...1150	0,18...0,20	900...-950	0,18...0,24	700...730
	850			900...950	0,20...0,25	730...740

Таблиця 4

Вплив азотування на теплостійкість шару

Сталь	Темпе- ратура гарту- вання, °C	Твердість шару (HV), азотованого						Твердість «серцевини» (HV) після нагрівання до температури 600 °C
		перед гартуванням після відпуску за температури			після гартування, відпуску та додаткового нагрівання до температури			
		350 °C	550 °C	600 °C	600 °C	650 °C	500 °C	
X12M	900	780...820	600...630	460...470			460...480	390...410
	950	830...880	630...700	510...540	950...1000	700...740	480...490	430...450
3X2B8Ф	900	660...700	620...640				450...460	420...430
	950	740...780	700...730	540...560			470...490	450...460
	1000	780...830	730...780		950...1000	790...830	510...540	480...490

4X5B2ФC	900	630...660	570...590	460...490			450...470	370...390
	1000	830...870	700...730	490...500	880...950	740...790	490...510	450...460
7XГ2ВМ	800	700...740	590...630	510...520			410...430	
	850	780...830	630...660	510...520	740...780	700...740	420...440	

У шарі, азотованому перед гартуванням, зберігається твердість (680 ... 700 HV) під час нагрівання до 500 ... 550 °С для сталі X12M і 500 ... 530 °С для сталі 7XГ2ВМ. Неазотована «серцевина» зберігає цю твердість тільки за нагрівання до 160 ... 170 °С (сталь 7XГ2ВМ) та 200 ... 220 °С (сталь X12M).

Теплостійкість сталей, легованих хромом і вольфрамом, значно збільшується. Твердість після нагрівання до температури 600 ... 625 °С упродовж 4 год зберігається в межах 490 ... 510 HV (49 ... 51 HRC). Ці сталі придатні для штамів холодного деформування у випадку значного спрацювання та під час нагрівання в першу чергу для витяжки з великою швидкістю. Теплостійкість залишається високою і у разі зниження температури гартування на 50 ... 100 °С проти прийнятих. Це дозволяє отримати в «серцевині» більш високу міцність і особливо в'язкість. Відомо, що ці властивості інструментальних сталей зростають зі зниженням температури гартування. За висновками випробувань встановлено, що попереднє азотування дозволяє створити корисні стискуючі напруження у процесі наступного гартування. Вони в півтора-два рази вищі напружень, отриманих гартуванням неазотованої «серцевини».

У зв'язку з цим міцність шару, азотованого перед гартуванням, вища, ніж міцність шару, азотованого після остаточної обробки. Міцність шару визначають під час дослідів на вигин зразків розміром 2×8×45 мм, а в'язкість – на зразках 10×10×55 мм з надрізом по Менаже для сталей 3X2ВФ та 4X5B2ФC і без надрізу для решти сталей.

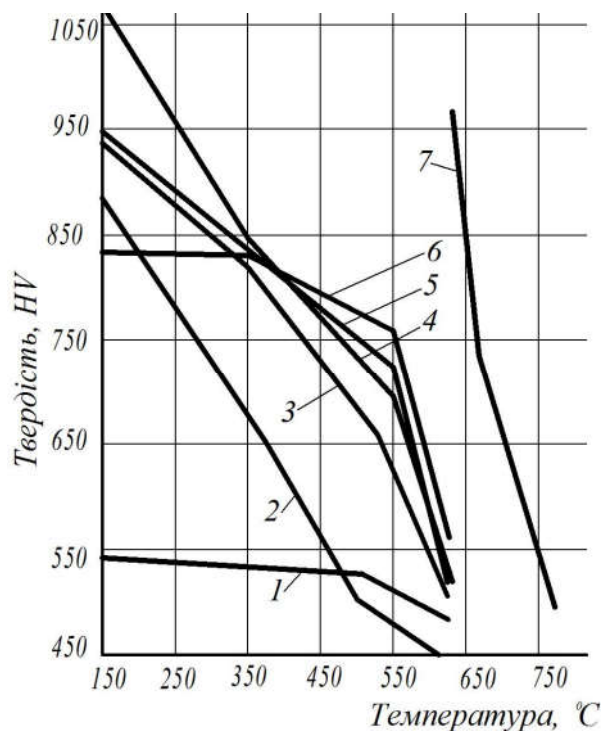


Рис. 19. Твердість шару, азотованого перед гартуванням (1 – 6) і після остаточної обробки (7):

1 – 3X2В8Ф, 2 – X18М (неазотована «серцевина»), 3 – 7XГ2ВМ, 4 – X12М, 5 – 4X5B2ФC, 6 – 3X2В8Ф, 7 – X12М

Міцність і в'язкість визначали залежно від температур гартування, виконаного після азотування, і температур відпуску для шару товщиною 0,20 ... 0,30 мм. Міцність шару сталі Х12М та в'язкість значно вищі (на 15 ... 20%), ніж міцність шару, азотованого після остаточної обробки. Міцність сталі 4Х5В2ФС зростає на 15%, а в'язкість на 20 ... 25%.

Зносостійкість шару визначали на машині Шкода-Савін тертям-коченням диска з твердого сплаву. Зносостійкість шару порівняно з неазотованою серцевиною значно збільшується: у 15 – 20 раз для сталі Х12М і в 4 – 6 раз для сталі 4Х5В2ФС. Це пояснюють більш високою твердістю азотованого шару. Проте зносостійкість цього шару менша на відміну від зносостійкості шару, отриманого азотуванням після остаточної обробки, коли він зберігає більш високу твердість – 1100 ... 1200 НV (табл. 5).

Таблиця 5

**Зносостійкість шару азотованого до гартування
та після остаточної обробки**

Сталь	Температура гартування, °С	Об'єм витертої лунки, $\times 10^{-3}$ мм ³		
		азотованого перед гартуванням	азотованого після остаточної обробки	неазотованої серцевини
Х12	850	4,8	—	1
	950	4	6	120
3Х2В8Ф	1000	20	10	75
4Х5В2ФС	900	16	—	71
	1000	12	4	—
7ХГ2ВМ	850	20...40	15...20	50...60

Висновки:

1. Азотування перед гартуванням можна застосовувати для штампованих сталей холодного та гарячого деформування, які зазнають мінімальних змін об'єму у процесі гартування (сталі Х12М, 7ХГ2ВМ, 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС).

2. Азотування перед гартуванням дозволяє значно підвищити зносостійкість, теплостійкість, товщину (що створює плавний перехід твердості від поверхні до нижчих шарів), міцність і зменшити крихкість шару порівняно з тим, що отримують азотуванням після остаточної обробки.

3. Азотування дозволяє знизити температуру гартування на 50 ... 75 °С, що підвищує в'язкість «серцевини».

4. Попереднє азотування підвищує корисні стискувальні напруження в загартованому шарі.

6.6. Технологія термічної обробки сталі у разі індукційного нагрівання

Усі деталі, що підлягають зміцнювальній термічній обробці, поділяють на дві групи.

Перша група – деталі на спрацьовування. У такому випадку зміцнювальна термічна обробка забезпечує тільки необхідні властивості поверхневого шару (твердість, зносостійкість тощо).

До другої групи належать деталі, які мають під час роботи значні навантаження: розтягальні (стискальні), згинальні, крутячі, контактні. Їх, у свою чергу, можна розділити на два класи.

До першого класу належать деталі, які у процесі експлуатації мають навантаження у вигляді розтягування та стискання. У них напруження від робочих навантажень розподіляються за перерізом більш або менш рівномірно, тому для цих деталей застосовують наскрізне гартування та відпуск.

До другого класу, найчисленнішого, належать деталі, працюючі на згин або кручення, або за високих контактних навантажень. У них напруження від прикладених робочих навантажень максимальні на поверхні та близькі до нуля в центрі поперечного перерізу. У такому випадку працездатність деталі залежить від дотримання умови, що в усіх точках поперечного перерізу деталі межа плинності $\sigma_{0,2}$ перевищує напруження від робочого навантаження σ_p :

$$\sigma_{0,2} > \sigma_p.$$

Порівняння розподілу за перерізом напружень від робочих навантажень і межі плинності матеріалу під час поверхневого зміцнення деталей показує, що для забезпечення їх працездатності, тобто для дотримання вказаної умови, за даним робочим навантаженням необхідно правильно обрати параметри властивостей і рівня зміцнення матеріалу деталі, зокрема міцність матеріалу на поверхні деталі, глибина зміцненого шару, ступінь зміцнення «серцевини».

Однаковий, порівняно високий ступінь зміцнення, достатній для роботи у випадку підвищених навантажень можна досягти, застосовуючи або відносно тонкий шар високої міцності та «серцевину» з підвищеною міцністю, або незміцнену, наприклад нормалізовану, серцевину та товщий, ніж у першому випадку, шар високої міцності. З іншого боку, за відносно тонкого шару високої міцності та незміцненої (наприклад, нормалізованої) серцевини в перерізі деталі утворюється зона зниженої міцності, де неможливе виконання необхідної умови для навантаження. У зв'язку з цим деталь працездатна тільки у випадку зменшення зовнішнього навантаження.

Таким чином, для деталей, які працюють на вигин або кручення, наскрізне зміцнення перерізу деталей на високу міцність – не обов'язкове.

За усіма методами поверхневого зміцнення (під час цементування, азотування, поверхневого гартування, поверхневого пластичного деформування) у зміцненому шарі утворюється сприятлива епюра залишкових напружень I роду (стиск в поверхневих шарах до 30 ... 60 кгс/мм²), водночас у разі наскрізного зміцнення епюра залишкових напружень є несприятлива (відсутність напружень стиску в кращому випадку та наявність розтяжних напружень на поверхню деталей – у гіршому).

Як відомо, залишкові напруження, що мають у поверхневих шарах знак стискання, суттєво підвищують міцність від втоми деталей машин, зменшують їх чутливість до концентраторів напружень та збільшують контактну міцність.

Отже, для зміцнення важконавантажених деталей машин, які у процесі експлуатації мають вигин або кручення, найбільш доцільно вдаватися не до наскрізного, а до поверхневого зміцнення. Правильне застосування останнього

дозволяє забезпечити найбільш високий рівень конструктивної міцності у разі суттєвого зниження ступеня легування сталі, тобто у випадку значної економії легуючих елементів, таких як хром, нікель, молібден, марганець.

Аналогічний підхід можна застосовувати до деталей, які працюють з високими контактними навантаженнями (наприклад, до підшипників кочення) для яких наскрізне термічне зміцнення за приблизно однакової міцності не є обов'язкове. Необхідно тільки, щоб товщина поверхневого шару високої твердості була не менша деякої мінімальної товщини, що залежить від рівня робочих контактних напружень. Наявність напружень стискання в поверхневих шарах збільшує контактну міцність і довговічність роботи деталей за високих контактних напружень. Застосування для термічної обробки індукційного нагрівання має ще й таку принципову перевагу: внаслідок високої швидкості нагрівання та малої його тривалості (під час належного встановлення температури) зерно аустеніту в процесі аустенізації не встигає вирости, як і у випадку нагрівання в печі. Під час індукційного нагрівання воно відповідає 11 ... 14 балам, як у разі нагрівання в печі 7 ... 10, тобто його площа у 15 – 30 разів більша.

Подрібнення зерна аустеніту під час індукційного гартування забезпечує відповідне зменшення розмірів кристалів мартенситу, що суттєво підвищує його міцність, і, що особливо важливо, пластичність. Підвищення пластичності мартенситу індукційного гартування не тільки дозволяє користуватися на практиці деталями з досить високою твердістю 61 ... 65 HRC без ризику крихких руйнувань, але також надійно запобігає появі тріщин у середньо- та високовуглецевих сталях під час гартування інтенсивним потоком води.

Деталі, що піддають поверхневому індукційному гартуванню, за правильного вибору сталі та режимів термічної обробки мають високу статичну міцність та міцність від утомленості, високу зносостійкість і контактну міцність, малу чутливість до концентраторів напружень.

У багатьох випадках поверхнєве індукційне гартування можна успішно застосовувати замість цементації або наскрізного гартування та відпуску, отримуючи не тільки більш високу міцність і довговічність виробів, але і значну економію легуючих елементів, зниження вартості сталі та термічної обробки, а також підвищення продуктивності праці, рівня автоматизації праці та автоматизації виробництва.

Поверхнєве індукційне гартування здійснюють у двох випадках:

- 1) поверхнєве гартування (у разі поверхневого нагрівання виробів);
- 2) об'ємно-поверхнєве гартування (у разі глибинного нагрівання).

6.7. Фізичні основи та особливості індукційного нагрівання

Принцип індукційного нагрівання. У випадку індукційного нагрівання металеве тіло поміщають у зону концентрованого магнітного поля провідника або котушки зі змінним електричним струмом (рис. 20).

Під час проходження змінного струму витками котушки (індуктора)

всередині неї утворюється магнітне поле, яке змінюється за величиною і напрямком аналогічного струму (рис. 20, а). Змінне магнітне поле, перетинаючи під час своїх змін об'єми металу, розташовані в зоні дії поля індуктора, відповідно до закону електромагнітної індукції, збуджує в їх поверхневих шарах електрорушійну силу. Об'єкт нагрівання – електропровідний, тому індуктована ЕРС (електрорушійна сила) викликає в ньому змінний струм тієї ж частоти, що і струм індуктора (рис. 20, б).

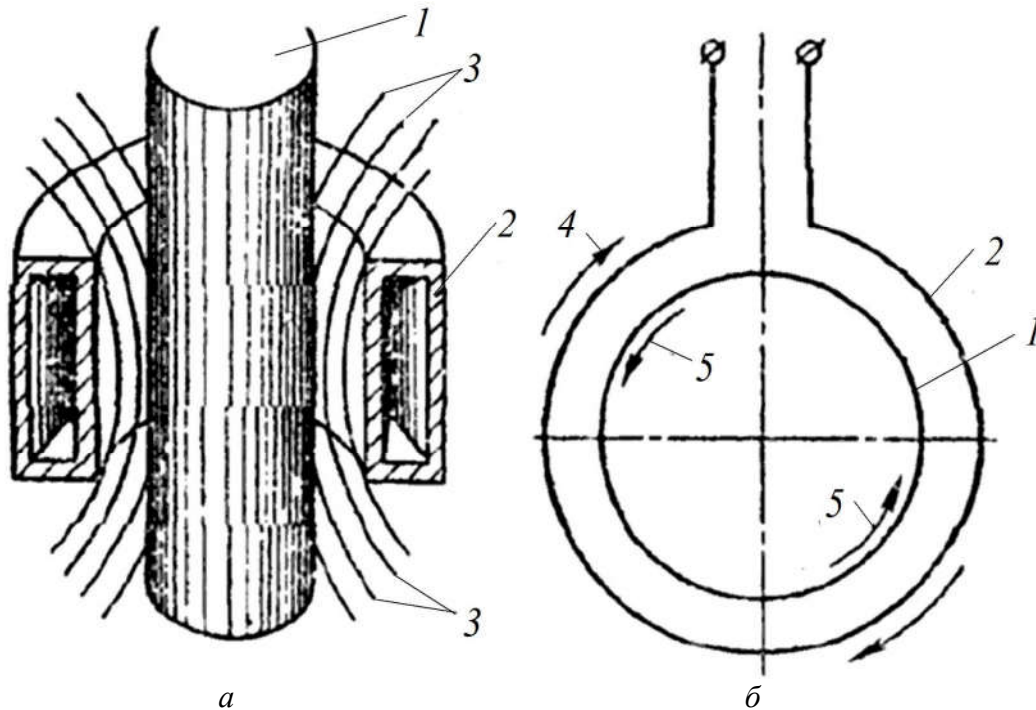


Рис. 20. Схема індукційного нагрівання:

а – розподілення магнітного потоку в індукторі; *б* – напрямки струмів у індукторі та деталі; 1 – деталь, яку нагрівають; 2 – виток індуктора; 3 – магнітні силові лінії; 4 – напрямки струму в індукторі; 5 – напрямки струму в деталі

Теплова дія індуктованого електричного струму викликає нагрівання частини деталі, яка знаходиться в зоні дії змінного магнітного поля індуктора.

Таким чином, основною відмінністю індукційного нагрівання від нагрівання в печах є виділення теплоти безпосередньо в зонах деталі, на які справляє вплив зміна магнітного поля та електричного струму. Це зумовлює високу швидкість нагрівання та можливість здійснювати місцеве зональне нагрівання.

Під час нагрівання в печах або ваннах теплота в оброблювану деталь передається за рахунок променевої енергії та конвекції, тому швидкість нагрівання сильно обмежена умовами теплопередачі із зовнішнього середовища в метал і теплопровідністю всередині останнього.

Систему індуктор – деталь, яку нагрівають, можна розглядати як електричний трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинною – контур струму в металевому об'єкті нагрівання. У такій системі у процесі нагрівання відбувається безконтактна передача електричної енергії з

первинного ланцюга – індуктора у вторинний ланцюг – виріб, де електрична енергія перетворюється на теплову.

У теорії індукційного нагрівання струм індуктора I_n та потужність, що розвивається в нагрітій деталі, P_d пов'язані співвідношенням

$$P_d = k_1 I_n^2 \sqrt{\rho \mu f}, \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт, який залежить від розмірів індуктора та деталі, що нагрівається, а отже, і від зазору між індуктором і деталлю; ρ – питомий опір, Ом·см; μ – магнітна проникність, Гс/Е; f – частота струму, Гц.

Таким чином, за інших однакових умов (розміри деталей і індуктора, незмінний струм індуктора), потужність, що розвивається у нагрівальному виробі, пропорційна кореню квадратному частоти струму. Підвищення частоти струму дозволяє концентрувати в невеликому об'ємі деталі значну потужність (до 3 ... 5 кВт/см³) і тим самим здійснювати індукційне нагрівання з великою швидкістю – до 300 ... 500 °С/с.

Поверхневий ефект. У випадку змінного струму його швидкість за перерізом провідника неоднакова. Струм протікає переважно в поверхневих шарах провідника, і при достатньо високих частотах щільність струму в «серцевині» провідника дуже мала.

Для спрощення кількісного обліку поверхневого ефекту вводять поняття про еквівалентну глибину проникнення струму. Вважають, що струм протікає по поверхні провідника тільки в шарі, який дорівнює глибині проникнення і має на цій глибині рівномірну щільність, а в більш глибоких шарах виробу струм відсутній.

Величину еквівалентної глибини проникнення струму визначають із умови, що виділення теплової енергії струму однакове як у випадку дійсного, так і умовного розподілення струму.

Глибину проникнення струму (у см) обчислюють за формулою

$$\delta \approx 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \quad (2)$$

У технічній літературі часто глибину проникнення струму по сталі за кімнатної температури називають «холодною», а по сталі, нагрітої до надкритичної температури – «гарячою».

Характер зміни питомого електричного опору та магнітної проникності визначають з існуючих для кожної сталі графічних залежностей (рис. 21).

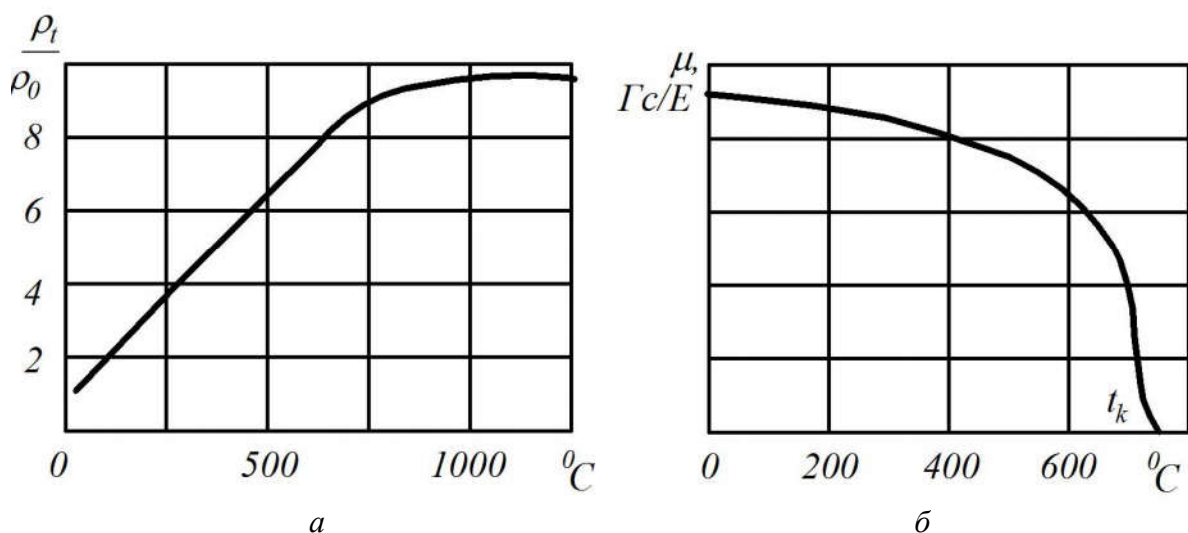


Рис. 21. Схема зміни питомого опору та магнітної проникності сталі 45 під час нагрівання (t_k – температура переходу в немагнітний стан):
а – питомого опору; б – магнітної проникності

6.8. Технологія поверхневого гартування сталі під час індукційного нагрівання

6.8.1. Фактори, які обумовлюють високий комплекс властивостей сталі після електрогартування

Як зазначалося вище, дослідження останніх років показали, що основним фактором, який забезпечує суттєве підвищення міцності та пластичності сталі, загартованої після швидкісного електронагрівання, є здрібнення зерна аустеніту і відповідне зменшення розмірів кристалів мартенситу. Чим дрібніше зерно, тим вищий опір сталі крихкому руйнуванню. Збільшення середньої площі зерна аустеніту з 40 – 50 мкм^2 (11 ... 15-й бал) до 800 мкм^2 (7 ... 8-й бал) знижує крихку міцність приблизно в 5 разів (руйнівне навантаження зменшується з 600 до 120 кгс). Для отримання найбільш дрібного зерна аустеніту під час електрогартування слід застосовувати спадково дрібнозернисті сталі; з цією метою в сталь під час виплавки вводять алюміній, титан, ванадій, ніобій та інші елементи, які утворюють в ній дисперсні частки карбідів або нітридів. Застосування дрібнодисперсних початкових структур і здрібнення термічною обробкою так званих других фаз (карбідів, нітридів) певною мірою полегшує отримання дрібного зерна аустеніту.

Інший важливий фактор, що позитивно впливає на досягнення високих властивостей сталі у процесі електрогартування, – фіксування у твердому розчині найбільшої кількості вуглецю як наслідок застосування різкого охолодження душем або потоком води. У випадку такого охолодження максимально стримують частковий розпад мартенситу під час гартування. Концентрація вуглецю в ньому визначають за допомогою низького відпуску, тому, обираючи відповідний режим відпуску, можна досягти оптимального сполучення твердості, міцності та пластичності загартованої сталі.

6.8.2. Раціональні режими індукційного нагрівання для поверхневого гартування

Під час індукційного нагрівання під гартування обраний температурно-часовий режим має забезпечити отримання якомога дрібнішого зерна аустеніту. У випадку швидкісного індукційного нагрівання температурний інтервал фазових перетворювань зміщується до більш високих температур. За таких умов у разі аустенізації утворюється більш дрібне початкове зерно аустеніту, ніж під час повільного нагрівання. Розмір зерна аустеніту залежить як від режиму нагрівання, так і від схильності сталі до зростання зерна аустеніту.

Нижче (рис. 22) зображено типові криві зростання зерна під час індукційного нагрівання. Крива 1 – природно крупнозерниста сталь, зерно якої різко зростає у разі підвищення температури, криві 2 і 3 є спадково дрібнозернистими сталями. У цих сталях є певний інтервал температур ($t_1 - t_2$), у якому зерно не зростає (крива 2) або зростає незначно (крива 3).

Характер кривих аустеніту (рис. 22) залежить головним чином від наявності в сталі часток фаз, що виділилися із основної фази (наприклад, нітридів алюмінію або карбідів титану, ванадію, ніобію), гальмуючих зростання зерна.

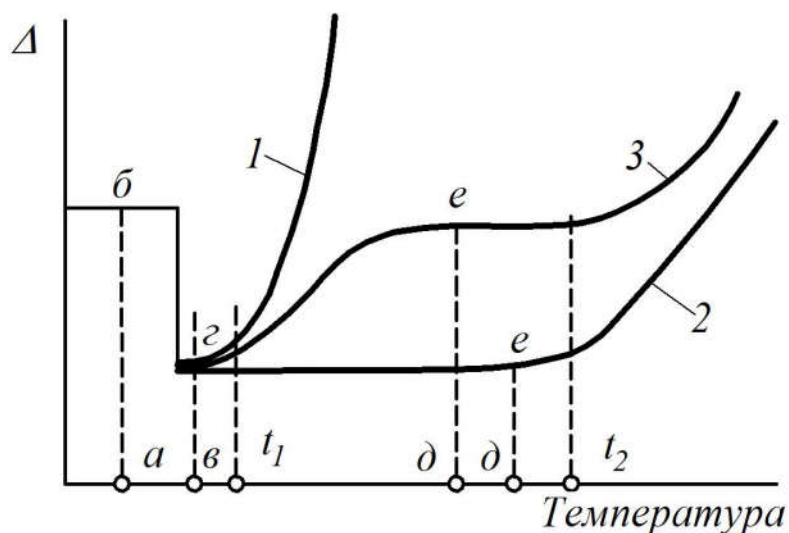


Рис. 22. Характерні залежності розміру зерна аустеніту від температури аустенізації:

$a-б$ – вихідне зерно; $в-г$ – початкове зерно; $д-е$ – стійке зерно

Середній розмір стійкого зерна аустеніту (тобто зерна, що зберігається під час нагрівання в певному інтервалі температур (рис. 22, $д-е$), може бути визначений із співвідношення

$$\Delta = k (d/f), \quad (8)$$

де k – постійний коефіцієнт, що знаходиться в межах 0,3 – 1,0; d – середній розмір часток нітридів або карбідів; f – об'ємна частка нітридів або карбідів відповідно до всього об'єму сталі.

Додаткове роздрібнення часток нітридів або карбідів можна досягнути високотемпературною термічною обробкою.

Таким чином, для отримання високих властивостей шару гартування під час нагрівання слід застосовувати температури, які за певної швидкості нагрівання забезпечують утворення стійких зерен аустеніту з розмірами, близькими до початкових (рис. 22, $d - e$).

Структури сталей, до яких застосовують поверхневе гартування, повинні мати пологі характеристики, аналогічні кривій 3 або, краще, кривій 2 (рис. 22). За таких умов температурна похибка, пов'язана з неточністю підтримання режиму нагрівання індукційним приладом або з масштабним фактором в разі нагрівання деталей складної форми, не призводить до збільшення зерна та зниження властивостей загартованої сталі.

Дані щодо розмірів зерна аустеніту, які можна мінімально досягти за різних умов нагрівання, можуть бути критерієм того, наскільки обраний режим близький до оптимального (табл. 6). Нормалізована структура доевтектоїдної сталі дозволяє отримати у випадку застосування швидкостей нагрівання широкого діапазону (від $2^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ і вище) дрібне зерно аустеніту в 11 ... 12 балів (площею 60 ... 30 мкм^2).

Таблиця 6

Типові розміри зерна аустеніту для різних видів нагрівання та вихідної структури сталей

Характер нагрівання	Тип сталі та вихідної структури	Зерно	
		Бал	Середня площа, мкм^2
нагрівання у печі до температур перегріву	доевтектоїдна сталь у нормалізованому або покращеному стані	5 ... 6	4 000 ... 2 000
нагрівання у печі до оптимальних температур	доевтектоїдна сталь у нормалізованому або покращеному стані	7 ... 3	1 000 ... 500
	заевтектоїдна сталь у стані зернистого перліту	9 ... 10	250 ... 125
індукційне нагрівання до оптимальних температур із середньою швидкістю нагрівання в області фазових перетворень $v_{\phi} < 2^{\circ}\text{C}/\text{с}$	доевтектоїдна сталь у нормалізованому стані	11 ... 12	60 ... 30
індукційне нагрівання до оптимальних температур із $v_{\phi} > 100$	Доевтектоїдна, евтектоїдна та заевтектоїдна сталі з покращеною або загартованою вихідною структурою	14 ... 15	8 ... 4
індукційне нагрівання до оптимальних температур із $2 < v_{\phi} < 100$	Доевтектоїдна, евтектоїдна та заевтектоїдна сталі з покращеною або загартованою вихідною структурою	11 ... 12	60 ... 30

Прискорене нагрівання (у разі швидкості нагрівання в області фазових перетворень, більших $100^{\circ}\text{C}/\text{с}$) сталі після поліпшення або гартування дозволяє отримувати наддрібне зерно аустеніту в 14 ... 15 балів. За контрольними цифрами (зерно в 11 ... 12 або 14 ... 15 балів) можна вибирати режими індукційного нагрівання сталі для поверхневого гартування. Швидкість нагрівання в області фазових перетворень і відповідну питому потужність слід

обирати залежно від потрібної глибини нагрівання. Чим тонший шар нагрівання, тим вища швидкість нагрівання та питома потужність (табл. 7).

Таблиця 7

Орієнтовні значення швидкості нагрівання та питомої потужності, необхідні для досягнення різних глибин нагрівання

Глибина нагрівання, мм	Швидкість нагрівання в області фазових перетворень, °C/с	Питома потужність, кВт/см ²
1 ... 2	100 ... 300	0,8 ... 1,5
3 ... 5	20 ... 80	0,5 ... 1,3
6 ... 10	2 ... 15	0,05 ... 0,2

Примітка: для глибини 1 ... 2 мм менші значення питомої потужності відповідають радіочастоті, більші – середній частоті.

Якщо деталь треба прогріти наскрізь (такі випадки трапляються в процесі виконання об'ємно-поверхневого гартування під час глибинного нагрівання), то нагрівання доцільно виконувати з ізотермічною витримкою, тривалість якої підібрана так, щоб отримати нагрівання на задану глибину. Наприклад, під час наскрізного нагрівання циліндричної деталі діаметром 50 мм необхідна ізотермічна витримка 40 ... 45 с за кінцевої температури 850 ... 870 °C та терміну підйому до цієї температури 20 – 25 с.

Вибір оптимального режиму нагрівання здійснюють таким чином. Встановлюють режим нагрівання, за якого можливо побудувати необхідну форму термічної кривої. Повторюваність режиму нагрівання краще за все контролювати приборами, які фіксують електричний режим індуктора: напруження на його затискачах, струм індуктора або струм первинної обмотки понижувального трансформатора. Надалі, під час обраної термічної кривої, тобто під час незмінного електричного режиму індуктора, здійснюють гартування декількох деталей за різним терміном нагрівання. Металографічний аналіз цих деталей, що становить так званий гартівний ряд, дозволяє визначити отриману глибину, загартований шар, оцінити структуру та колишнє зерно аустеніту.

У разі недогрівання у структурі доевтектоїдних сталей спостерігають залишковий ферит або мартенсит нерівномірної будови. Під час перегрівання виникає голчастий мартенсит, розміри голок якого залежать від інтенсивності перегрівання у процесі аустенізації. Об'єктивнішим методом оцінки оптимальності режиму нагрівання є дослідження шліфів після травлення мартенситної структури для виявлення колишнього зерна аустеніту. Таке травлення здійснюють за допомогою насиченого водного розчину пікринової кислоти з додаванням поверхнево-активних речовин (синтолу тощо).

Під час електрогартування заевтектоїдної сталі важливим параметром, що характеризує ступінь оптимальності режиму нагрівання, є вміст вуглецю в мартенситі. Наприклад, для підшипникових сталей встановлено, що оптимальною кількістю вуглецю в мартенситі є 0,6 ... 0,65%.

6.8.3. Вибір режимів охолодження під час поверхневого гартування

Охолодження у процесі поверхневого індукційного гартування здійснюють за допомогою різних методів: занурення у воду або масло, гартування швидкорухомою водою або маслом. Для легованих сталей іноді послуговуються методом охолодження без подачі на гартовану поверхню будь-якої рідини – шляхом відведення теплоти в глибину на ненагріті зони деталі. Останнім часом почали користуватися розчинами різних речовин, наприклад полімерів, що мають знижену порівняно з водою охолоджувальну спроможність.

Найкращим способом охолодження, як з погляду властивостей і якості виробів, так і зручності застосування у виробництві, є охолодження швидкорухомою водою – душем або потоком води.

Охолодження швидкорухомою водою має ряд важливих переваг:

1) завдяки великій інтенсивності охолодження дозволяє фіксувати в мартенситі найбільшу кількість вуглецю, а після низького відпуску отримувати краще поєднання твердості, міцності та пластичності, ніж після охолодження в м'яких середовищах;

2) у разі правильної конструкції гартівного пристрою, який забезпечує рівномірне охолодження, дозволяє гартувати сталі з будь-яким вмістом вуглецю (до 1,0 ... 1,2%) без тріщин;

3) уможливорює дозоване охолодження для здійснення самовідпуску;

4) дозволяє повністю автоматизувати процес гартування.

Зазвичай охолодження швидкорухомою водою здійснюють за допомогою водяного душа або потоком води.

Гартівний пристрій забезпечує рівномірну подачу води на всі ділянки гартівної поверхні, у зв'язку з чим охолодження потоком води має ряд переваг над охолодженням душем.

Підвищення тиску в камері сприяє більш рівномірному охолодженню. З цією метою обмежують переріз для проходу води на виході із гартівного пристрою так, щоб встановити у камері надлишковий тиск 1 – 2 кгс/мм². Підвищення тиску води в порожнині гартівного пристрою усуває розпушення потоку, підвищує температуру кипіння води та зменшує нерівномірність охолодження гартованої поверхні. Для забезпечення інтенсивного і рівномірного охолодження необхідний рух води зі швидкістю 10 – 30 м/с відносно гартованої поверхні деталі.

Для контролю витрати гартівної води у приладі бажано мати спеціальний пристрій (наприклад, диференційний манометр з каліброваною діафрагмою). Інтенсивне рівномірне охолодження дозволяє отримати найвищу твердість і запобігає появі гартівних тріщин, у тому числі на деталях складної форми (наприклад, шестірнях або шлицевих валах).

Під час гартування складної форми з деякою середньою інтенсивністю, наприклад поринанням у спокійну воду, масивна частина виробу (наприклад, западина шлиця) значно відстає у охолодженні від тонкого перерізу (наприклад, головки шлиця) (рис. 23, а). За таких умов мартенситне

перетворення на рваних ділянках поверхні деталі починається неодночасно, що є причиною утворення тріщин. Підвищення витрат води в гартівному пристрої зумовлює збільшення швидкості охолодження масивної частині перерізу, що наближає її до швидкості охолодження його тонкої частини (рис. 23, б). До того ж мартенситне перетворення починається майже одночасно в тонкій і масивній зонах виробу, різниця температур у процесі гартування стає невеликою (40 ... 50 °C), а тріщини під час гартування відсутні.

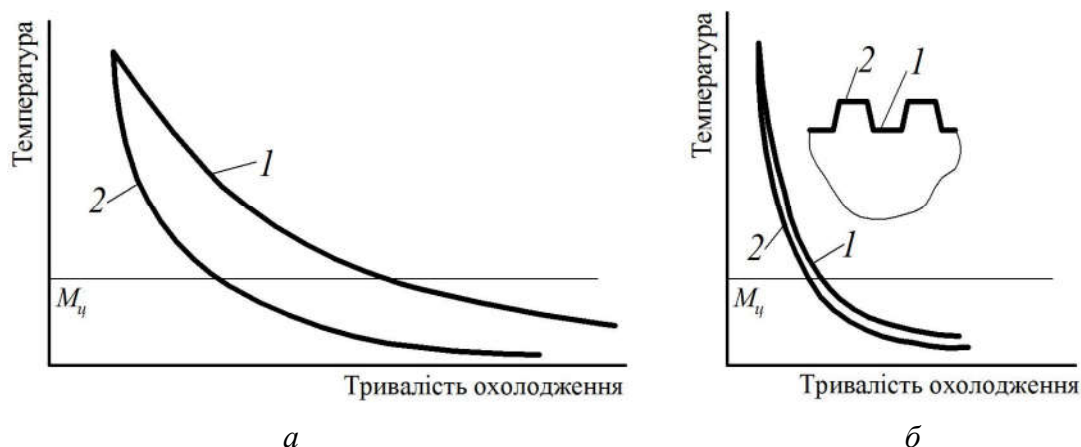


Рис. 23. Криві охолодження у процесі гартування масивної та тонкої частин деталі складної форми:

а – охолодження у спокійній воді; *б* – охолодження інтенсивним потоком води;
1 – масивна частина; *2* – тонка частина

За даними дослідів встановлено, що застосування інтенсивного рівномірного охолодження дозволяє ефективно запобігати тріщинам у разі гартування сталі на високу твердість. Якщо під час гартування швидкість охолодження більша критичної швидкості гартування, а в інтервалі температур мартенситного перетворення охолодження відбувається зі швидкістю, меншою ніж 600 °C/с, то спостерігають частковий розпад (відпуск) мартенситу. За такого процесу знижується твердість загартованої сталі, збільшуються її пластичність і крихка міцність, тому у випадку гартування в маслі, коли швидкість охолодження загартованої сталі в інтервалі температур мартенситного перетворення становить 5 – 30 °C/с, завжди має місце відпуск мартенситу в процесі його створення. У зв'язку з цим сталь, загартована в маслі, у порівнянні зі сталлю, загартованою у воді, має на 5 ... 10 одиниць HRC меншу твердість. За рахунок відпуску мартенситу під час гартування в маслі і малого перепаду температур між тонкою і масивною зонами гартованого виробу можна запобігти утворенню тріщин.

Під час охолодження за певної середньої швидкості (занурення у воду, слабкий душ або потік води) спостерігаємо значну нерівномірність температур, що зумовлює появу великих теплових напружень у процесі гартування та тріщин. У разі великої швидкості охолодження (різкий душ або потік води) температури різних зон виробу у процесі гартування приблизно однакові, теплові напруження невеликі, що усуває причини, які призводять до гартованих

тріщин; за таких факторів твердість при цьому досягає максимального значення.

Застосування самовідпуску ($120 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) під час інтенсивного охолодження зменшує можливість появи тріщин у процесі гартування. Отже, схильну до тріщиноутворення сталь 40ХНМА доцільно гартувати самовідпуском за температури $120 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому твердість практично не знижується, для сталей з вмістом вуглецю $0,4 \dots 0,45\%$ цей показник знаходиться на рівні HRC 60 – 62.

Контроль за якістю поверхневого гартування здійснюють мікроаналізом. Для виявлення макроструктури загартованого шару пропонують так званий потрійний реактив, який фарбує його зони з мартенситною структурою у світлий колір, а зони, які мають структуру трооститу або сорбіту, – у темний. Таким чином, якщо на будь-якій частині поверхні мало місце недостатньо швидке охолодження під час гартування, яке спричинило утворення трооститної структури, то воно відразу виявляється під час застосування цього реактиву. Крім того, реактивом користуються для виявлення розподілення зони гартування та її глибини в перерізі поверхнево загартованої деталі.

6.8.4. Вплив низького відпуску на властивості поверхнево загартованої сталі

Для максимального вияву найбільш високих властивостей виробів після поверхневого гартування їх слід відпускати за низьких температур ($150 \dots 250\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Застосування більш високих температур може призвести до зниження твердості, статичної міцності (рис. 24) та міцності від утомленості, зносостійкості поверхнево загартованих виробів.

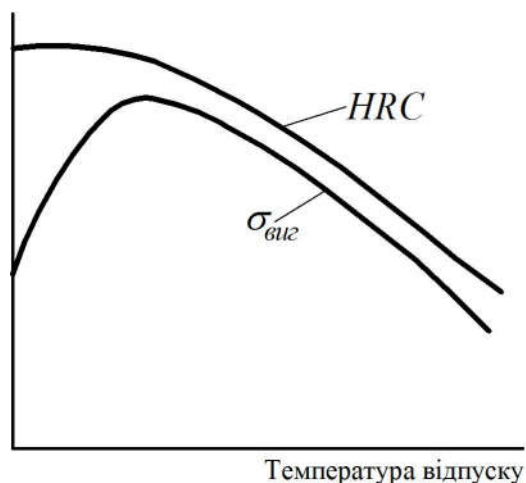


Рис. 24. Характер зміни твердості і міцності під час вигину поверхнево загартованого стержня залежно від температури відпуску

Крихке руйнування характерне для поверхнево загартованої невідпущеної сталі (рис. 25). Низький відпуск, зумовлюючи незначне зниження твердості поверхнево загартованого виробу, суттєво (часом у $1,5 - 2$ рази) підвищує опір сталі крихкому руйнуванню.

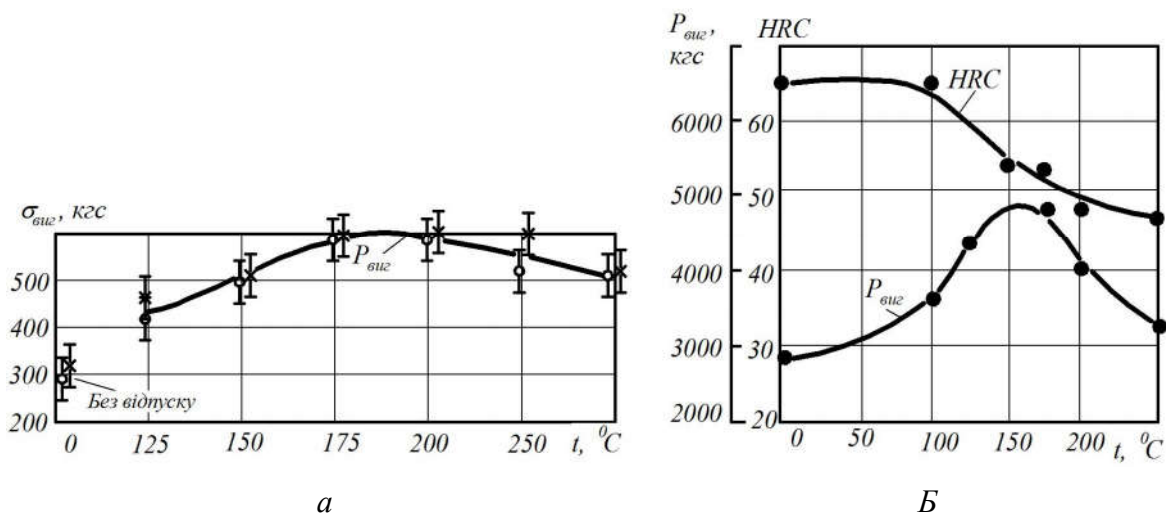


Рис. 25. Вплив низького відпуску на міцність сталі, загартованої під час індукційного нагрівання:

а – наскрізь загартований стрижень діаметром 6 мм; *б* – поверхнево-загартований стрижень діаметром 12,5 мм

Низький відпуск (рис. 25) на 25 ... 30% знижує як стискальні напруження в поверхневих шарах, так і розтяжні в «серцевині».

Таке розподілення внутрішніх напружень (стиск у поверхневих шарах) збільшує міцність від утомленості деталей і зменшує чутливість до концентраторів напружень. Після наскрізного гартування в поверхневих шарах деталей переважно виникає напруження розтягання. Вище зазначено (рис. 25) вплив низького відпуску на міцність сталі, загартованої під час індукційного нагрівання. Низький відпуск значно збільшує міцність як наскрізь загартованих виробів, так і поверхнево загартованих (приблизно в 2 рази). Тому після поверхневого гартування застосування низького відпуску (або самовідпуску) є обов'язкове.

До того ж в невідпущених виробах відбувається розпад мартенситу, що призводить до зміни їх розмірів і жолоблення. У зв'язку з цим поверхневе гартування без відпуску (самовідпуску) може бути застосоване тільки у випадку зміцнення малонавантажених деталей, для яких зміна розмірів і деформація не впливають на їх працездатність.

6.8.5. Самовідпуск під час індукційного гартування

Гартування із самовідпуском – це режим, під час якого охолодження деталі переривають для того, щоб залишкова теплота, збережена в деталі, утворила відпуск.

Самовідпуск можна здійснювати двома способами:

- 1) через деякий час після закінчення охолодження, зазвичай через 10 ... 30 с деталь знову охолоджують водою (душом або занурюванням);
- 2) після припинення штучного охолодження під час гартування деталь витримують на повітрі, за рахунок чого вона повільно охолоджується до температури навколишнього середовища (до 30 ... 40 хв.).

Регулюють температури самовідпуску, змінюючи термін охолодження

під час гартування (період 2 – 3). Чим коротший період, тим більша остаточна теплота в деталі і тим вища температура самовідпуску.

Застосування самовідпуску під час поверхневого гартування дозволяє:

- 1) вилучити відпуск у печі та створити умови для виконання термічної обробки у спільному технологічному потоці з повною автоматизацією процесу;
- 2) надійно запобігти появі на деталі гартівних тріщин.

Якщо правильно обрати режим самовідпуску, можна отримати ідентичні з відпуском у печі результати.

6.9. Термодифузійне хромування

Термодифузійне хромування – процес насичення поверхневого шару сталевих деталей хромом за температури 950 – 1300°C шляхом дифузії хрому в залізо. Існує три методи термохромування: тверде, рідке, газове. За температури 1000 °C і витримки упродовж 3 годин товщина шару становить близько 0,06 мм; (7 годин і температури 1100 °C товщина шару – 0,08 мм).

Твердість:

- для низьковуглецевих сталей $HV = 150 \dots 180$;
- середньовуглецевих сталей $HV = 190 \dots 300$;
- високовуглецевих сталей $HV = 1300 \dots 1500$.

Перевагою термодифузійного хромування є те, що поверхневий шар не зазнає корозії на повітрі, у морській воді, електрохімічної та газової корозії.

Недоліком є низький рівень застосування для створення зносостійкого покриття через малу товщину шару, велику тривалість та складність процесу.

Термодифузійним хромуванням послуговуються для виготовлення анкерних болтів, клапанів компресорів, лопаток газових турбін тощо.

6.10. Силіцирування

Силіцирування – процес насичення кремнієм металу деталі на глибину 0,3 – 1 мм.

Існують такі методи силіцирування:

- у порошкоподібних сумішах;
- рідких середовищах;
- газове;
- вакуумне.

Силіцирування застосовують для підвищення зносостійкості; корозійної стійкості в морській воді; кислотостійкості в сірчаній, соляній, азотній кислотах; окалиностійкості.

Крім того, силіцирування застосовують під час виготовлення апаратури для хімічної промисловості, валів насосів, арматури, кріпильних деталей обладнання нафтової промисловості, труб судових двигунів, деталей водяних насосів і двигунів внутрішнього згоряння.

Недоліки процесу: низька межа міцності, висока крихкість, зниження ударної в'язкості, неможливість обробки різанням.

6.11. Оксидування

Оксидування – процес штучного створення оксидної плівки на поверхні металу. Оксидування застосовують в машинобудуванні, морському суднобудуванні, оптикомеханічній промисловості та інших галузях для отримання захисно-декоративного покриття виробів з чорних металів, алюмінію, міді, магнію, цинку та їх сплавів, а також для отримання тонких електроізоляційних шарів.

Оксидна плівка чорних металів складається з дрібних кристалів окису заліза Fe_3O_4 , має товщину до 0,003 мм, добре утримує мастильні матеріали, запобігає заїданню в парах тертя із чорних металів і прискорює припрацювання тертьових поверхонь за рахунок утворення у разі стирання тонких абразивів.

Із алюмінію та його сплавів отримують плівки товщиною 0,003 ... 0,0003 мм. Оксидований шар створюється як за рахунок заглиблення в товщину металу, так і нарощування плівки на його поверхні. Анодне покриття можна притирати та полірувати.

Анодований шар погано працює в парах з електролітичним хромовим покриттям.

6.12. Фосфатування

Фосфатування – процес створення на поверхні металу плівки нерозчинних фосфорнокислих солей. Фосфатування проводять хімічним (у ванні або у струмені розчину) або електрохімічним способом. Температура ванни для чорних металів менша 90°C , товщина плівки – 0,002 ... 0,050 мкм.

Фосфатна плівка незначною мірою змінює розміри виробу, міцно зчіплюється з основою, її не змочує розплавлений метал, вона жаростійка до температури 600°C , стійка в атмосферних умовах і змащувальних мастилах і газах; має малу твердість, невелику механічну міцність та еластичність, міцно утримує змащувальні масла, лаки та фарби.

Фосфатування застосовують як корозієстійке покриття, що має електроізоляційні властивості.

Недоліком цього процесу є зростання крихкості сталі.

6.13. Сульфідкування

Сульфідкування – термохімічний процес обробки деталей, вироблених із сплавів на залізній основі, для збагачення поверхневих шарів сіркою.

Сульфідкування здійснюють у рідкому, твердому або газовому сіркомісткому середовищі. Воно може бути низько-, середньо-, високотемпературним: $150 \dots 450^\circ\text{C}$; $540 \dots 580^\circ\text{C}$; $850 \dots 950^\circ\text{C}$. У поверхневому шарі утворюються фази FeS та FeS_2 .

Шорсткість поверхні після сульфідкування значно вища початкової; розміри деталей декілька збільшуються.

Ефект сульфідуювання: сульфідна плівка, яка має меншу щільність, ніж основний метал, легко руйнується під час тертя та відокремлюється від основи без його пластичного деформування, запобігаючи схоплюванню тертьових поверхонь.

Продукти спрацювання активують дію змащувального мастила. Все це прискорює припрацювання поверхонь і забезпечує малу шорсткість після припрацювання.

Сульфідуювання застосовують під час виготовлення поршнів та кілець двигунів внутрішнього згорання, компресорів і парових машин, поршнів, підшипників ковзання, насосів, центрифуг, випускних клапанів тощо.

6.14. Хромування, залізнування та електромеханічний спосіб зміцнення деталей

6.14.1. Електролітичне хромування

Електролітичним хромуванням послуговуються для підвищення зносостійкості сталевих виробів: у ремонті та виробництві літаків, автомобільних і тракторних двигунів, деталей суднових механізмів, гірничих машин, металорізальних верстатів, вимірювального та різального інструмента тощо.

Для хрому характерна висока твердість, велика міцність зчеплення зі сталлю та хімічна стійкість.

Хромове покриття погано змочується мастилами, тому для посилення їх змочуваності створюють на поверхні покриття пори, поглиблення або канали.

Види зносостійких хромових покриттів:

- гладкий хром, осаджуваний на поверхню з механічно нанесеними поглибленнями (хром на накатці);
- пористий хром;
- плямистий хром.

Товщина хромового покриття залежить від призначення деталі та потрібного терміну служби.

Наприклад: товщина покриття напилків, свердел, довбачів – 0,05 мм, прес-форм для пластмас – 0,01 мм; матриць – 0,05 мм; підшипників ковзання, валів насосів, поршневих пальців – 0,2 мм; поршневих кілець автотракторних двигунів – 0 ... 0,15 мм.

Хромовані поверхні доцільно застосовувати під час роботи в парі з бабітами, дрібнозернистим чавуном і з деталями із м'яких і середньо загартованих сталей у разі наявності змащувального мастила.

Не рекомендовано хромувати деталі, які працюють у парі з титаном.

Гладкий хром слід застосовувати для деталей, які працюють в умовах достатнього змащування та за невеликих швидкостях ковзання. В інших випадках гладка поверхня хрому непрацездатна – з'являються ризики та задирки.

Пористе покриття менш зносостійке, ніж гладке, тому що має можливість

пластично деформуватися, проникати окремими плато в сполучену поверхню та крихко сколюватися.

6.14.2. Залізнування

Залізнування – процес електролітичного осадження заліза. Осадження відбувається з водних розчинів закисних солей заліза. Користуються хлористими, сіркокислими та змішаними електролітами. Залізо осаджують на катоді. Прутки або полоси маловуглецевої сталі (з вмістом вуглецю до 0,1%) є анодом.

Залізнування застосовують для підвищення зносостійкості кліше тощо або для нарощування металу на спрацьовану поверхню сталевих і чавунних деталей у разі відновлення їх розмірів.

Якщо необхідна більш висока твердість, то потім здійснюють хромування або цементацію покриття.

Для отримання безпосередньо у ванні зносостійких осадів заліза з підвищеними механічними властивостями та покращеною структурою залізнування проводять в електроплитах, які з'єднують марганець або нікель.

6.15. Електромеханічний спосіб зміцнення деталей

Електромеханічне зміцнення полягає в сполученні термічного та силового впливу на поверхневий шар оброблюваної деталі. Суть способу: у процесі обробки через місце контакту інструмента з виробом проходить струм великої сили та напруги, внаслідок чого виступаючі гребінці поверхні сильно нагріваються, під тиском інструмента деформуються та згладжуються, а поверхневий шар металу зміцнюється (рис. 26).

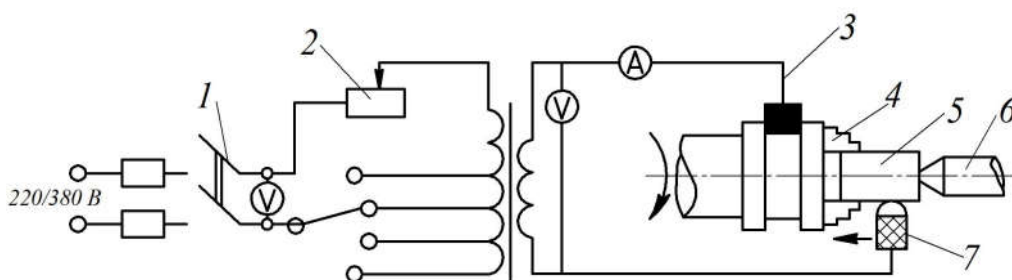


Рис. 26. Схема електромеханічного способу зміцнення:

1 – рубильник; 2 – реостат; 3 – вторинна обмотка; 4 – патрон; 5 – деталь;
6 – задня бабка; 7 – інструмент

Від мережі напругою 220 – 380 В струм проходить крізь знижувальний трансформатор, а потім крізь місце контакту деталі з інструментом. Силу струму та вторинну напругу регулюють залежно від площі контакту, початкової шорсткості поверхні деталі та вимог до якості поверхневого шару.

Розрізняють високотемпературну термомеханічну обробку, під час якої деформування відбувається за температури, вищої порогу рекристалізації, та

низькотемпературну термомеханічну обробку, де деформування відбувається за температури, нижчої порогу рекристалізації. Для заліза температура рекристалізації 450 ... 600 °С.

Особливості електромеханічного способу зміцнення деталей:

- тепловий та силовий вплив на поверхневий шар здійснюють одночасно, а не послідовно; нагрівання супроводжується дією значних тисків;
- нагрівання поверхневого шару металу від дії двох джерел теплоти: зовнішнього (теплота тертя) та внутрішнього (теплота, яка виділяється під час проходження струму). Особливістю другого джерела є те, що теплота від нього утворюється одночасно і миттєво по всьому поверхневому шарі;
- тривалість нагрівання та витримки залежно від поверхні контакту та швидкості обробки дуже короткочасна (соті-тисячні долі секунди);
- високу швидкість охолодження визначають за інтенсивністю відведення теплоти від тонкого поверхневого шару в середину деталі;
- поверхневий шар підлягає багаторазовим термомеханічним впливам залежно від кількості робочих ходів.

За температури нагрівання, більшої, ніж температура рекристалізації, в результаті обробки в поверхневому шарі утворюється світла зона, що являє собою дрібнодисперсний мартенсит, а у разі температури нагрівання, меншої температури рекристалізації – темна зона, з середньо дисперсною структурою без фазових перетворень.

Термомеханічна обробка – це складний процес пластичної деформації, під час якого в поверхневому шарі збільшується щільність дислокацій, величина мікронапружень, змінюється структура.

Термомеханічну обробку застосовують для виготовлення зубчастих коліс, циліндрів, плоских поверхонь (станіни), гвинтових поверхонь тощо.

Контрольні запитання і завдання

1. Розкрийте суть таких понять:

- цементація;
- азотування;
- оксидування.

2. Як відбувається індукційне нагрівання металів?

3. У чому полягає сутність ХТО?

4. Яким чином впливає швидкість охолодження під час гартування сталі?

Розділ 7

МЕТОДИ ЛАЗЕРНОГО, ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО, ПЛАЗМОВОГО ТА ДЕТОНАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Існує три групи методів зміцнення поверхонь деталей машин концентрованими потоками енергії:

- лазерна та електронно-променева обробка;
- плазмове та детонаційне напилення;
- вакуумна іонно-плазмова обробка.

До першої групи належать методи, основою яких є перенесення енергії від променевого джерела до оброблюваної поверхні, яка в результаті потужного локального енергетичного впливу набуває нових властивостей.

Друга група методів ґрунтується на перенесенні речовини від певного джерела до попередньо очищеної оброблюваної поверхні, на якій ця речовина осідає, формуючи захисне покриття.

У третій групі застосовують джерело речовини, великі частинки якої розігріваються, розганяються до високої енергії та проникають або прилипають до оброблюваної поверхні, формуючи на цій поверхні шар нанесеної речовини.

7.1. Лазерне зміцнення

Основою процесу лазерного зміцнення є швидке нагрівання до високої температури (температури плавлення) поверхневого шару металу з подальшим швидким охолодженням шляхом відведення тепла в його основний об'єм, який залишається практично холодним.

У принципі необхідне підвищення температури металу можна отримати і стандартними методами – нагріванням в термічній або індукційній печі. Однак ці методи здебільшого непридатні через неоднорідність нагрівання. Крім того, у великогабаритних деталях дуже часто треба гартувати тільки частину поверхні, а не весь об'єм деталі. Зробити це можна тільки лазерною обробкою (термообробкою), яка може відбуватися з оплавленням і без оплавлення поверхневого шару. Найчастіше застосовують обробку без оплавлення зі збереженням вихідної шорсткості $Ra = 0,16 \dots 1,25$ мкм. Глибина зміцнювального шару металу визначається величиною допустимого лінійного спрацювання.

Продуктивність лазерного зміцнення визначають за формулою

$$G_{\text{лаз.терм.}} = K_n V d_0,$$

де K_n – коефіцієнт перекриття; V – швидкість руху променя (деталі); d_0 – діаметр пучка (ширина доріжки зміцнення), $d_0 = 1 \dots 1,5$ мм і більше.

Можлива обробка перекривальними та неперекривальними доріжками. У разі накладання доріжки зміцнення відбувається часткове нагрівання попередньої зміцненої зони, що може призвести до відпуску та зниження твердості. Під час обробки неперекривальними доріжками проміжок між ними

становить 10 ... 30% від площі оброблюваної поверхні. Констатують зменшення спрацьовування в 2 – 3 рази.

Лазерне зміцнення застосовують під час виготовлення колінчастих валів двигунів, гільз циліндрів, зубчастих колес, деталей хімічного, нафтового та бурового устаткування.

7.1.1. Лазерна наплавка

Лазерна наплавка порошкових матеріалів забезпечує отримання наплавленого шару високого ступеня однорідності та якості без значного термічного впливу на нижчі шари металу.

Застосовують порошки хрому, бору, нікелю, кремнію.

Сутність процесу наплавки полягає в нанесенні на поверхню деталі шару порошку та подальшому його розплавленні променем лазера. Порошок дифундує в основний метал, а швидке охолодження дозволяє отримати однорідну структуру поверхневого шару. Після подальшого шліфування товщина наплавлення може досягати 0,2 –... 0,4 мм, зносостійкість підвищується в 2 – 3 рази.

7.1.2. Лазерне устаткування

Лазерне устаткування призначене для виконання технологічного процесу лазерного зміцнення металу і складається з таких основних елементів як-от: лазер з блоком живлення, оптична система для транспортування та фокусування лазерного променя, система позиціонування оброблюваної деталі, система керування та контролю параметрів обробки.

Лазери можуть бути електророзрядні (CO₂-лазери) та твердотілі (Nd-лазери). Електророзрядні мають велику довжину хвилі (10,6 мкм), електророзрядне збудження, систему прокачки газової суміші (CO₂, N₂, He) за замкненим контуром. Застосовуються для безперервної обробки. Потужність 1 – 25 кВт. Твердотілі лазери працюють від активного елемента у вигляді стрижня або пластини. Можуть працювати в переривчастому та безперервному режимах. Потужність від 200 Вт до 3 кВт. Довжина хвилі менша 10,6 мкм, отже, має більш високий коефіцієнт поглинання в металі.

Транспортування променя в лазерному устаткуванні здійснюють за допомогою оптичних волокон.

7.2. Електронно-променева обробка

Обробку поверхні здійснюють потужним електронним пучком у вакуумі. За такого процесу необхідний захист оператора від рентгенівського випромінювання.

Електронно-променева обробка порівняно з лазерною обробкою забезпечує: вищий ККД; вищу потужність; меншу вартість.

У випадку електронно-променевої обробки застосовують наплавку з порошком алюмінію, заліза і нікелю в середовищі азоту. При цьому спрацьовування зменшується в 2 – 4 рази.

7.2.1. Електронно-променеве устаткування

Електронне, як і променеве, джерело енергії за своїми технологічними можливостями близьке до лазерних джерел. Установка складається з електронної пушки з блоком живлення, герметичної вакуумної камери з приладами переміщення оброблюваної деталі або пушки, вакуумної системи з насосами, системи керування та контролю. Потужність до 20 кВт.

7.3. Методи детонаційного та плазмового нанесення покриття

Дані методи належать до газотермічних методів, дія яких полягає у повному або частковому нагріванні матеріалу покриття до стану плавлення та розпилення його газовим струменем. Напилюваним матеріалом може бути дріт або порошок. Нагрівачами напилюваного матеріалу є: газове полум'я, плазма, електрична дуга або детонація вибухової газової суміші.

За детонаційного методу застосовують енергію киснево-ацетиленових вибухів, яка забезпечує необхідне розігрівання і прискорення напилюваного матеріалу, а у разі плазмового – енергію плазмового струменя. Розпилювані частки матеріалу ударяються в основу та розплющуються, створюючи тонкі лусочки, які закріплюються на поверхневому шорсткому шарі шляхом механічної та фізико-механічної взаємодії з матеріалом основи. Внаслідок взаємодії окремих лусок утворюється своєрідна структура напилюваного покриття. Чим більша швидкість співударяння часток, тим вища міцність нанесеного покриття. Під час детонаційного напилення швидкість руху напиленого порошку становить 600 ... 1000 м/с, що в 4 – 7 разів більше, ніж у випадку плазмового та газоплазмового методів напилення.

Особливість цих методів зміцнення – можливість наносити тугоплавкі матеріали на металеву підкладку без значного її нагрівання (не більше 150°C), тобто наносити покриття на остаточно термооброблені та зміцнені сталі, алюмінієві, титанові та інші сплави після фінішної механічної обробки, не боячись зміни властивостей структури поверхневого шару.

Процес плазмового напилення має два етапи:

- політ і розпилення часток напилюваного матеріалу;
- удар об оброблювану поверхню, поєднання часток з нею та між собою.

Створення покриття відбувається внаслідок співударяння часток з поверхнею оброблюваної деталі, їх сильного деформування, розплющення та розбризкування. У результаті отримане покриття, як і у випадку детонаційного напилення, складається ніби з лусочок напилюваного матеріалу, з'єднаних між собою за контактною поверхнею ділянками зварювання, тому міцність і щільність покриття нижчі міцності та щільності вихідного матеріалу.

Під час детонаційного напилення кінетику та механізм деформування покриттів визначають пластичною деформацією часток порошку та основи в зоні співударяння, де відбувається локальне підвищення активності твердої основи під дією тиску від удару твердих часток, який спричиняє пружні спотворення кристалічних ґрат та пластичне деформування. Це зумовлює

збільшення міцності зчеплення покриття з основним металом.

Для підвищення фізико-механічних властивостей напиленого шару та покращення адгезії до основи застосовують додаткову операцію оплавлення. Сутність її полягає в тому, що напилений шар нагрівають до температури, близької до її плавлення. Внаслідок нагрівання між напиленим шаром і основним металом відбувається дифузійний процес, а під час охолодження утворюється щільне покриття. Пори, які залишилися після напилення, заповнює розплавлена частина напиленого матеріалу. Після охолодження утворюється рівномірний тонкий однорідний шар без пор. Для цього охолодження напиленого шару здійснюють одночасно з охолодженням печі.

Існують такі способи оплавлення:

- плазмовим або газовим пальником;
- в електричній печі;
- у соляній ванні;
- струмом високої частоти.

Методом детонацій напилюють пластичні метали і сплави (Cu, Ni, Fe та інші), тверді метали та тугоплавкі сполуки (W, Al_2O_3 та інші)

Такі методи застосовують для виготовлення деталей в моторобудуванні; авіаційному, верстато- та приладобудуванні; хімічному та металургійному машинобудуванні; інструментальному виробництві; ракетній, космічній та ядерній техніці.

У разі плазмового напилення як плазмоутворюючі гази застосовують аргон, неон, азот, водень, гелій, аміак, природний газ та їх суміші. Порошок вводять в плазмовий струмінь.

7.3.1. Обладнання для детонаційного населення покриття

Розроблені конструкції детонаційних пристроїв із внутрішнім і зовнішнім сумішістворенням. У першому випадку ствол є камерою для створення горючої суміші; у другому – в ствол подають горючу суміш, підготовлену в змішувачі.

Детонаційна установка з внутрішніми сумішостворювачами (рис. 27) являє собою водоохолоджуючий ствол довжиною 1 ... 1,8 м з внутрішнім діаметром від 10 до 40 мм. У ствол подають суміш кисню і ацетилену водночас із порцією порошку.

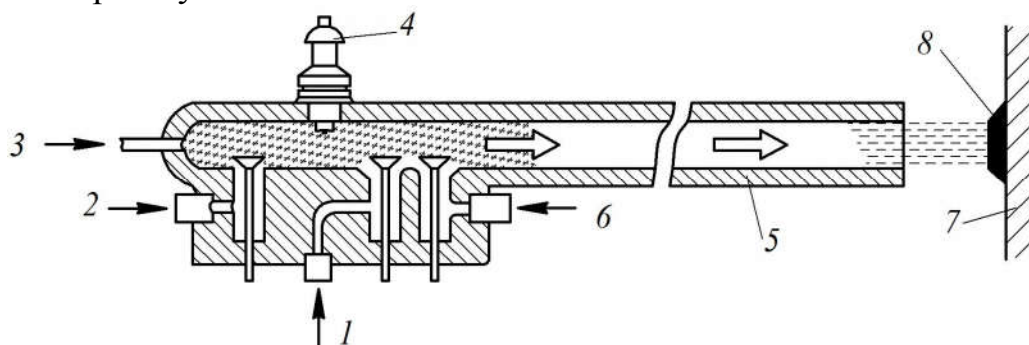


Рис. 27. Схема детонаційного пристрою з внутрішнім суміші створенням:

- 1 – ацетилен; 2 – азот; 3 – подача порошку; 4 – свічка запалювання;
5 – вихідна труба; 6 – кисень; 7 – деталь; 8 – пляма покриття

Вибухова газова суміш спалахує за допомогою електричного імпульсу, і детонаційна хвиля переміщується по стволу, прискорюючи та нагріваючи порошок. Частки порошку прискорюються до швидкості 500 ... 1000 м/с і ударяючись об деталь, утворюють пляму діаметром, який залежить від діаметра ствола. Потім ствол очищують азотом, і процес повторюють. Частота повторень 4 ... 8 циклів/с.

7.3.2. Плазмове поверхнєве зміцнення деталей

Однією з найперспективніших обробок є плазмова технологія, інтенсивно розроблювана як у нашій країні, так і за кордоном. Застосування низькотемпературної плазми ефективно не тільки для переплаву металів і сплавів, напилення зносостійких, жароміцних і корозійностійких покриттів, різання та зварювання різних матеріалів, а також і для поверхневого зміцнення різних виробів.

Плазмове поверхнєве зміцнення знаходить широке застосування як в умовах дрібносерійного та одиничного (у тому числі ремонтного), так і крупносерійного та масового виробництва. Сутність його полягає в термічних фазових і структурних перетворюваннях, які відбуваються під час швидкого концентрованого нагрівання робочої поверхні деталі плазмовим струменем (дугою) та тепловідведення в матеріал деталі.

7.3.3. Устаткування для плазмового зміцнення деталі

Для здійснення рідних видів плазмової обробки матеріалів (різання, зварювання, напилення, поверхневого зміцнення, легування) застосовують пристрої, які містять джерело живлення з апаратурою керування, механізми, які забезпечують рівномірне переміщення плазмотрону над оброблюваною поверхнею, та плазмотрон.

Установка для мікроплазмової обробки (типу МПУ-4) за своїми технічними характеристиками (табл. 8), забезпечують надійну роботу в чотирьох режимах горіння дуги: А – безперервний режим струму дуги прямої полярності; В – імпульсний режим струму дуги прямої спрямованості; С – імпульсний режим струму дуги прямої та зворотної спрямованості; Д – безперервний режим струму дуги зворотної полярності.

Технічні характеристики установки МПУ-4

Напруга живильної мережі, В	220 ... 380
Кількість фаз	3
Частота живильної мережі, Гц	50
Діапазон струмів дуги, А	
– прямої полярності	3 ... 30
– зворотної полярності	1,5 ... 15
Напруга холостого ходу, В	60 ... 80
Тривалість імпульсу струму прямої та зворотної полярностей, а також тривалість паузи, с	0,02 ... 0,5
Сила струму чергової дуги, А	3 ... 6
Напруга холостого ходу чергової дуги, В	80 ± 10%
Довжина дуги, мм	3 ... 6
Витрати плазмоутворювального газу, л/хв.	0,2 ... 0,5
Споживана потужність, кВА	3,5
Маса, кг	100

Для генерування плазми широко застосовуються плазмотрони з відкритою дугою або прямої дії, коли додатний потенціал подають на зміцнювану деталь (рис. 28, *а*), і плазмотрони із замкненою дугою-струменем або непрямої дії, коли від'ємний і додатний потенціали подаються на катод і анод плазмотрону (рис. 28, *б*)

Плазмотрон є основним елементом енергетичної частини пристроїв для плазмового зміцнення деталей і являє собою пристрій, генеруючий і стабілізуючий у просторі потік дугової плазми з температурою до декількох тисяч градусів.

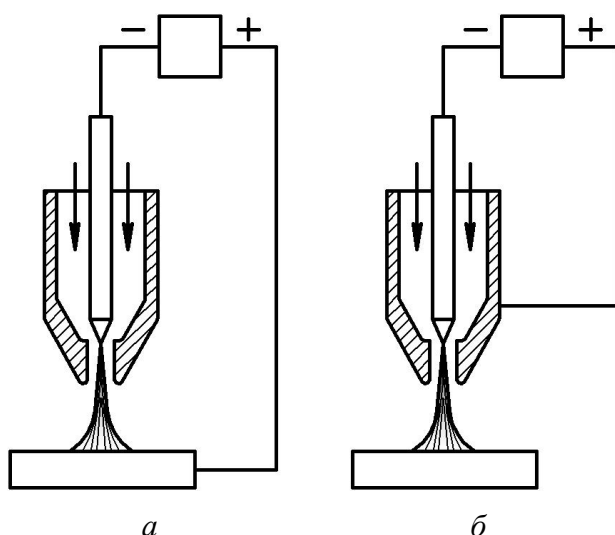


Рис. 28. Схеми плазмотронів:

а – з відкритою дугою;*б* – із замкненою дугою

Плазмотрони мають відповідати таким вимогам:

- потужність;
- висока енергетична ефективність;
- стабільність параметрів плазмового потоку;
- велика тривалість безперервної роботи;

- надійність конструкції;
- простота обслуговування;
- можливість застосування різних плазмоутворювальних газів.

Потужність плазмотрону залежить від виду електроплазмового процесу, може змінюватися від одиниці кіловат до декількох сотень мегават. Для напилення та плазмового зміцнення застосовують дугові плазмотрони потужністю до 100 кВт.

Під високою енергетичною ефективністю плазмотронів розуміють можливість ефективного перетворення електричної енергії на теплову та отримання максимального ККД технологічного процесу.

Ефективність ведення технологічного процесу залежить від стабільності параметрів плазмового потоку. На початку плазмотрони можуть утворювати значні пульсації параметрів плазмового потоку, що призводить до нерівномірного введення тепла в зміцнений виріб і, як наслідок, нерівномірного розподілення твердості за довжиною та шириною зміцненої зони.

Дугові плазмотрони, призначені для плазмового поверхневого зміцнення, можуть працювати більше 200 годин без заміни електродів.

Надійність конструкції плазмотрону визначають за такими факторами: простота його конструкції, надійність збирання та розбирання, зручність монтажу та ін.

Під простотою обладнання слід розуміти простоту кріплення плазмотрону в технологічній зоні, збирання та розбирання; точність збудження електричного розряду без введення додаткових пристроїв у сферу розрядного каналу.

Можливість застосування різноманітних плазмоутворювальних засобів у дугових плазмотронах обмежується процесом ерозії електродів.

Плазмотрони класифікуються за низкою ознак.

За призначенням плазмотрони для поверхневого зміцнення поділяють на машинні та ручні.

За принципом роботи плазмотрони можуть бути із зовнішньою або винесеною дугою (плазмотрони прямої дії) та з внутрішньою дугою (плазмотрони непрямої дії). Поширеними у застосуванні для зміцнення деталей складної форми є плазмотрони непрямої дії.

За родом використання струму плазмотрони поділяють на плазмотрони постійного струму та плазмотрони змінного струму. Найпоширенішими є плазмотрони постійного струму, бо вони простіші за своїми конструктивними схемами та мають високу ефективність перетворення електричної енергії на теплову.

За родом застосованого робочого середовища можна виділити три типи плазмотронів: з нейтральним робочим газом, з окислювальним середовищем та водою. Із газів, нейтральних відповідно до робочих електродів, найбільш застосовними є: аргон, азот, водень та їх суміші. З погляду економічності процесу доцільно застосовувати плазмотрони, які працюють на повітрі, проте стійкість електродів у таких плазмотронів відносно невелика через значну їх

ерозію.

За різноманітністю конструкцій всі плазмотрони мають три основні елементи: електрод (катод), сопло (у плазмотронів непрямої дії – анод) та ізолятор (проміжкові вставки). Ізолятор розподіляє електрод і сопло, що мають різні електричні потенціали.

Електроди плазмотрону за типом і конструкцією залежать від складу плазмоутворювального середовища. Як матеріал для електродів, працюючих в окислювальних середовищах, застосовують графіт, в нейтральних газах – вольфрам. Конструктивно електроди виготовляють двома способами: у вигляді прутка, який фіксують цанговим затискувачем, закріпленим в електродному вузлі плазмотрону, і мідної державки із запресованим у неї стержнем електроду.

Сопло плазмотрону призначене для формування геометричних і енергетичних параметрів дуги. Основні параметри сопла: діаметр і висота каналу. Для зміцнення деталей бажано зменшувати діаметр сопла та збільшувати висоту каналу сопла, що забезпечує добрі технологічні можливості плазмотрону, оскільки збільшується швидкість зміцнення та глибина зміцненої зони. Проте значне зменшення діаметра сопла призводить до зниження його стійкості, ускладнень із запалюванням дуги.

Вимоги до матеріалів проміжкових вставок:

- висока електрична міцність, оскільки збудження дуги здійснюється здебільшого за допомогою високовольтного високочастотного розряду;
- висока механічна міцність, оскільки проміжкові вставки виконують функції несучих часток конструкції, на якій кріплять решту вузлів плазмотрону;
- обробка ріжучим інструментом;
- термостійкість, оскільки матеріали схильні до впливу теплового та світлового випромінювання дуги;
- герметичність: через них проходять комунікації плазмоутворювального газу та охолодження.

7.3.4. Технологічні варіанти плазмового зміцнення деталей

Існують численні варіанти плазмового поверхневого зміцнення:

- без оплавлення поверхні деталі;
- з оплавленням поверхні деталі;
- з проміжком поміж зміцненими зернами;
- з перекриттям зміцнених зон;
- хіміко-термічна плазмова обробка;
- плазмові зміцнення в поєднанні з іншими способами об'ємної або поверхневої термічної обробки.

Плазмові зміцнення без оплавлення поверхні є найпоширенішим для сталей, тому що забезпечує збереження якості (величини шорсткості), досягнутої попередньою механічною обробкою.

Зміцнення з оплавленням поверхні сталей і чавунних деталей

застосовують за необхідності отримати особливі експлуатаційні властивості. Наприклад, такій обробці піддають валки чорнової групи клітей станів гарячої прокатки, до шорсткості робочої поверхні яких не висуваються високі вимоги. Під час обробки чавунних деталей на поверхні утворюється окремий шар із високою зносостійкістю.

Плазмове зміцнення поверхні деталей без перекриття зони обробки забезпечує рівномірну твердість на поверхні, а з перекриттям – нерівномірну твердість через появу зон відпуску в місцях перекриття.

Можливість реалізації хіміко-термічної обробки під час плазмової обробки визначають за родом газу, застосованого як плазмоутворювальне. Наприклад, у випадку азотування плазмоутворювальним газом є суміш аргону з азотом.

Для попередньої або завершальної обробки поверхонь можна застосовувати технології комплексного зміцнення: об'ємну термічну обробку в поєднанні з плазмовим зміцненням; гартування струмами високої частоти і плазмову обробку.

Контрольні запитання і завдання

1. Розкрийте сутність електронно-променевої обробки матеріалів.
2. У чому полягає детонаційне та плазмове нанесення покриття?
3. Який газ застосовують за плазмових методів обробки матеріалів?
4. Які існують групи методів зміцнення деталей концентрованими потоками енергії?
5. Яким вимогам мають відповідати плазмотрони?
6. Перерахуйте варіанти плазмового зміцнення деталей.

Розділ 8

ВАКУУМНЕ ІОННО-ПЛАЗМОВЕ ЗМІЦНЕННЯ, ІОННЕ МАГНЕТРОННЕ РОЗПИЛЕННЯ, ІОННЕ ЛЕГУВАННЯ

8.1. Вакуумне іонно-плазмове зміцнення деталей машин

Серед методів нанесення захисних покриттів, заснованих на впливі на поверхню деталі потоків часток і квантів з високою енергією, велику увагу привертають вакуумні іонно-плазмові методи. Характерною особливістю є пряме перетворення електричної енергії на енергію технологічного впливу, заснованого на структурно-фазових перетворюваннях в осаджуваному на поверхні конденсаті або в самому поверхневому шарі деталі, яка міститься у вакуумній камері.

Основною перевагою даних методів є створення високого рівня фізико-механічних властивостей матеріалів у тонких поверхневих шарах, нанесення щільних покриттів з тугоплавких хімічних з'єднань, а також алмазоподібних, які неможливо отримати традиційними методами. Крім того, ці методи дозволяють забезпечувати:

- високу адгезію покриття до підкладки;
- рівномірність покриття за товщиною на великій площі;
- екологічну чистоту виробничого циклу;
- варіювання складу покриття в широкому діапазоні в межах одного технологічного циклу;
- високу чистоту поверхні покриття.

Методи вакуумної іонно-плазмової технології

1. Модифікування поверхневих шарів:

- іонно-дифузійне насичення (іонне азотування, науглецювання, борування тощо);
- іонне (плазмове) травлення (очищення);
- іонна імплантація (впровадження);
- відпал у тліючому розряді.

2. Нанесення покриттів:

- полімеризація в тліючому розряді;
- іонне осаджування (у тріодній розпилювальній системі, діодній розпилювальній системі, із застосуванням розряду в порожнистому катоді);
- електродугове випаровування;
- іонно-кластерний метод;
- катодне розпилення (на постійному струмі, високочастотне);
- хімічне осаджування в плазмі тліючого розряду.

Сучасні вакуумні іонно-плазмові методи зміцнення (модифікування) поверхонь деталей машин здійснюють поетапно:

- генерація (створення) корпускулярного потоку речовини;
- активізація потоку, прискорення та фокусування;
- конденсація та проникнення в поверхню деталей (підкладок).

Генерація. Генерація корпускулярного потоку речовини можлива за її випаровування (сублімації) та розпилення.

Випаровування. Перехід конденсованої фази в пар відбувається в результаті підведення теплової енергії до випаровуваної речовини.

Тверді речовини зазвичай під час нагрівання розплавляються, а потім переходять у газоподібний стан. Деякі речовини, минаючи рідку фазу, відразу перетворюються на газ. Такий процес називають *сублімацією*.

Нагрівання випаровуваної речовини може відбуватися:

- за рахунок виділення джоулевого тепла під час проходження електричного струму крізь випаровуваний матеріал або випарник;
- унаслідок бомбардування поверхні металу прискореним потоком електронів (електронно-променеве нагрівання) або квантами електромагнітного випромінювання (лазерне нагрівання);
- електричною дугою.

Вибір способу нагрівання і конструкція випарника залежить від природи випаровуваного матеріалу, його вихідної форми (гранули, порошок, дріт), потрібної швидкості випаровування, постійності у часі та ін.

Найпоширенішим є нагрівання за допомогою електронного бомбардування, що дозволяє досягати температури 4000°C та щільності енергії в проміні до $5 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$.

Електронно-променевий спосіб нагрівання полягає в тому, що на зразок металу направляють потік електронів від катоду та прискорених електричним полем до енергії 5 ... 25 кВ. Потік електронів (електронний промінь) отримують за допомогою електронно-променевих гармат.

Середня енергія часток у потоці, створеному випаровуванням, невелика, тому необхідно збільшити енергію часток, що потрапляють на підкладку. Простим способом прискорення заряджених часток є електричне поле, але для утворення потоків переважно застосовують нейтральні частки, тому їх активізацію можна здійснювати дією на атоми потоком електронів, іонів, атомів або фотонів.

У результаті створення активізованого корпускулярного потоку в контакт з підкладкою металу деталі входять нейтральні частки (збуджені та незбуджені) з високою енергією та іони. Процес взаємодії такого складного потоку з поверхнею металу зводиться до протікання взаємопов'язаних фізичних явищ: конденсації, впровадження та розпилення.

8.2. Іонне розпилення

Іонні розпилювачі розподілені на дві групи:

- плазмоіонні, у яких мішень міститься в газорозрядній плазмі, створеній за допомогою тліючого, дугового та височастотного розряду. Розпилення відбувається в результаті бомбардування мішені іонами з плазми;
- автономні джерела без фокусування та з фокусуванням іонних пучків, що бомбардують мішень.

У найпростішому випадку система розпилення складається з двох електродів, розміщених у вакуумній камері (рис. 29). Розпилювану мішень з нанесеного матеріалу розташовують на катоді. На іншому електроді на відстані в декілька сантиметрів від катоду встановлюють деталі (підкладки).

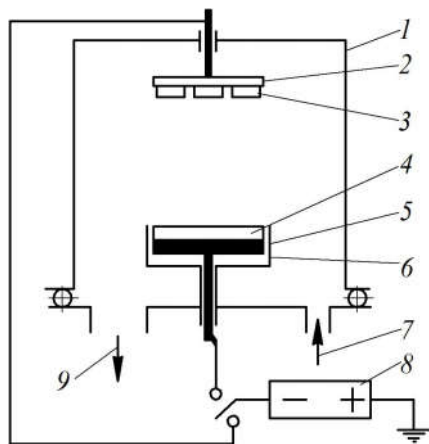


Рис. 29. Принципова система розпилення:

1 – камера; 2 – підкладотримач; 3 – деталі (підкладки); 4 – мішень; 5 – катод; 6 – екран; 7 – підвід робочого газу; 8 – джерело живлення; 9 – відкачка

Камеру вакуумують, а потім наповнюють робочим газом (найчастіше аргоном) до тиску 1,33 Па. На електрод з підкладки подають від’ємний потенціал, запалюють газорозрядну плазму та очищують поверхню деталі від забруднень іонним бомбардуванням. Надалі від’ємний потенціал прикладають до мішені та розпилюють її. Розпилені частинки рухаються крізь плазму розряду, осаджуються на деталях та створюють покриття. Велика частина енергії іонів (до 25%), що бомбардують мішень, переходить у тепло, яке відводиться водою, що охолоджує катод.

Перевагою іонного розпилення є можливість отримання покриттів із тугоплавких металів, сплавів та хімічних з’єднань.

8.3. Магнетронне розпилення

Нанесення покриттів у вакуумі за допомогою магнетронних систем полягає в розпилюванні твердої мішені напилюваного матеріалу іонами інертного газу, які створюються у плазмі аномального тліючого розряду під час накладання на нього магнітного поля, силові лінії якого ортогонально перетинають силові лінії магнітного поля.

Основними елементами магнетрону є катод-мішень, анод і магнітна система (рис. 30). Силові лінії магнітного поля замикаються поміж полюсами магнітної системи. Поверхня мішені, розташована між системами входу та виходу силових ліній магнітного поля, інтенсивно розпилюється та має вигляд замкнутої доріжки, геометрію якої визначають за формою полюсів магнітної системи.

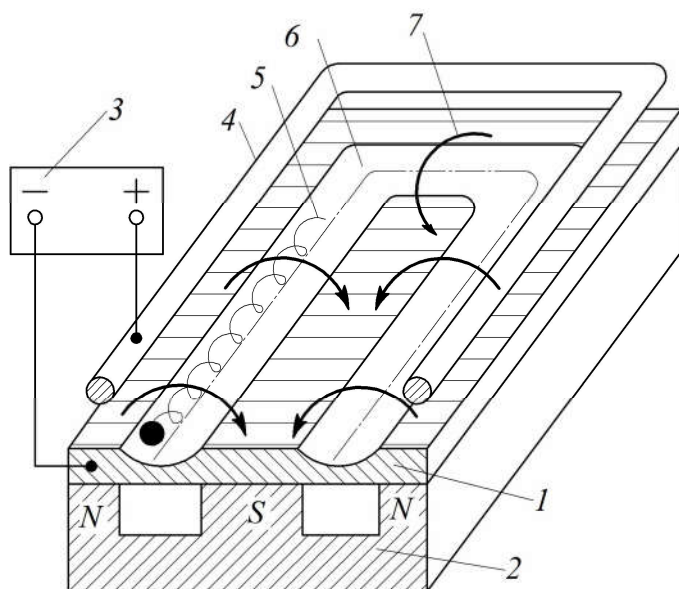


Рис. 30. Схема магнетронної розпилювальної системи з плоскою мішенню:

1 – катод (мішень); 2 – магнітна система; 3 – джерело живлення; 4 – анод; 5 – траєкторія руху електрону; 6 – зона розпилювання; 7 – силова лінія магнітного поля

Під час подавання постійної напруги між мішенню (від’ємний потенціал) і анодом (позитивний потенціал) виникає неоднорідне електричне поле та збуджується тліючий розряд. Наявність замкнутого магнітного поля до розпилюваної поверхні мішені дозволяє локалізувати плазму розряду безпосередньо у мішені. Емітовані з катоду під дією іонного бомбардування електрони захоплює магнітне поле, що зумовлює складний циклоїдальний рух часток за замкнутими траєкторіями у поверхні мішені. Електрони опиняються немов у пастці, створеній, з одного боку, магнітним полем, який повертає їх на катод, а з іншого боку – поверхнею мішені, яка їх відштовхує. Електрон циркулює в цій пастці до тих пір, поки не відбудеться декілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу, в результаті яких він втратить отриману від електричного поля енергію. Таким чином, велика частина енергії електрона перед потраплянням на анод витрачається на іонізацію та збудження, що значно підвищує ефективність процесу іонізації та сприяє збільшенню концентрації додатних іонів у поверхні мішені, а це, у свою чергу, збільшує інтенсивність іонного бомбардування мішені та швидкість осадження покриття.

8.4. Іонне осадження покриттів

До методів іонного осадження покриттів належать методи, у яких осаджувана плівка зазнає інтенсивного впливу іонного компонента корпускулярного потоку, що забезпечує зміни у структурі та властивостях як перехідної зони, так і самого покриття. Такий результат можливий або у разі високого ступеня іонізації корпускулярного потоку (газоподібного або металевого) осаджуваної речовини, або у випадку високої енергії іонного компонента корпускулярного потоку.

Джерела генерації металевого компонента потоку являють собою іонно-термічні та холодні системи розпилення. У перших системах переведення перенесеного матеріалу з твердого в пароподібний стан здійснюють термічним нагріванням, у другому – розпиленням з поверхні інтегрально холодної мішені

(катоду).

Ці методи дозволяють отримувати покриття з високими експлуатаційними характеристиками кристалізації плівок і їх властивостей. У машинобудуванні їх застосовують для отримання зносостійких і корозійностійких покриттів як з чистих металів, так і зі з'єднань.

Недоліком методу іонного осадження покриттів є низький відсоток іонізованих часток у загальному потоці випаруваного матеріалу, що впливає на адгезійні властивості покриття та умови перебігу реакції з реактивним газом.

8.5. Іонно-дифузійне насичення

Система іонного насичення – вакуумна камера, в електричному плані являє собою двоелектродну схему: катод-електрод з деталями; другий електрод (анод) – ущемлений корпус вакуумної камери. Для проведення процесу іонами насичення в вакуумну камеру подається легуючий матеріал (елемент чи хімічне з'єднання) в газоподібному (пароподібному) стані, а до деталей прикладають від'ємний потенціал – 300 ... 1000 В. Поверхню деталі бомбардують додатними іонами легуючого елемента з газорозрядної плазми, що дозволяє значно скоротити тривалість процесу насичення поверхні.

Цей метод найбільш широко застосовують під час азотування сталей і металів.

Переваги методу над печами звичайного газового азотування:

- скорочення тривалості циклу в 3 – 5 разів;
- зменшення деформації деталей у 3 – 5 разів;
- можливість проведення регулюючих процесів азотування з отриманням шарів із заданим складом і структурою;
- можливість зменшення температури процесу азотування до 350 ... 400 °С, що дозволяє запобігти знеміцненню матеріалів «серцевини» виробів;
- зменшення крихкості шару та підвищення його експлуатаційних характеристик;
- простота захисту окремих ділянок деталей від азотування;
- усунення небезпеки вибуху печі;
- зниження питомих витрат електричної енергії в 1,5 – 2 рази та робочого газу в 30-50 разів;
- покращення умов праці термістів.

До недоліків методу іонно-дифузійного насичення належать:

- неможливість прискорення процесу шляхом збільшення щільності іонного потоку, бо через перегрівання деталей знижується поверхнева твердість;
- інтенсифікація процесу іонного азотування;
- накладення магнітного поля з метою збільшення щільності струму та зниження тиску газу;
- створення поверхні деталі заданої дефектності (попереднє пластичне

деформування, термічна обробка).

8.6. Іонне легування (імплантація)

У процесі імплантації тонкий поверхневий шар насичується елементом, потоком іонів якого оброблюють (бомбардують) поверхню. Імплантований елемент може входити до кристалічних ґрат основи у вигляді твердого тіла або створювати дрібнокристалічні виділення хімічних з'єднань із компонентами матеріалу основи. Крім того, під час проникнення іона в кристалічних ґратах активується зміщення атомів, що призводять до створення великої кількості дефектів кристалічних ґрат. Товщина цього насиченого дефектами, а відтак, зміцненого шару в багато разів перевищує глибину проникнення іонів. Товщина модифікованого шару – декілька мікрон.

Імплантація суттєво знижує спрацьовування і тертя, збільшує антикорозійні властивості металу.

Контрольні завдання і запитання

1. Назвіть етапи вакуумного іонно-плазмового зміцнення.
2. Дайте визначення поняття «сублімація»?
3. Схарактеризуйте вакуумну іонно-плазмову технологію.
4. Розкрийте сутність магнетронного розпилення.
5. У чому полягає іонна імплантація?

Розділ 9

МАГНІТНЕ ЗМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Магнетизм цікавить людство майже 200 років. Електромагнітне поле успішно застосовують у сучасній техніці та технології для керування властивостями тіла та рідини. Магнітну обробку застосовують для покращення властивостей конструкційних матеріалів, води, розчинів, дисперсних систем, гуми, різального та вимірювального інструментів, зубчастих коліс, тросів, заклепок, станин тощо.

Впровадження магнітної обробки дозволить зменшити залишкові напруження та утомні напруження в деталях і конструкціях, підвищити зносостійкість та довговічність різних деталей.

9.1. Методи магнітної обробки

Застосовні на практиці методи магнітної обробки матеріалів різні як за своїми фізичними та технологічними принципами, так і за конструктивним застосуванням пристроїв.

Методи магнітної обробки:

- одним імпульсом постійного магнітного поля з напруженням 100 ... 1000 кА/м за різної тривалості дії: 10 ... 300 с і більше;
- імпульсним магнітним полем напруженням 50 ... 2000 кА/м з тривалістю імпульсу 0,1 ... 10 с і з різною кількістю імпульсів.

До методу обробки постійним магнітним полем належить:

- обробка одним імпульсом з подальшим розмагнічуванням через 8 ... 24 год;
- обробка спрямованою (локальною) концентрацією магнітного потоку на заготовку;
- обробка без подальшого розмагнічування;
- динамічна обробка: деталь у полі постійної напруженості обертається з деяким прискоренням частоти обертання упродовж 1...5 с;
- обробка деталі у разі вільного переміщення в порожнині індуктора;
- обробка деталі у випадку вільного переміщення у безпосередній близькості від порожнини індуктора.

Методи імпульсної магнітної обробки:

- обробка без подальшого розмагнічування;
- багатоциклова обробка (2 – 10 циклів) з витримкою між циклами 1...20 хв;
- обробка із застосуванням феромагнітних сердечників і локальних концентраторів магнітного поля;
- обробка в металевих контейнерах або камерах із застосуванням феромагнітної рідини або феромагнітного порошку;
- комбіновані методи.

До перспективних методів імпульсної магнітної обробки належить:

– обробка з зростаючою амплітудою імпульсу. Застосовують для зняття напружень у виробах, працюючих у разі ударних навантажень. Режим: напруженість поля – 100 ... 800 кА/м, тривалість циклу обробки 0,1 ... 1,0 с, кількість циклів 2 – 10, термін витримки між циклами 1 ... 20 хв.

– обробка з обертанням деталі в соленоїдах. Застосовують для зняття напружень в місцях зварювання різнорідних матеріалів. Режим: напруженість поля – 100 ... 800 кА/м, кількість циклів 2 – 10, термін витримки між циклами 1 ... 20 хв, частота обертання деталі в соленоїді 1000 ... 10000 об/хв упродовж 1 ... 5 хв;

– обробка обертальним магнітним полем. Застосовують для підвищення довговічності готових виробів. Режим: напруженість поля 100 ... 800 кА/м, тривалість циклу 0,1 ... 1,0 с, кількість циклів 2 – 10;

– обробка холодом та імпульсною магнітною обробкою. Застосовують для зміцнення відповідальних деталей, працюючих за низьких температур. Режим: обробка в контейнерах за 100 ... 200°C, напруженість поля 400 ... 2000 кА/м, тривалість циклу 0,3 ... 2,0 с, кількість циклів 1 – 10, час між імпульсами 30 ... 3000 с.

9.2. Сутність магнітної обробки

Під час обробки в магнітному полі (рис. 31) заготовку поміщають всередину соленоїда, до якого підключають генератор імпульсів. Напруженість магнітного поля, тривалість імпульсів і кількість імпульсів залежать від конкретної оброблюваної деталі, зокрема, від її матеріалу, конфігурації, габаритів і процесу термообробки.

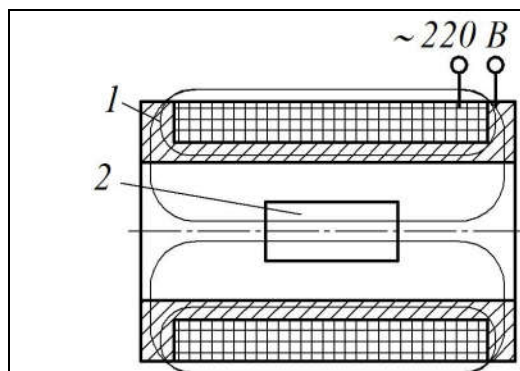


Рис. 31. Обробка імпульсним магнітним полем:
1 – заготовка; 2 – соленоїд

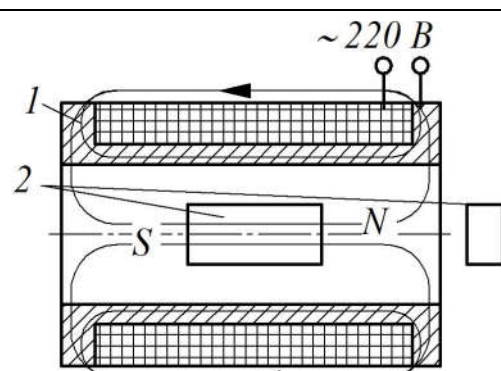


Рис. 32. Обробка постійним магнітним полем:
1 – соленоїд; 2 – заготовка

У разі обробки постійним магнітним полем (рис. 32) соленоїд 1 підключають до джерела постійного струму, внаслідок чого виникає магнітне поле з полюсами N і S. Заготовку 2 розміщують всередині соленоїда або поряд з полюсом N. Обов'язково відбувається розмагнічування. Відомо, що кристал

(зерно) розмірами $10^{-2} \dots 10^{-3}$ см складається із субкристалів (субзерен), середній розмір яких $10^{-3} \dots 10^{-4}$ см.

Субзерна складаються з блоків розмірами $10^{-4} \dots 10^{-5}$ см. Згідно з теорією магнетизму кристали поділяють на замкнені сфери – домени, кожна з яких має певний магнітний момент. У цілому кристал ненамагнічений, тому що магнітні моменти доменів орієнтовані у просторі рівно ймовірно. Середній розмір доменів перебуває в межах $10^{-2} \dots 10^{-7}$ см.

На кривій намагнічування $B = f(H)$ феромагнетика (рис. 33), який складається із сукупності окремих кристалів, прямокутниками зображено напрямки намагнічування доменів за різних значень намагнічуючого поля. Вихідний стан відповідає розмагніченому зразку ($H = 0$, $B = 0$), тобто рівно ймовірному розташуванню доменів, намагнічувальних у легкому напрямку (за ребрами кубу феромагнетика з кубічною кристалічною структурою).

Слабким полям відповідає ділянка оборотного зміщення меж. На цій ділянці відбувається збільшення об'ємів доменів, вектори намагнічуваності (магнітні моменти) яких створюють найменший кут із напрямком зовнішнього поля за рахунок «антипаралельних» доменів. Процес практично є зворотним, бо після вилучення зовнішнього поля зразок повертається у первинний стан.

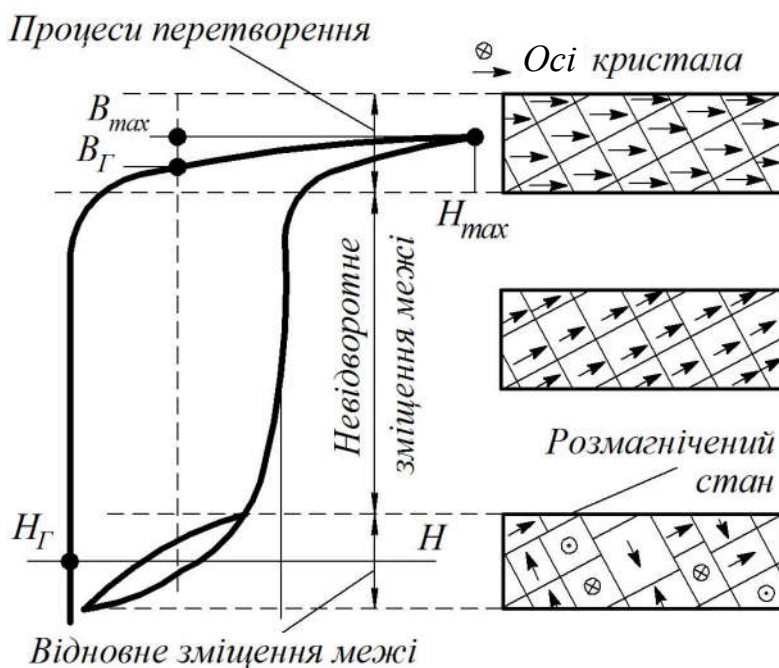


Рис. 33. Крива намагнічування феромагнетика

На ділянці необоротного процесу під дією енергії кристалографічної магнітної анізотропії відбувається збільшення об'єму тих доменів, вектор намагнічуваності яких створює найменший кут з напрямком магнітного поля. Це збільшення відбувається за рахунок зменшення об'єму несприятливо розташованих доменів (явище анізотропії). Одночасно зі зростанням доменів під дією енергії магнетострикційної деформації відбувається процес обертання (повороту) доменів навколо осі легкого намагнічування. Магнетострикція, яка

виникає під дією магнітного поля, деформує кристалічну решітку.

Поворот доменів відбувається в напрямку зовнішнього поля. У разі вилучення намагнічуючого поля не відбувається зворот у первинний стан. Згідно з магнітною теорією домени зростають у процесі магнітної обробки. Але як відомо, чим менше зерен, тим вища твердість металу, тому для зміцнення металу важливий початковий момент утворення доменної структури до моменту зростання доменів.

Необхідною умовою обробки імпульсним магнітним полем є те, щоб напруженість зовнішнього магнітного поля H_0 була більша $H_{\max}$ оброблюваного матеріалу. Дослідами доведено, що в процесі створення доменної структури виникають доменні межі, товщина яких залежить від енергії магнітної анізотропії та магнетопружної енергії. Розміри самих доменів залежать від наявності та розподілення в зразку неоднорідностей: неметалевих включень, розмірів зерен, скупчень дислокацій тощо.

Дослідженнями доведено, що в результаті попередньої термообробки металу та наступної імпульсної магнітної обробки відбувається перебудова дислокаційної структури: частина дислокацій рівномірно розподіляється всередині зерен, а частина перестроюється з утворенням субграниць. При цьому, чим крупніше зерно, тим більший відтік дислокацій на субграниці, обмежуючі зерно.

У разі збільшення часу обробки магнітним полем відбувається зростання доменів. Це зростання розпочинається у доменів, векторні намагніченості яких найбільш близькі до напрямку зовнішнього поля H_0 . Відтак найбільш сильні домени, у яких вектори H збігаються з H_0 , «з'їдають» більш слабкі, в яких вектори H протилежні з H_0 .

У результаті імпульсної магнітної обробки упродовж перших декількох секунд відбувається збільшення дисперсності структури (подрібнення) поверхневого шару та щільності дислокацій. У разі збільшення терміну магнітно-імпульсної обробки дисперсність структури зменшується через зростання доменів всередині зерен первинної структури та дещо знижується щільність дислокацій.

Контрольні завдання і запитання

1. Назвіть методи обробки деталей постійним магнітним полем та перелічіть методи імпульсної магнітної обробки.
2. У який спосіб здійснюють намагнічування феромагнетиків?
3. Яким має бути зерно магнітних матеріалів?
4. Дайте визначення поняття «магнітний домен».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин [Текст]/ М.А. Батлер.– М: Машиностроение, 1978. – 184 с.
2. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями [Текст] / А.С. Верещака, И.П.Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
3. Лахтин, Ю.М. Материаловедение [Текст]: учеб. для высш. техн. учебных заведений, 3-е изд., перераб. и доп./ Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
4. Лещинский, Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение [Текст] / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.И. Комаров. – К.: Техника, 1990. – 109 с.
5. Полетаев, В.А. Методы обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей машин [Текст]: метод. пособие/ В.А.Полетаев. – Ивановский государственный энергетический университет, 1998. – 132с.
6. Спеціальні покриття в машинобудуванні [Текст]: навч. посіб. / А.Г. Фесенко, М.М. Убізький, О.В. Кулик, Д.І. Шевчук. – Д: РВВ ДНУ, 2009 – 92 с.
7. Термическая обработка в машиностроении [Текст]: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783с.

ЗМІСТ

Передмова	3
Розділ 1. Параметри стану поверхневого шару деталей машин	4
1.1. Параметри стану поверхневого шару	4
1.2. Структурні недосконалості в реальних кристалах	6
1.3. Створення та розмноження дислокацій	8
1.4. Параметри фізичного, хімічного та механічного стану металу	10
Розділ 2. Механізм спрацьовування деталей, пар тертя, робочих органів та його основні види	13
2.1. Основні поняття	13
2.2. Фізичні основи руйнування металів	17
2.3. Класифікація вузлів тертя	19
2.4. Водневе спрацьовування	20
2.5. Абразивне спрацьовування	22
2.6. Окиснювальне спрацьовування	23
2.7. Спрацьовування внаслідок зминання	23
2.8. Спрацьовування внаслідок диспергування	23
2.9. Спрацьовування в результаті окрихчування новостворених структур	24
2.10. Корозія	24
2.11. Кавітаційне спрацьовування	25

2.11.1. Гідродинамічне спрацьовування	25
2.11.2. Вібраційна кавітація	26
2.12. Ерозійне спрацьовування	27
2.13. Схоплювання та заїдання поверхонь під час тертя	27
2.14. Спрацьовування у випадку фретинг-корозії	28
2.15. Тріщиноутворення на поверхні тертя	29
2.15.1. Утомне спрацьовування	29
2.15.2. Тріщиноутворення термічного походження	30
2.16. Вибірковий перенос під час тертя	31
Розділ 3. Конструктивні та експлуатаційні методи підвищення зносостійкості деталей машин	33
3.1. Конструктивні методи підвищення зносостійкості	33
3.1.1. Вибір матеріалів для тертьових деталей	33
3.1.2. Вибір матеріалів у процесі конструювання вузлів тертя	34
3.1.3. Числові критерії працездатності матеріалів у парах тертя	34
3.1.4. Правила сполучення матеріалів	34
3.1.5. Пористість матеріалу	35
3.1.6. Розміщення матеріалів пар тертя за твердістю	35
3.1.7. Заміна у вузлах машин тертя ковзання тертям кочення	36
3.1.8. Врахування температурних деформацій деталі	36
3.1.9. Засоби встановлення вузлів, які зменшують додаткові навантаження під час монтажу та у процесі експлуатації	37
3.1.10. Захист робочих поверхонь пар тертя від забруднення	37
3.2. Методи підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя машин в експлуатації	38
3.2.1. Змінювання властивостей мастильного матеріалу в процесі експлуатації	38
3.2.2. Відкладення на деталях і в мастильній системі	39
3.2.3. Піноутворення	39
3.2.4. Обкатка машин	39
Розділ 4. Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей машин	41
4.1. Постановка завдання забезпечення якості поверхневого шару	41
4.2. Класифікація методів зміцнювальної обробки деталей машин	43
4.2.1. Зміцнення з утворенням плівки на поверхні	43
4.2.2. Зміцнення зі змінюванням хімічного складу поверхневого шару металу	43
4.2.3. Зміцнення зі змінюванням структури поверхневого шару	44
4.2.4. Зміцнення зі змінюванням енергетичного запасу	44

поверхневого шару	
4.2.5. Зміцнення зі змінюванням мікрогеометрії поверхні з наклепом	44
4.2.6. Зміцнення зі змінюванням структури всього об'єму металу	44
Розділ 5. Зміцнення під час поверхневого пластичного деформування (ППД)	45
5.1. Класифікація та сфери найбільш раціонального застосування методів зміцнення поверхневого пластичного деформування деталей	46
5.1.1. Ударні способи обробки	46
5.1.2. Статичні види зміцнення	48
5.2. Основні правила призначення та вибір методів зміцнення поверхневого пластичного деформування елементів конструкцій	49
5.3. Параметри робочих тіл, середовищ та інструментів, застосовуваних під час поверхневого пластичного деформування	50
5.4. Підготовка поверхонь до зміцнення способом поверхневого пластичного деформування	51
Розділ 6. Основи хіміко-термічної обробки	53
6.1. Хіміко-термічна обробка	53
6.2. Цементация	54
6.3. Азотування	56
6.4. Нітроцементация	58
6.5. Азотування штампових сталей перед гартуванням	59
6.6. Технологія термічної обробки сталі у разі індукційного нагрівання	63
6.7. Фізичні основи та особливості індукційного нагрівання	65
6.8. Технологія поверхневого гартування сталі під час індукційного нагрівання	68
6.8.1. Фактори, які обумовлюють високий комплекс властивостей сталі після електрогартування	68
6.8.2. Раціональні режими індукційного нагрівання для поверхневого гартування	69
6.8.3. Вибір режимів охолодження під час поверхневого гартування	72
6.8.4. Вплив низького відпуску на властивості поверхнево- загартованої сталі	74
6.8.5. Самовідпуск під час індукційного гартування	75
6.9. Термодифузійне хромування	76
6.10. Силіцирування	76
6.11. Оксидування	77
6.12. Фосфатування	77

6.13. Сульфідкування	77
6.14. Хромування, залізнування та електромеханічний спосіб зміцнення деталей	78
6.14.1. Електролітичне хромування	78
6.14.2. Залізнування	79
6.15. Електромеханічний спосіб зміцнення деталей	79
Розділ 7. Методи лазерного, електронно-променевого, плазмового та детонаційного зміцнення деталей машин	81
7.1. Лазерне зміцнення	81
7.1.1. Лазерна наплавка	82
7.1.2. Лазерне устаткування	82
7.2. Електронно-променева обробка	82
7.2.1. Електронно-променеве устаткування	83
7.3. Методи детонаційного та плазмового нанесення покриття	83
7.3.1. Обладнання для детонаційного нанесення покриття	84
7.3.2. Плазмове поверхнєве зміцнення деталей	85
7.3.3. Устаткування для плазмового зміцнення деталі	85
7.3.4. Технологічні варіанти плазмового зміцнення деталей	88
Розділ 8. Вакуумне іонно-плазмове зміцнення, іонне магнетронне розпилення, іонне легування	90
8.1. Вакуумне іонно-плазмове зміцнення деталей машин	90
8.2. Іонне розпилення	91
8.3. Магнетронне розпилення	92
8.4. Іонне осадження покриттів	93
8.5. Іонно-дифузійне насичення	94
8.6. Іонне легування (імплантація)	95
Розділ 9. Магнітне зміцнення деталей машин	96
9.1. Методи магнітної обробки	96
9.2. Сутність магнітної обробки	97
Список використаної літератури	100

Темплан 2015, поз. 4

Навчальне видання

**Методи поверхневого зміцнення
у процесі виготовлення
деталей машин**

Навчальний посібник

Редактор К.І. Овчарова
Техредактор Т.І Севост'янова
Коректор О.А. Хрущова

Підписано до друку 30.03.15. Формат 60×84/16. Папір друкарський. Друк
плоский. Ум. друк. арк. . Ум. фарбовідб. . Обл.-вид. арк. . Тираж 50 пр. Зам. № .
РВВ ДНУ, просп. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, 49010.
ПП «Ліра ЛТД», вул. Погребняка, 25, м. Дніпропетровськ, 49010.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №188 від 19.09.2000 р. Фактична адреса: вул. Наукова, 5