Самостійна робота за темою 9

Тема: Діагностика вузлів тертя

(Самостійно опрацювати матеріал за темою 9 згідно плану)

9.1. Контактування поверхонь тертя.
9.2. Легування матеріалів для трібоелементів.
9.3. Методи створення поверхневого зміцнення матеріалів.
9.4. Хіміко-термічна обробка деталей машин.
9.5. Електрохімічні і хімічні формування зносостійких покриттів.

9.1. Контактування поверхонь тертя і процес їх припрацювання

При випадковому розташуванні шорсткостей на поверхнях контактуючих тіл контактне зближення цих тіл під дією зовнішнього навантаження лімітує фактична площа контакту, обумовлена геометрією контактуючих поверхонь.

На рис. 9.1 показані основні характеристики геометрії шорстких поверхонь: шорсткість з максимальною висотою профілю R_{max}, хвилястість з максимальною висотою хвилі R_{Wmax} і макровідхилення від горизонтальної базової площини з розміром δ.

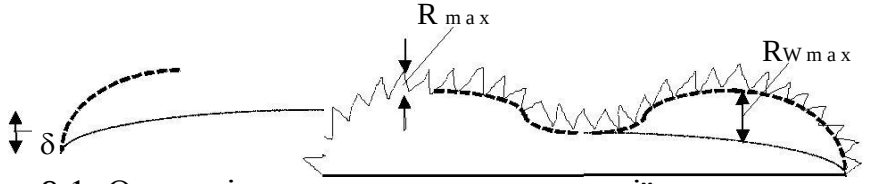


Рис. 9.1. Основні характеристики геометрії шорстких поверхонь

Для оцінювання шорсткості використовуються оптичні, щупові, електронно-мікроскопічні та інші методи. Промислового поширення набув метод щупів. Суть його полягає в тому, що по поверхні ковзає голка з радіусом заокруглення 2...10 мкм, значно меншим, ніж радіус заокруглення вершин мікронерівностей. Коливання голки у вертикальному напрямку перетворяться на електричні сигнали, що надходять у мікропроцесор, який видає в цифровому вигляді основні характеристики профілю. Профілографи серійно випускає завод "Калібр", а за кордоном найбільш поширені прилади фірми "Хьюлет-Пакард".

На рис. 9.2 зображена схема сучасного профілографа. Голка 1 ковзає по шорсткій поверхні і разом з якорем 2 коливається відносно призми 3, у результаті чого міняється зазор між якорем 2 і сердечником 4, який генерує змінний сигнал у котушках 5 і 6, що підсилюється блоком 7 та реєструється на стрічці 10 самописа 8, а також стрілочним приладом 9. Мікропроцесор 11 призначений для обчислення стандартних показників мікрогеометрії, що зображуються на цифровому табло. Для виключення впливу хвилястості призма приладу прикріплена до кульової опори 12. Кульова опора забезпечує ковзання по вершинах мікровиступів, обгинаючи хвилі, оскільки, якщо опора

буде ковзати по плоскій гладкій поверхні, то одночасно будуть записуватися шорсткість і хвилястість (рис. 9.1). Прилад дозволяє змінювати в широкому діапазоні масштаб збільшення по осях *X* і *Y*. Можливе збільшення по осі *Y* до 100 000 разів.

В останні роки розроблено методи отримання профілограм на електроних скануючих мікроскопах. Розділення у цьому випадку досягає нанометрів. Вдається реєструвати шорсткість молекулярних розмірів (субмікрошорсткість), а також мікродефекти кристалічної структури.

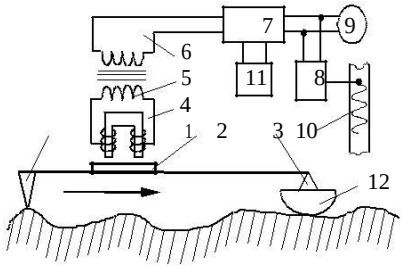
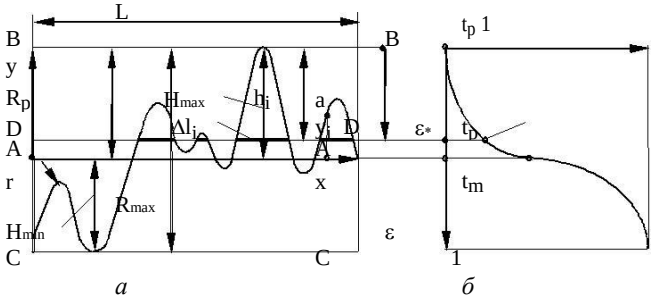


Рис. 9.2. Схема профілографа

Розглянемо основні характеристики мікрогеометрії більш докладно, відповідно до діючого ГОСТ 2789–73.

Встановлені цим стандартом характеристики шорсткостей ілюструє рис. 9.3. Основні з них висотні: R_a, R_z і R_{max} і крок мікронерівностей.



а *б*

Рис. 9.3. Характеристики шорсткостей *а* – характеристики шорсткостей; *б* – опорна крива

Найчастіше в техніці застосовують характеристику R_a – середнє арифметичне абсолютних відхилень значень профілю шорсткостей від середньої лінії в межах базової довжини *L*:

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |y(x)|dx \cong \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y_i| \quad , \qquad (9.1)$$

де *L* – базова довжина, у межах якої знаходиться достатня кількість мікронерівностей з погляду статистики;

y_i – відстань точки профілю від середньої лінії (рис. 6.3, *а*); *n* – кількість точок профілю, у яких виміряна y_i.

Положення середньої лінії *AA* знаходиться з припущення, що вона поділяє площу профілю навпіл $\left(\int_0^L y dx = 0 \right)$. Профіль укладений між лініями виступів

BB і западин *CC*, що проводяться через вершини найвищих виступів і найнижчі точки западин.

Параметр R_z – характеризує середню відстань між п'ятьма вищими вершинами виступів і п'ятьма нижчими точками западин:

$$R_z = \frac{1}{5}\left(\sum_{1}^{5}\left|H_{i\max}\right| + \sum_{1}^{5}\left|H_{i\min}\right|\right). \qquad (9.2)$$

Відстань між лініями виступів і западин (R_{max}) дорівнює товщині шорсткого шару. Видалення лінії виступів від середньої лінії позначається R_p. Крім перерахованих характеристик використовуються також середній крок мікронерівностей, середній кут нахилу профілю, середній радіус заокруглення виступу.

За своєю формою виступи нагадують пологі гірські хребти. Кут при вершині для усіх видів обробки звичайно складає від 150° до 176°. Найбільш близьким за формою до реального виступу є еліпсоїд.

Зазвичай шорсткість має спрямований характер, що відбиває траєкторію руху обробного інструмента. У зв'язку з цим профілограми знімають у подовжньому і поперечному напрямках. Середній радіус вершини виступу знаходять як середнє геометричне зі значень, обмірюваних у подовжній і поперечній профілограмах:

$$r_{ср.} = r\sqrt{r_{ср.пр.пов} \cdot r_{ср.попер.}}. \qquad (9.3)$$

Для статистичного аналізу і зображення характеристик шорстких поверхонь використовують закон розподілу матеріалу за глибиною шорсткого шару на обраній базовій довжині *L*, яку характеризує опорна крива (рис. 6.3, *б*). Цю криву одержують як залежність відносної суми перетинів мікро виступів:

$$t_p = \frac{1}{L}\sum_{1}^{m}\Delta L_i \qquad (9.4)$$

від відносного зближення:

$$\varepsilon_* = \frac{a}{R_{max}}. \qquad (9.5)$$

Для аналітичного опису опорної кривої використовують степеневу функцію. Так, початкову ділянку опорної кривої (рис. 6.3, *б*), прийнято описувати виразом:

$$t_p = t_m \varepsilon^{\nu}, \qquad (9.6)$$

де $\varepsilon = a / R_p$, $t_m = t_p$ при $a = R_p$, $\nu > 1$ – параметри опорної кривої.

Кількість виступів з видаленням від верхньої границі шорсткого шару змінюється за законом:

$$n = n_0 \left(\frac{a}{\kappa_p} \right)^{\nu-1}, \qquad (9.7)$$

де n_0 – кількість виступів, вершини яких лежать вище середньої лінії. Використовуючи стандартні характеристики, вирішують задачу по оцінці фактичної площі контакту шорстких поверхонь.

Вплив шорсткості на формування площі фактичного контакту. На рис. 9.4 показана структурна схема площі контакту. Площадки фактичного контакту ΔA_{ri} згруповані на площах дотику хвиль, сукупність яких складає контурну площу контакту ΔA_{ci}. Загальна площа дотику тіл (удавана), у межах якої знаходяться фактичні площі контакту, називається номінальною площею контакту A_a.

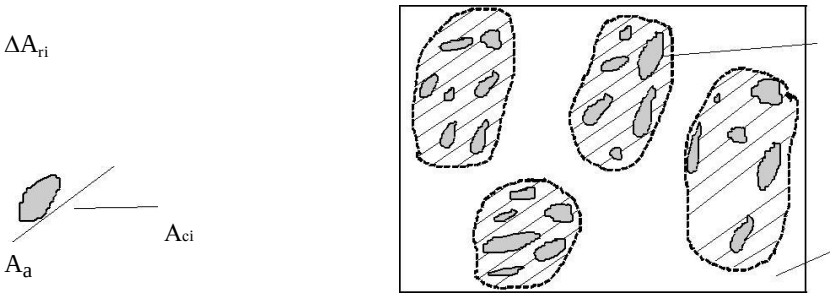


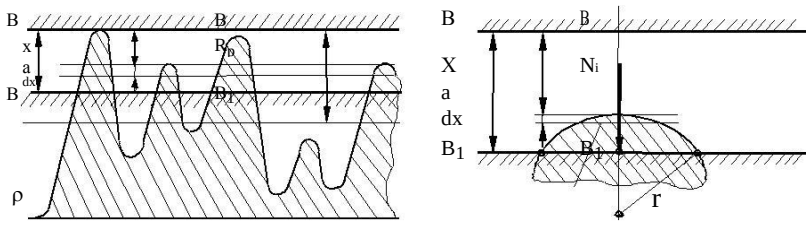
Рис. 9.4. Структурні компоненти реального контакту шорстких поверхонь: A_a – номінальна площа контакту; A_{ci} –контурна площадка;

ΔA_{ri} – фактична площа одиничної плями контакту Сумарна площа фактичного контакту:

$$A_r = \sum_1^n \Delta A_{ri} . \qquad (9.8)$$

З метою розрахунку фактичної площі контакту шорсткість поверхні звичайно моделюють набором сферичних сегментів, вершини яких розкидані по висоті таким чином, щоб зберегти закон розподілу матеріалу в шорсткому шарі, що задається за допомогою отриманої з досліду опорної кривої.

Розглянемо на рис. 9.5 контакт шорсткої поверхні з гладкою, що спрощує задачу, а результати можна перенести на контакт двох шорстких поверхонь. Оскільки у трібосистемах деформація виступів невелика порівняно з їх розміром, то можна знехтувати спотворенням форми і вважати, що площадка контакту A_{ri} дорівнює площі перетину виступу на відстані від вершини рівному деформації a_i, яку називають зближенням.



а *б*

Рис. 9.5. До аналізу оцінки фактичної площі контакту

Спочатку розглянемо деформацію одного виступу (рис. 9.5). При пружній деформації фактична площа контакту і зближення розраховуються за формулами Герца:

$$\Delta A_{ri} = 0{,}82\pi (jN_i r)^{2/3}; \quad (9.9)$$

$$a_i = 0{,}82(jN_i/\sqrt{r})^{2/3}, \quad (9.10)$$

де $j = \frac{1-\theta_1^2}{E_1} + \frac{1+\theta_2^2}{E_2}$ – пружна стала;

θ_1, θ_2 – коефіцієнти Пуасона;

E_1, E_2 – модулі Юнга для першої і другої поверхонь; N – нормальне навантаження; r – радіус виступу.

Якщо контактують два сферичних виступи, то $r = r_1 r_2/(r_1 + r_2)$ – наведений радіус кривизни виступів.

При пластичній деформації можливе або проникнення, або зчеплювання виступу. Середній тиск на контакті вважається рівним твердості більш м'якого матеріалу. Тоді:

$$A_{ri} = N_i/HB, \quad (9.12)$$

$$a_i = N_i/2\pi rHB, \quad (9.11)$$

де HB – твердість за Бринелем,

що визначається як частка від розподілу навантаження на площу відбитка, який залишився після проникнення твердої кульки в пластичний матеріал.

Формулу 6.12 отримуємо з геометричних міркувань (рис. 65, *б*):

$$\rho_i^2 = r^2 - (r - a_i)^2 \cong 2a_i r; \quad (9.13)$$

$$\Delta A_{ri} = \pi\rho_i^2 \cong 2\pi r a_i, \quad (9.14)$$

звідси

$$a_i \cong \Delta A_{ri}/2\pi r \cong N_i/2\pi rHB. \quad (9.15)$$

Образне подання фактичної площі контакту ілюструють за допомогою такого прийому. Якщо умовно зрізати шорсткість на рівні, що відповідає частині висоти виступів, то суму площадок, що утворилися, у перетинах виступів можна вважати такою, що дорівнює фактичній площі контакту. Фактичну площу контакту обчислюють, користуючись рівнянням 6.6 опорної кривої. Це справедливо, коли площа перетину виступу дорівнює площі контакту, за умови, що зближення дорівнює відстані від вершини до січної площини. Так, приблизно, і відбувається при пластичній деформації. З формул 6.9, 6.10 випливає, що при пружній деформації площа перетину по середній лінії ΔA_{si} пов'язана з площею контакту A_{ri} таким чином:

$$A_{ri} = \alpha \cdot A_{si}, \quad (9.16)$$

де коефіцієнт осадки $0{,}5 \le \alpha \le 1$. З урахуванням цього фактичну площу контакту можна виразити через опорну криву в такий спосіб:

$$A_r = \alpha A_s = \alpha A_c t_p = \alpha \cdot A_c \cdot t_m \varepsilon^{\nu} = \alpha A_{so}\left(\frac{a}{R_p}\right)^{\nu} \qquad (9.17)$$

Тут враховано, що опорна крива однакова для профілю і поверхні, тобто:

$$t_p = \sum_1^m \Delta L_i / l = \sum_1^n \Delta A_{si} / A_c = A_s / A_c, \quad t_m = A_{so} / A_c, \qquad (9.18)$$

де A_{so} – сума перетинів виступів на рівні середньої лінії; A_c – контурна площа контакту.

Відзначимо, що для поверхонь припрацьованих трібосистем характерний пружний контакт. Пластичний контакт може частково проявитися при перших навантаженнях, коли стискуються найбільш високі виступи. Подальші навантаження відбуваються вже в умовах, наближених до пружного контакту. Пластичний контакт має місце також при обробці матеріалів різанням, куванням, штампуванням, пресуванням, накаткою тощо.

Розрахунки показують, що з метою спрощення обчислень контакт двох шорстких поверхонь можна приводити до контакту шорсткої і гладкої поверхні, якщо замість параметрів ν, t_m, R_{max}, r використовувати еквівалентні значення, що характеризують обидві поверхні:

$$\nu_\Sigma = \nu_1 + \nu_2; \qquad (9.19)$$

$$b_\Sigma = K_2 t_{m1} \cdot t_{m2} R_{p\Sigma}^{\nu_\Sigma} / R_{p1}^{\nu_1} R_{p2}^{\nu_2}; \qquad (9.20)$$

$$R_{p\Sigma} = R_{p1} + R_{p2}; \qquad (9.21)$$

$$r_\Sigma = r_1 r_2 / (r_1 + r_2). \qquad (9.22)$$

Тут

$$K_2 = \partial(\nu_1 + 1)\partial(\nu_2 + 1) / \partial(\nu_1 + \nu_2 + 1) \qquad (9.23)$$

Індекси 1, 2 відносяться до першої і другої поверхонь.Якщо поверхні мають яскраво виражену хвилястість, то її параметри визначають з хвилеграм, які знімаються за допомогою профілографів, і використовують математичний опис, розроблений для шорсткого шару. Контурну площу контакту можна розрахувати за формулою

$$A_c = \left(\frac{2R_{max}}{H_B}\right)^{\nu+\omega} \left(\frac{r}{2R_{max}}\right)^{\omega} \left(\frac{2K_{\nu+\omega} N A}{\alpha M}\right)^{\frac{\nu}{\omega+\nu+\omega}}, \qquad (9.24)$$

де H_B – найбільша висота хвилі; A_a – номінальна площа контакту;

α і ω –коефіцієнти, які при пружному контакті дорівнюють 0,5, а при пластичному 1 і 0 відповідно;

ν_ω – параметр опорної кривої для хвилястості; K_4 – стала інтегрування;

M – характеристика механічних властивостей (при пружному контакті $M = 0{,}43j$; при пластичному – $M \cong H_B$).

Якщо хвилястість виражена слабко ($H_B \leq R_{max}$), то нею можна знехтувати. Окремо зупинимося на формуванні фактичної площі контакту гум, оскільки вони широко використовуються у трібосистемах і механізмах, особливо, в автотранспортних засобах. Гуми, незалежно від природи (на основі натуральних або штучних каучуків), мають надзвичайно низький модуль пружності (порядку 5...30 МПа). Коефіцієнт Пуассона в них близький до 0,5, отже, навіть при невеликих тисках вони підпорядковуються закону Паскаля, поводяться як рідини. На відміну від твердих тіл, уже при тиску порядку значення модуля пружності, фактична площа контакту в них наближається по величині до номінальної площі. На рис. 6.6 показаний зразковий графік залежності фактичної площі контакту від номінального тиску.

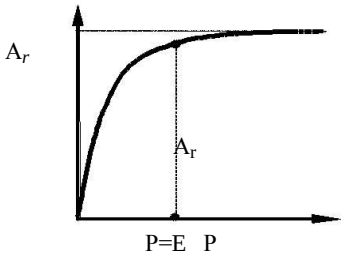


Рис. 9.6. Залежність площі фактичного контакту гуми від номінального тиску

Величину фактичної площі контакту можна розрахувати за уточненою формулою Г.М. Бартенєва – В.В. Лаврентьєва:

$$A_r \left(= A_a \mid 1 \quad - K_1 e^{-\delta (N / A_a E)^{2/3}} \right), \qquad (9.23)$$

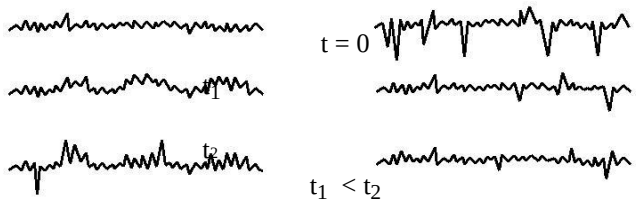
де K_1=0,8...1; $\delta \cong 1{,}2(\alpha r/R_z)^{1/3}$; $\alpha = n_0/n_m$, n_0 – кількість виступів, пересічених середнім рівнем; n_m – кількість основ виступів у розрахунку на одиницю номінальної площі контакту; E – модуль пружності гуми.

Наведені формули для розрахунку фактичної площі контакту не враховують впливу часу дії навантаження і температури. Усі матеріали у меншій мірі володіють в’язкопружністю і в'язкопластичністю, тобто пружна і пластична деформації виникають не миттєво після навантаження, а розвиваються в часі. Швидкість наростання деформації збільшується з підвищенням температури.

Період припрацювання – це нерівноважна стадія зношування твердих тіл, що характеризується змінною інтенсивністю зношування *I*. З плином часу *I* знижується, наближаючись до деякої постійної величини. У цей період

змінюється мікрогеометрія поверхонь тертя спряжених тіл, трансформується структура і змінюються властивості поверхневих шарів. У початковий момент часу (відразу після збирання трібосистеми) деталі контактують по декількох виступах поверхні, сумарна фактична площа контакту яких мала. Великі тиски на плямах контакту обумовлюють значну пластичну деформацію, зминання і руйнування контактуючих нерівностей. В результаті висота найбільш виступаючих нерівностей зменшується, у контакт вступають нові нерівності, збільшується площа фактичного контакту, знижується тиск і теплова напруженість на плямах контакту. Крім того, нерівності одного тіла, проникнувши в об'єм іншого, "проорюють" його і створюють нові нерівності, орієнтовані уздовж вектора швидкості. Таким чином, формується новий мікрорельєф поверхонь тертя. Слід зазначити, що в процесі припрацювання змінюється і хвилястість поверхонь тертя, вершини хвиль набувають оптимальної кривизни.

Встановлено, що нова рівноважна мікрогеометрія поверхонь тертя після припрацювання мало залежить від вихідної мікрогеометрії. У більшій мірі вона визначається режимами навантаження, структурою і властивостями тертьових тіл. Шорсткість поверхні тертя після припрацювання може бути як більше, так і меншою первісної (рис. 9.7). Так, при терті гладких тіл (рис. 9.7, *а*), з часом шорсткість може зростати, а при терті шорстких – знижуватися (рис. 6.7, *б*) до оптимального рівня.



а *б*

Рис. 9.7. Зміна мікрогеометрії поверхні тертя в процесі припрацювання:
а – вихідна поверхня гладка; *б* – вихідна поверхня шорстка

На рис. 9.8 показано характер зміни шорсткості поверхонь тертя в процесі припрацювання. Крива 1 відповідає процесу припрацювання, коли початкова шорсткість нижче оптимальної. Крива 3 відповідає процесу, коли початкова шорсткість більше оптимальної. Більш привабливим є процес припрацювання за кривою 2, коли початкова шорсткість відповідає оптимальній. В такому випадку час припрацювання буде мінімальним.

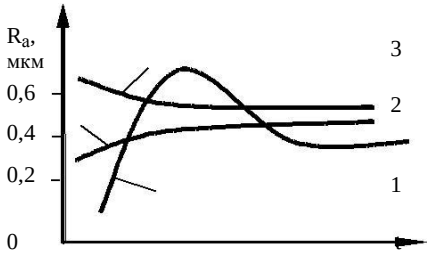


Рис. 9.8. Зміна шорсткості поверхонь тертя з різною вихідною шорсткістю в процесі тертя

У початковий період припрацювання матеріал контактуючих нерівностей зазнає теплових імпульсних впливів і пластичних деформації, що може приводити до зміни його структури і властивостей. Підвищується твердість поверхневого шару, змінюються фрикційні властивості, інтенсивно протікають трібохімічні реакції, що сприяють утворенню вторинних структур, виникають залишкові навантаження.

Таким чином, у процесі припрацювання формується не тільки рівноважна шорсткість поверхні тертя, але і структура поверхневих шарів твердого тіла, а також змінюються їхній напружено-деформований стан. У сукупності ці фактори визначають тривалість другого періоду – періоду сталого зношування, а отже, і довговічність трібосистеми.

9.2. Легування матеріалів для трибоелементів

Обґрунтований вибір легуючих елементів у сплавах для трібосистем тертя машин, механізмів і приладів впливає на закономірності явища структурної пристосовуваності і є одним з головних шляхів досягнення оптимальних показників тертя і поверхневої міцності.

Дотепер питанням легування металевих матеріалів з метою підвищення їхньої зносостійкості приділялося мало уваги. Вибір легуючих елементів і розробка спряжень антифрикційних матеріалів для підшипників ковзання здійснювалися емпіричним шляхом з урахуванням уявлень, сформульованих у правилах Шарпі, Боудена. Фрикційні матеріали для деталей гальмових систем розроблялися також емпіричним шляхом відповідно до переліків технічних вимог, пропонованих до експлуатації таких спряжень. Вплив тих чи інших комплексів легуючих елементів оцінювався за результатами не стандартизованих лабораторних і промислових випробувань.

Виявлення фізичних механізмів структурної пристосовуваності створює основу для розвитку теорії легування і розкриває принципово нові можливості практичних рішень для забезпечення максимальної поверхневої міцності, антифрикційності і фрикційності матеріалів шляхом обґрунтованого вибору легуючих елементів та їхніх комплексів.

Одержання вторинних структур заданого типу, що мають оптимальні властивості, істотно залежить від хімічного складу вихідного матеріалу. Легуючі добавки обумовлюють кінетику утворення і весь комплекс властивостей вторинних структур, які визначають їхню міцність і зв'язок з основним металом.

У теоретичному плані питання легування сталі з метою підвищення зносостійкості раніше взагалі не розглядалися. Сполуки сталей, для тертьових деталей вибиралися в основному емпіричним шляхом без виявлення механізмів зносостійкості. Основною умовою досягнення зносостійкості було забезпечення високої твердості.

Нові та надзвичайно широкі можливості керування тертям і зношуванням сталі й чавунів пов'язані з дослідженням впливу легуючих елементів на

процеси утворення і властивості вторинних структур, що виникають безпосередньо при терті та роблять вирішальний вплив на діапазон і рівень структурної пристосованості. Вивчено вплив хрому, нікелю, молібдену, алюмінію і вуглецю на швидкість утворення вторинних структур та їх властивості.

Вплив легування сталі нікелем і хромом на зміщення електрохімічного потенціалу, який визначає стан вторинних структур на поверхні тертя сталі показано на рис. 9.9. Зі збільшенням вмісту нікелю в сталі час утворення вторинних структур при терті τ зростає, і, відповідно, перехід до динамічної рівноваги утворення і руйнування вторинних структур сповільнюється. Зі збільшенням вмісту хрому час утворення вторинних структур τ зменшиться, а перехід до стану рівноваги проходить швидше. Стале значення електрохімічного потенціалу φ значно збільшується.

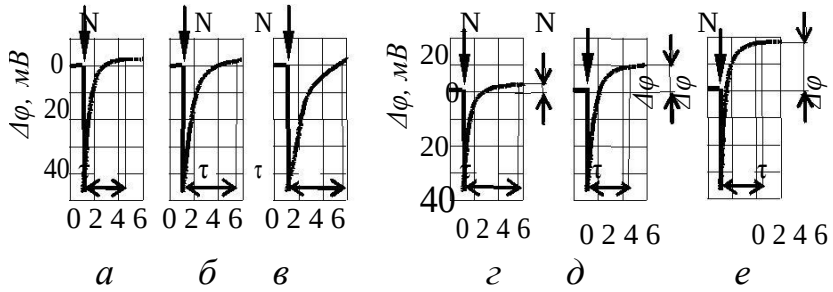


Рис. 9.9. Вплив вмісту нікелю (*а*, *б*, *в*) і хрому (*г*, *д*, *е*) на кінетику утворення вторинних структур при нормальному зношуванні (Р = 3 МПа, V = 1,0 м/с) сталей:
а – 20Х; *б* – 20ХН; *в* – 20ХН3А; *г* – 40; *д* – 40Х; *е* – 4Х13.

Сталі з приблизно однаковими механічними властивостями можуть мати суттєво різну зносостійкість (рис. 9.10).

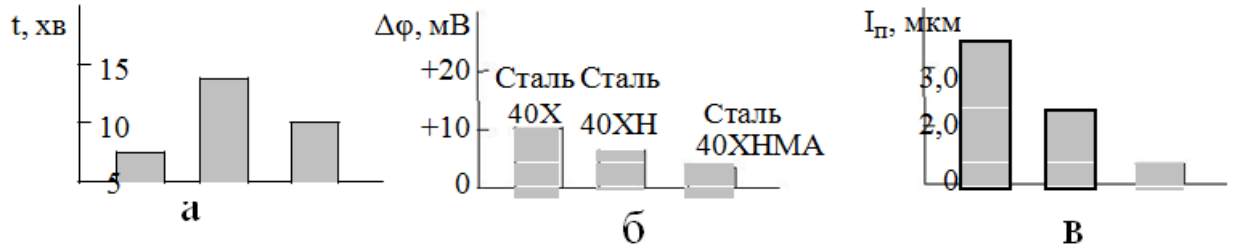
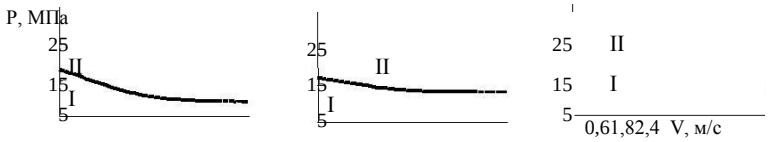


Рис. 9.10. Вплив легуючих елементів на властивості сталі при терті: *а* – час утворення вторинних структур; *б* – електрохімічні властивості структур; *в* – величини зносу

Найменшу зносостійкість мають сталі, поверхні тертя яких мають найбільший електрохімічний потенціал. При цьому швидкість утворення вторинних структур вища.

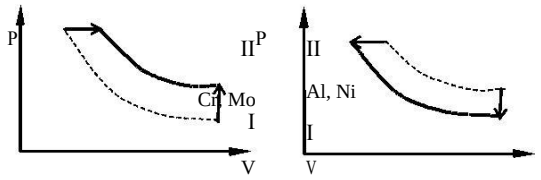
На рис. 9.11 показана зміна зон нормального механохімічного зношування (I) і пошкоджуваності (II) сталі при зміні нормального тиску p і швидкості відносного переміщення V в залежності від легуючих елементів.



а *б* *в*

Рис. 9.11. Діаграма режимів нормальної експлуатації сталі 40 (*а*), сталі 40Х (*б*), сталі 40ХНМ (*в*): I – зона структурної пристосовуваності; II – зона пошкоджуваності

При легуванні хромом і молібденом збільшується зона нормальних процесів (рис. 9.12, *а*). При легуванні нікелем і алюмінієм ця зона різко звужується (рис. 6.12, *б*). При легуванні одночасно хромом, нікелем і молібденом зона нормального зносу різко збільшується (рис. 9.11, *в*).



а *б*

Рис. 9.12. Схема впливу легуючих елементів – хрому і молібдену (*а*), алюмінію і нікелю (*б*) на діапазон навантажень і швидкостей ковзання при нормальній експлуатації сталей:
I – зона структурної пристосовуваності; II – зона пошкоджуваності

9.3. Методи створювання поверхневого зміцнення матеріалів. Хіміко-термічна обробка деталей машин

За призначенням всі існуючі технологічні методи поверхневого зміцнення можна розділити на дві групи:

1. Методи одержання первинних структур із властивостями, що забезпечують можливість оптимальної перебудови і додаткового зміцнення в конкретних умовах експлуатації (механічний наклеп, хімікотермічна обробка, гальванічні покриття тощо.). У цьому випадку утворення вторинних захисних структур при терті сприяє розширенню діапазону нормальних процесів та мінімізації тертя і зносу.

2. Методи створення первинних структур з максимально можливою стабільністю щодо механічних і хімічних впливів. У складних умовах експлуатації не завжди є можливість для оптимального переходу від вихідних станів і властивостей поверхневих шарів до вторинних зміцнених структур. Це насамперед стосується машин і механізмів нової техніки, що працюють в умовах надвисоких швидкостей відносного переміщення, високих або низьких температур, глибокого вакууму, хімічно агресивних або особливо інертних середовищ. Для забезпечення зносостійкості і захисту від пошкоджуваності в цих умовах необхідно одержувати первинні структури з високостабільними властивостями, що мало змінюються в складних і несприятливих умовах навантаження (борування, дифузійне хромування, карбідозоване

електролітичне хромування, ніобірування тощо).

Ця операція супроводжує хіміко-термічну обробку, а також має і самостійне значення. У самостійному вигляді вона застосовується для утворення твердого зносостійкого шару на поверхні деталей із середньо- і високовуглецевих сталей і деяких чавунів. Їй передує об'ємна термообробка: нормалізація або об'ємне загартування і високий відпуск. Вона складається з двох операцій: нагрівання поверхневого шару і швидкого його охолодження. За способом нагрівання розрізняють такі методи поверхневого загартування: високочастотний, контактний, плазмовий, при нагріванні в електроліті, лазерний.

Найбільш розповсюдженим і ефективним є високочастотний метод нагрівання. При використанні цього методу до генератора високої частоти підключається охолоджувана котушка з декількох витків. Усередині котушки виникає високочастотне електромагнітне поле, у яке поміщають деталь. Внаслідок явища електромагнітної індукції в деталі виникають вихрові струми (струми Фуко), що течуть лише в тонкому поверхневому шарі, де і виділяється вся теплота, що утвориться. Поверхневий шар розігрівається до температури загартування за дуже короткий час, недостатній для того, щоб тепло поширилося всередину деталі. Потім нагріта поверхня різко охолоджується потоком рідини (звичайно води). У результаті гартується тонкий поверхневий шар, основа ж при цьому залишається в'язкою, що охороняє деталь від крихкого зламу при циклічній дії навантаження.

Поверхневе загартування з електроконтактним нагріванням здійснюється шляхом пропущення змінного струму через контакт деталі з електродом у вигляді ролика, що котиться по поверхні деталі. При цьому застосовується струм промислової частоти низької напруги, джерелом якого є однофазний зварювальний трансформатор. Через високий електроопір в місці контакту ролика з деталлю виділяється велика кількість теплоти, і таким чином зона контакту розігрівається до температури загартування. Нагріта поверхня охолоджується струменем води.

Плазмені методи передбачають нагрівання поверхні за рахунок обробки струменем низькотемпературної плазми. Плазма виходить двома способами. Перший спосіб полягає в використанні звичайних газових пальників, застосовуваних для різання і зварювання металів. Як газове середовище, що згоряє, використовується суміш кисню з ацетиленом. Інший спосіб передбачає використання розігрітого струменя інертного газу, що продувається через зону дугового розряду. Пристрій, що генерує струмінь такої плазми, називається плазмотроном. Як джерело плазми звичайно використовують аргон.

Нагрівання в електроліті здійснюється шляхом занурювання деталі у ванну з розчином кальцинованої соди або поташу. Ванну підключають до плюсового полюса джерела постійного струму, а деталь – до мінусового. При досить великій силі струму поверхня деталі швидко нагрівається за рахунок того, що водень, який виділяється в результаті електролізу, утворить на поверхні оболонку, що має високий електроопір. Ця оболонка є одночасно тепловим екраном, який запобігає розсіюванню тепла в електроліт.

В останні роки усе більшого поширення набувають лазерні технології. Вони відрізняються високою культурою виробництва і ефективністю. Лазерне випромінювання в інфрачервоному діапазоні, сфокусоване в пляму діаметром

порядку десятка мікрометрів, здійснює пилкоподібний рух (сканування) по поверхні деталі, покриваючи всю виділену під загартування ділянку. Швидкість нагрівання мікрооб'ємів деталі, що взаємодіють із променем, і подальшого охолодження досягає 106 К/с. Це забезпечує загартування поверхневого шару, глибина якого регулюється за рахунок зміни швидкості сканування. Сканування здійснюється шляхом переміщення деталі по заданій програмі спеціальними механічними пристроями. Використовуються як твердотілі лазери, що працюють в імпульсному режимі, так і газові з безперервним процесом випромінювання. Лазерне загартування забезпечує одержання однорідної дрібнокристалічної поверхневої структури, що має підвищену твердість і зносостійкість. Після термообробки лазерним променем елементів рельєфу деталі, вони не скоробляться, і не буде помітне погіршення якості поверхні.

Ефективним методом підвищення зносостійкості деталей є лазерне легування з одночасним загартуванням поверхневого шару. Поверхня, яка підлягає обробці, покривається тонким шаром речовини, що містить легуючі елементи. Так само, як і при лазерному загартуванні, промінь сканує по поверхні деталі. Однак режим сканування підбирається таким, щоб температура в мікрооб'ємах поверхні забезпечувала плавлення. У такий спосіб проплавляється весь поверхневий шар. У процесі плавлення легуючі елементи впроваджуються в кристалічні решітки матеріалу деталі. Позитивним є те, що через високу швидкість нагрівання і подальшого охолодження, крім твердих розчинів легуючих елементів, у матеріалі деталі виникають метастабільні структури з надлишковим у порівнянні з твердим розчином вмістом легуючого елемента. Таким чином, виникає можливість проникнення в кристалічні ґрати навіть такого елемента, з яким речовина деталі взагалі не може утворити твердого розчину. Такі метастабільні структури, будучи міцно пов'язані з основою, володіючи при цьому надвисокою твердістю, забезпечують різке підвищення зносостійкості.

Як приклад наведемо спосіб різкого зміцнення алюмінієвих сплавів. Елементом, що зміцнює, переважно є кремній. Для утворення твердого розчину в алюміній можна вводити не більш 12% кремнію. Надлишковий кремній випадає у виді великих вкраплень і не викликає збільшення твердості матеріалу. Лазерний метод дозволяє вводити в алюміній до 40% кремнію і більше. Надлишковий кремній утворить дрібнодисперсну рівномірно розподілену в об'ємі фазу, різко зміцнюючи матеріал. При цьому твердість поверхневого шару стає порівнянною з твердістю загартованої сталі. Одночасно знижується властива алюмінію адгезійна активність і різко поліпшуються експлуатаційні властивості деталей з алюмінієвих сплавів.

Хіміко-термічна обробка деталей машин

Метою хіміко-термічної обробки є створення на сталевій поверхні тонкого легованого шару за рахунок дифузії ззовні легуючих елементів. Потім поверхня піддається загартуванню в результаті поверхневий шар набуває високої твердості (до 60 і більше одиниць за шкалою Роквела). Сюди належать цементування, азотування, борування, насичення хромом, нікелем, ціанування (насичення одночасно азотом і вуглецем), борохромування (одночасне насичення бором і хромом), карбоборування (одночасне насичення вуглецем і бором) тощо.

Товщина зміцненого шару може перевищувати 2 мм. Хіміко-термічна обробка одержала найбільше поширення як метод зміцнення поверхонь через простоту і високу ефективність. Так, наприклад, цементація здійснюється у твердих, рідких і газоподібних карбюризаторах. Як твердий карбюризатор використовується деревне вугілля. Процес протікає повільно: швидкість навуглецювання порядку 0,1 мм/г. Однак, якщо підвищити температуру до 950...980 °С, процес істотно прискорюється. Як газовий карбюризатор використовуються вуглеводні, а рідкого – розплави солей, які містять вуглець. Найбільш ефективна газова цементація з нагріванням деталі струмами високої частоти.

Азотуванню піддаються сталеві деталі при більш низьких, ніж при цементуванні, температурах: 520...560 °С. Легуючі елементи, що входять до складу сталі (Cr, Mo, V, Al), утворюють з азотом стійкі нітриди. Найбільшу твердість надає алюміній, однак поверхневий шар набуває підвищену крихкість і спостерігається спотворювання форми виробу. Азотування надає деталям високу циклічну міцність і відповідно стійкість проти втомного зношування. Крім зносостійкості, азотування надає деталям і високу корозійну стійкість. Зносостійкість зберігається при нагріванні до 500...600° С, у той час, як при нагріванні цементованої поверхні вище 225...275 °С, твердість її, а отже і зносостійкість знижуються. Недоліком методу є збільшення деталей у розмірі та їх скороблення. Тому азотовані елементи деталей піддають остаточній обробці у вигляді полірування або шліфування.

Ціанування (нітроцементація) відбувається в рідких (розплави солей) і газових азотно-вуглецевих середовищах. Низькотемпературне ціанування здійснюється при температурі 530...650° С, має невелику швидкість і застосовується для високолегованих інструментальних високовуглецевих сталей і легованих сталей з вмістом вуглецю до 0,4%. Обробці піддаються відповідальні наріжні спряження, втулки, зубчасті колеса, ролики, кулачкові пари. Найбільш гнучким процесом є газове ціанування. Воно піддається автоматизації і дозволяє керувати вмістом С і N окремо. Перевага ціанування над цементуванням і азотуванням – велика швидкість процесу і вищий ефект зміцнення.

Аналогічна і технологія дифузійного насичення робочих поверхонь деталей бором, хромом, нікелем, сіркою окремо або в різних комбінаціях.

9.4. Електрохімічні і хімічне формування зносостійких покриттів

Електрохімічні і хімічні покриття наносять на поверхні методом електролізу, що широко використовується в сучасній технології. Найчастіше застосовуються електролітичне хромування, сріблення, нанесення покриття з олова, свинцю, цинку, індію і сплавів легкоплавких металів. Речовини можуть наноситися як безпосередньо робочі шари, так і як елементи багатошарових покрить.

Одне з головних місць займає хромування з метою підвищення зносостійкості.

Хром має високу твердість, добре зчеплення зі сталлю і високу хімічну стійкість. Для підвищення тепло- і кислотостійкості покриття обробляється парами бензину при температурі близько 1000 °С. При цьому вуглець вступає в хімічну реакцію з хромом з утворенням карбідів, що заповнюють мікротріщини в покритті. Гладкі хромові покриття, які мають погане змочуванням оливами, погано припрацьовуються, тому часто використовуються пористі покриття. Такі покриття наносять на поршневі кільця. Олива, що знаходиться в порах, запобігає схоплюванню поверхонь тертя в ході припрацювання. У хромованих гільзах циліндрів двигунів внутрішнього згорання пори заповнюють дрібнодисперсним дисульфідом молібдену, що також сприяє припрацюванню. Хромове покриття має високий опір зносу в умовах граничного мащення. Хром мало зношується сам і тому мало зношує і спряжену сталеву поверхню. Мікротвердість хромових покриттів залежно від умов електролізу, може знаходитися в межах від 400 до 1200 МПа. Такі покриття мають низький коефіцієнт тертя, хімічну стійкістю проти дії багатьох кислот і лугів, хоча в соляній і гарячій сірчаній кислоті хром легко розчиняється.

Срібло наноситься гальванічним методом, переважно на деталі електроконтактних пристроїв. Застосування срібних, а також золотих і паладієвих покриттів дозволяє різко знизити перехідний опір у ковзних електричних контактах. Використання срібла як антифрикційного матеріалу виявилося малоефективним.

У техніці підшипників ковзання широко застосовуються електролітичні покриття деталей оловом, свинцем, індієм та іншими м'якими і пластичними металами і сплавами. Використання таких покриттів дозволяє прискорити припрацювання поверхонь деталей. Найбільш часто використовуються олов'яні і олово-свинцеві покриття. Олово й олово-свинцеві сплави добре зчіплюються з основою. Через низьку твердість покриття істотно зростає фактична площа контакту і знижуються контактні напруги. Такі покриття наносять на вкладиші підшипників ковзання двигуна внутрішнього згорання. Покриття з чистого свинцю не застосовуються через низьку корозійну стійкість до впливу кислот, що містяться в мастилах. Покриття цинком застосовуються при виробництві кузовних деталей автотранспорту. При цьому строк служби покриття досягає десяти років.

Метод хімічної обробки призначений для створення захисних шарів за рахунок хімічних реакцій. Великий інтерес становлять нікель-фосфорні покриття, одержувані за рахунок виділення металів з розчину їхніх солей за допомогою хімічних препаратів, що відновляються. Покриття містить 92...95% Ni і 5...8% P. Міцність зчеплення з основою підвищується за рахунок термообробки покриття. Термообробка також підвищує твердість і антикорозійність. Покриття добре припрацьовується, причому в ході припрацювання, внаслідок високої пластичності матеріал покриття з вершин виступів частково перетікає в западини мікрорельєфу. При цьому підвищується фактична площа контакту і знижуються контактні напруги. Однак покриття мають низьку стійкість до циклічного навантаження і здатні відшаровуватися.

Значне місце в технології підвищення зносостійкості займають оксидування і фосфатування матеріалів. Оксидування – це штучне створення оксидної

плівки. На сталі формується пориста плівка окису заліза Fe_3O_4 з незначною товщиною (до 3 мкм), з малою твердістю і гарним зчепленням з основою. Вона добре утримує мастильний матеріал, запобігає заїданню і, руйнуючись, утворює тонкий абразив, що сприяє припрацюванню. Плівку одержують різними шляхами: хімічним, електрохімічним, термічним і термохімічним. Хімічна обробка здійснюється в лужних і кислотних середовищах при температурі розчину 138...165 °С. Плівка, що утвориться, крім оксидів містить певну кількість фосфатів. Застосовується також обробка паром. Термічне і хіміко-термічне оксидування здійснюється шляхом нагрівання деталей у розплавленій селітрі або на повітрі.

Важливе значення має нанесення захисної оксидної плівки на поверхню деталей з алюмінію і його сплавів. Оксидна плівка має високу твердість і при хімічному оксидуванні має товщину до 5 мкм. Пориста плівка просочується мастилами, що містять колоїдний графіт, або дисульфід молібдену, які надають підшипниковим вкладишам високі антифрикційні властивості. Часто захисні плівки товщиною до 3мм одержують електрохімічним шляхом методом глибокого анодування. Стовщення плівки відбувається як за рахунок проникнення всередину деталі, так і нарощування на поверхні. Таким чином, збільшується розмір деталі. Добрий результат дає глибоке анодування поршнів двигунів внутрішнього згорання. В результаті цього процесу різко знижується знос і підвищується надійність через зменшення імовірності заклинювання.

Прогресивним способом хімічної обробки поверхонь деталей є фосфатування – формування плівки з нерозчинних фосфорнокислих солей. Плівка формується при температурі близько 100 °С в середовищі розчину. Товщина плівки досягає 50 мкм. Розміри деталі змінюються мало. Вона міцно зчеплена з основою, жаростійка (до 600 °С), стійка до впливу кислот, що містяться в мастилі, має низьку твердість і високу пористість. Деталь просочується оливою, що містить тверді мастильні добавки, і добре захищає поверхні тертя від задирок. Фосфатування використовується для захисту поверхонь циліндрових гільз, поршневих кілець, вкладишів підшипників, пальців верхніх голівок шатунів, нарізних сполучень.

Одним з ефективних способів хімічної обробки поверхонь є сульфідування, яке полягає в збагаченні поверхневих шарів сталевих деталей сіркою. Сульфідування проводять у рідкому, твердому або газових середовищах, що містять сірку. Воно може бути низько-, середньо- і високотемпературним (150...450 °С, 540...580 °С, 850...950 °С відповідно). У залежності від поєднання сірчастого середовища, температури і тривалості процесу поряд з Fe, Fe_2 утворяться і інші залізо-сірчані сполуки. Рідке сульфідування здійснюється в соляних ваннах. Глибина сульфідованого шару досягає 50 мкм. Різновидом сульфідування є сульфоціанування, при якому поверхня одночасно насичується сіркою, азотом, вуглецем при температурі 540...580 °С в рідкому середовищі. Застосовується і сульфідування у твердому середовищі порошку сірчистого заліза. Шорсткість поверхонь, які пройшли сульфідування, значно вища вихідної, трохи збільшуються розміри деталей. У процесі експлуатації сульфідна плівка менш міцна, ніж основний метал, легко руйнується і відокремлюється, запобігаючи схоплюванню. Сульфідний шар і м'які слабкоабразивні продукти зносу мають

високу адсорбційну здатність і активують молекули оливи. Завдяки цим властивостям припрацьовування прискорюється і швидко встановлюється рівноважна шорсткість з високою якістю, що наближається до 9...10 класу. Цікаво те, що в міру зносу під впливом температури і тиску атоми сірки дифундують усередину поверхні, підвищуючи антифрикційні властивості. У результаті насичення сіркою шар значно перевищує первісний за своїми протизносними властивостми. Завдяки циркуляції мастильного матеріалу, наявності сульфідованих деталей поліпшується умова роботи всіх тертьових пар, тому що сульфіди, які переносяться оливою, попадають на всі поверхні тертя. Сульфоціанування, на додаток до сульфідування, не тільки прискорює припрацьовування, але й істотно підвищує зносостійкість за рахунок підвищення твердості і утомної міцності. Сульфідують і сульфоціанують сталеві підшипники ковзання, нарізні сполучення, деталі шарнірів.

Сучасні методи створення захисних плівок на поверхнях відповідальних деталей засновані на використанні хімічного впливу газового середовища при певних значеннях температури і тиску (іноді з застосуванням пучків прискорених іонів). Прикладом цього є створення на поверхні металу міцно зв'язаного з основою шару дисульфіду молібдену. Для цього на деталь наноситься електролітичним шляхом шар молібдену. Потім поверхня при певній температурі і тиску обдувається парами сірки. Дисульфід молібдену, що утвориться в ході поверхневої реакції, міцно зв'язується з основою і утворює надійне твердомастильне покриття. Якщо потім поверхню бомбардувати прискореними іонами, то кристали дисульфіду молібдену площинами найменшого опору зрушенню встановлюються паралельно поверхні деталі, і коефіцієнт тертя по такій поверхні близький до нуля (аномально низьке тертя). Іншим прикладом такого способу створення покриття є формування на поверхні тонкої алмазної плівки, що має найвищу зносостійкість. У цьому випадку спеціально підготовлена поверхня деталі при відповідній діаграмі фазової рівноваги вуглецю, значеннях температури і тисках обдувається одним з вуглеводнів. На поверхні утвориться тонка (до 10 мкм) плівка вуглецю у вигляді алмаза. Тут мова йде вже про технології XXI сторіччя.