

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Харламов Ю.О., Романченко О.В.,
Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В.**

ТРИБОТЕХНІКА І НАДІЙНІСТЬ МАШИН

Навчальний посібник

Сєверодонецьк 2021

УДК 621.01
Т 38

Рекомендовано Вченою радою
Східноукраїнського національного університету імені Володимира
Даля (протокол № 7 від 29. 01.2021 р.)

Рецензенти:

Полонський Л.Г., професор, доктор технічних наук;
Кириченко І.О., професор, доктор технічних наук;
Драгобецький В.В., професор доктор технічних наук.

Т 38 **Триботехніка і надійність машин:** навчальний посібник /
Ю.О. Харламов, О.В. Романченко, В.І. Соколов, О.С. Кроль,
О.В. Єпіфанова. – Северодонецьк: вид-во СХУ ім. В. Даля, 2021. –
184 с.: табл. 23, іл. 59, бібліогр. назв 117.

ISBN 978-617-11-0187-6

У навчальному посібнику розглянуті основні проблеми надійності машин і верстатів, що виникають на етапах проектування, виготовлення та експлуатації. Докладно описані показники надійності та особливості їх вибору для оцінки надійності верстатів. Коротко викладені основні відомості про тертя, зношування і змащення. Представлені відомості про геометрію поверхонь деталей і контактну взаємодію деталей, що сполучаються. Розглянута природа зовнішнього тертя та основних видів зношування у верстатах. Докладно розглянуті питання забезпечення надійності металорізальних верстатів на етапах проектування, виготовлення та експлуатації.

Навчальний посібник призначений для студентів, що навчаються за спеціальностями «Прикладна механіка» і «Галузеве машинобудування», а також може бути використаний інженерно – технічними працівниками підприємств.

УДК 621.01

ISBN 978-617-11-0187-6

© Харламов Ю.О., Романченко О.В.,
В.І. Соколов, Кроль О.С.,
Єпіфанова О.В., 2021
© Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля,
2021

ВСТУП

Підвищення надійності й довговічності машин є актуальною проблемою машинобудування. Довговічність машин і верстатів, під якою розуміють здатність зберігати працездатність до граничного стану, найчастіше визначається не поломками через низьку міцність окремих деталей, а зношуванням поверхонь тертя, тобто зміною їх розмірів внаслідок зношування. Зношені машини зазнають ремонту, вартість якого часто набагато перевищує вартість нових.

Вивченням тертя, зношування і змащення в механічних системах займається відносно нова галузь науки – трибологія. Більш широке застосування досягнень трибології в машинобудуванні є необхідним для підвищення надійності машин, верстатів і систем на всіх етапах їх життєвого циклу.

На *етапі проектування* – це розрахунки термінів служби основних елементів машини по зносу, прогнозування надійності машин по відмовах зносу та їх вихідним параметрам, пов'язаним зі зносом, аналіз альтернативних варіантів вузлів тертя й вибір їх раціональної конструкції за показниками надійності, оцінка оптимальних режимів роботи й області застосування машин з урахуванням заданого періоду збереження працездатності їх вузлів тертя.

На *етапі виготовлення* – створення й удосконалювання системи управління якістю й надійністю вузлів тертя машин, забезпечення надійності технологічного процесу виготовлення деталей і вузлів, розробка і впровадження технологій триботехніки, розробка методів випробування вузлів тертя машин за параметрами якості й надійності.

На *етапі експлуатації* – розробка раціональної системи технічного обслуговування і ремонту вузлів тертя машин, створення методів і засобів для діагностування стану машин та їх вузлів тертя в процесі експлуатації, створення інформаційної бази даних про надійність вузлів тертя машин і верстатів та їх елементів.

1. ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ МАШИН

1.1. Основні поняття теорії надійності

Під *надійністю* машин розуміють їхню властивість зберігати в часі здатність до виконання необхідних функцій (для металорізальних верстатів – обробка заготовок з необхідною точністю й продуктивністю) за умови дотримання правил експлуатації, передбачених нормативно – технічною й експлуатаційною документацією. При цьому поняття експлуатації містить у собі не тільки застосування машин за призначенням, але і їх технічне обслуговування, ремонт, зберігання й транспортування.

У теорії надійності розглядаються наступні узагальнені об'єкти: *виріб; елемент; система* – сукупність спільно діючих елементів, що призначена для самостійного виконання заданих функцій. Поняття елемента й системи трансформуються залежно від поставленого завдання. Машина при встановленні її власної надійності розглядається як система, що складається з окремих елементів – механізмів, деталей і т.п., а при вивченні, наприклад, надійності автоматичної лінії – як елемент.

Граничний стан – стан об'єкта, при якому його подальше застосування за призначенням неприпустимо або недоцільно.

Вироби поділяють на: *невідновлювані*, які не можуть бути відновлені споживачем і підлягають заміні, наприклад, підшипники кочення; *відновлювані*, які можуть бути відновлені споживачем, наприклад, верстат, автомобіль, сільськогосподарська машина, система ЧПК, промисловий робот та інші.

У теорії надійності співіснують два напрями: 1) системна (статистична або математична) теорія надійності; 2) фізична теорія надійності.

Об'єктом *системної (статистичної, математичної) теорії надійності* є системи з елементів, що взаємодіють між собою у сенсі збереження працездатності за логічними схемами: графами, деревами відмов і т.п. Вихідну інформацію в системній теорії надійності, як правило, утворюють показники надійності елементів, визначені шляхом статистичної обробки результатів випробувань і (або) експлуатаційних даних. Завдання системної теорії надійності вирішують у рамках теорії ймовірності і математичної статистики, тобто без залучення фізичних моделей відмов і тих фізичних явищ, які викликають і супроводжують виникнення відмов.

Характерна риса *фізичної теорії надійності* полягає в тому, що підтримку працездатності системи й можливість виникнення відмов розглядають у ній як результат взаємодії між системою й зовнішніми впливами (експлуатаційними навантаженнями, умовами середовища і т.п.), а також механічними, фізичними й хімічними процесами, які відбуваються в компонентах системи в процесі її експлуатації.

Показники надійності механічних елементів і механічних систем оцінюють на основі фізичних моделей, у той час як для оцінки показників надійності машин у цілому або систем машин частіше використовують моделі системної теорії надійності.

1.2. Загальні відомості про показники надійності

Основними джерелами відмов машин і машинних комплексів є саме машина (її механіка й гідросистеми), електричних – електронні системи й системи управління (ЧПК). Для механічних вузлів у порівнянні з електротехнічними й електронними пристроями характерно менша кількість відмов, але більша тривалість усунення їх наслідків.

Основні терміни й визначення в області надійності спираються на поняття працездатності.

Працездатність – це стан виробу, при якому він здатний виконувати задану функцію з параметрами, встановленими вимогами технічної документації, протягом розрахункового терміну служби.

Відмова – це порушення працездатності. Властивість елемента або системи безперервно зберігати працездатність за певних умов експлуатації (до першої відмови) називається *безвідмовністю*.

Відмовою є випадкова подія, що полягає у виході з ладу якогось елемента або в порушенні працездатності машини. Відмови можуть бути пов'язані з розкидом параметрів оброблюваної сировини й заготовок, втратою первинних показників якості машин через зношування найважливіших їхніх деталей (шийок валів, напрямних, механічних передач, муфт, ходових гвинтів та ін.). Залежно від наслідків, що викликані відмовами, їх поділяють на відмови функціонування й параметричні.

Відмови функціонування (несправність, заклинювання й т.п.) приводять до того, що машина не виконує свої функції.

Параметричні відмови викликають зміни вихідних характеристик (параметрів машин), що перевищують припустимі норми, (наприклад, точності верстата). Параметричні відмови, що пов'язані в основному зі зношуванням, є найбільш характерними для машин і верстатів.

Розрізняють поступові й раптові відмови. *Поступові* (відмови зносу) виникають внаслідок погіршення первісних параметрів виробу. Чим довше

працював виріб, тим більше ймовірність відмов зносу. Раптові відмови виникають у результаті несприятливої комбінації факторів і зовнішніх впливів, що приводять у деякий момент часу τ до різкої зміни вихідного параметра. Основною ознакою раптової відмови є її незалежність від тривалості попередньої роботи виробу. Інтенсивність таких відмов (тобто ймовірність відмов в одиницю часу) звичайно постійна, тобто $\lambda(t) = 1/t = \text{const}$.

Критерії працездатності деталей. Деталь повинна бути працездатна не взагалі, а для конкретних умов роботи, залежно від яких деталі машин повинні мати виражені властивості, які забезпечують працездатність. За одних умов важливо, щоб деталь під навантаженням не зламалася, тобто необхідна міцність. За інших умов деталь швидко зношується, тобто потрібна зносостійкість.

Показники надійності (наприклад, технічний ресурс, термін служби) можуть мати розмірність, ряд інших (наприклад, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності) є безрозмірними. Кількісною характеристикою тільки однієї властивості надійності служить одиничний показник. Кількісною характеристикою декількох властивостей надійності служить комплексний показник.

Показники надійності різняться відповідно до компонентів надійності на показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності й збереженості. Розрізняють показники для відновлюваних і невідновлюваних виробів. Застосовують як відносні показники, що характеризують загальний рівень надійності, так і абсолютні або числові показники, що характеризують окремі типорозміри машин.

Надійність виробів залежно від їхнього виду може оцінюватися частиною або всіма показниками надійності. Причини, що визначають надійність виробу, пов'язані з випадковими явищами, тому показники, застосовувані для оцінки надійності, мають ймовірнісну природу.

На стадії проектування показники надійності трактують як характеристики ймовірнісних або напівймовірнісних математичних моделей створюваних об'єктів. Відповідні значення показників називають розрахунковими. На стадіях експериментальної обробки випробувань роль показників надійності виконують статистичні (точкові або інтервальні) оцінки ймовірнісних характеристик. Відповідні значення показників називають експериментальними. Аналогічні оцінки за даними експлуатації називають експлуатаційними.

1.3. Причини втрати працездатності машин

Для забезпечення надійності машин, необхідно виявити основні причини, що приводять до втрати машиною працездатності, знати їх закономірності й застосовувати методи розрахунків і проектування, що забезпечують необхідний рівень показників надійності машини і їх компонентів.

Джерела дії на машину наступні:

- дія енергії навколишнього середовища, включаючи людину, що виконує функції оператора або технічного обслуговування (енергія при ремонтних роботах),
- внутрішні джерела енергії, пов'язані як з робочими процесами, що протікають у машині (робочий процес), так і з роботою окремих механізмів,
- потенційна енергія, яка накопичена в матеріалах і деталях машини в процесі їх виготовлення (наприклад, внутрішні напруження виливок, монтажні напруження та ін.).

Різні види енергії, що діють на машину, викликають у її вузлах і деталях процеси, що змінюють (знижують) її початкові характеристики. Ці процеси пов'язані, як правило, зі складними фізико – хімічними явищами й приводять до деформації, зношування, несправностей, корозії та іншим видам ушкоджень.

Ушкодження – це відхилення контрольованих властивостей матеріалу або елемента виробу (включаючи геометричні розміри) від початкових, отриманих при виготовленні об'єкту. Виникнення ушкоджень спричиняє зміни вихідних параметрів виробів, що може привести до відмови.

Енергія, проявляючись у механічній, тепловій, хімічній, електромагнітній та інших видах, визначає умови роботи машини та її елементів і виникаючі в них навантаження, напруження, температуру, швидкість і прискорення, хімічні впливи, тиски, електромагнітні сили та ін. Дані дії є причиною виникнення у машини зношування, корозії, деформації, повзучості та ін., які приводять до ушкоджень окремих елементів $U_1, U_2, \dots, U_k$. Ці ушкодження викликають зміни вихідних параметрів окремих елементів, вузлів і підсистем, що, у свою чергу, приводить до зміни в часі й вихідних параметрів усієї системи $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$. Небезпека виходу цих параметрів за встановлені межі формує показники надійності всієї системи (машини). Процеси, що виникають у машинах, різняться за швидкістю їх протікання і за характером впливу на вихідні параметри.

Зворотні процеси тимчасово змінюють параметри деталей, вузлів і всієї системи в деяких межах без тенденцій прогресивного погіршення.

Найбільш характерні приклади таких процесів – пружні й теплові деформації вузлів і деталей.

Незворотні процеси приводять до погіршення технічних характеристик об'єкта із часом. Ці процеси називають процесами старіння, і вони є основною причиною поступової втрати машиною працездатності, тобто визначають її надійність.

У табл. 1.1 наведена класифікація процесів старіння за їхнім зовнішнім проявом (результатом процесу), зазначені основні різновиди процесів і надані їхні приклади. Деталь може зазнати пошкодження, деформуватися, а також можуть змінюватися властивості матеріалу деталі.

Таблиця 1.1

Класифікація процесів старіння (незворотні процеси)

Об'єкт	Результат процесу (вид ушкодження)	Різновиди процесу	Приклади
1	2	3	4
Деталь (об'ємні явища)	Пошкодження	Крихке пошкодження, в'язке пошкодження	Втомне руйнування валів, зубів зубчастих коліс (неприпустимі явища)
	Деформація	Пластична деформація, повзучість, викривлення	Викривлення станин і корпусних деталей
	Зміна властивостей матеріалу	Зміна структури матеріалу, механічних властивостей, хімічного складу, забруднення рідини	Зміна об'єму прецизійних деталей верстата у зв'язку з розпадом мартенситу. Забруднення мастильного матеріалу
Поверхня (поверхневі явища)			
Деталі	Роз'їдання	Корозія, ерозія, кавітація, прогорання, утворення тріщини	Корозія верстата при транспортуванні (неприпустимо). Кавітація в гідронасосах
	Наріст	Налипання (адгезія, когезія, адсорбція, дифузія), нагар, облітерація (зарощування)	Утворення наросту в різальному інструменті. Облітерація каналів гідросистем
	Зміна властивостей поверхневого шару	Зміна параметрів шорсткості, твердості, напруженого стану	Зміна напруженого стану прецизійних деталей верстату

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
Пари	Зношування	Зношування (стирання), втома поверхневих шарів, змінання, перенос матеріалу	Зношування напрямних, ходових гвинтів, фрикційних муфт. Втома підшипників і напрямних кочення
	Зміна умов контакту	Зміна площі контакту, суцільності змащування, коефіцієнту тертя	Зміна параметрів шорсткості й коефіцієнту тертя в процесі припрацювання напрямних ковзання

Найчастіше процеси старіння протікають у поверхневих шарах. При цьому поверхня деталі може зазнати температурних, хімічних, механічних або інших дій зовнішнього середовища. У результаті можуть відбуватися явища, пов'язані з втратою матеріалу з поверхні в результаті корозії, ерозії, кавітації та інших процесів. Можлива також зміна властивостей поверхневого шару. На поверхні можуть протікати і такі процеси, як адгезія, адсорбція та ін. (утворення наросту).

Специфічні процеси протікають при контакті двох сполучених поверхонь, що найбільш характерно для механізмів і елементів машин. У цьому випадку в рухомих з'єднаннях виникають такі процеси зношування, як стирання поверхні, втома поверхневих шарів і їх пластичне деформування (змінання). Показники, які застосовують для визначення ступеня ушкодження матеріалу виробу, наведені в таблиці 1.2.

Для розрахунків надійності необхідно знати швидкість протікання процесу ушкодження $\dot{u}(t)$ або ступінь даного ушкодження $U(t)$ у функції часу. Такі залежності можуть бути отримані на основі вивчення фізики процесу або експериментальним шляхом.

У таблиці 1.3 представлені типові закономірності протікання одностадійних процесів старіння в часі, коли протягом розглянутого періоду часу не відбувається зміна фізико – хімічної картини процесу.

Закони старіння, що характеризують зміну ступеня ушкодження матеріалу у функції часу, є основою для розв'язання задач надійності. Вони дозволяють прогнозувати хід процесу старіння, оцінювати можливі його реалізації та виявляти найбільш істотні фактори, що впливають на інтенсивність процесу. Типовим прикладом таких залежностей є закони зношування матеріалів.

Зношування, що протікає при терті деталей, які сполучаються, є найбільш характерним видом ушкодження машин та їх вузлів. Широкий

розвиток набула наука про процеси тертя, зношування й змачення – *трибологія*. Трибологічні явища повинні враховуватися при проектуванні, виробництві й експлуатації машин. Триботехніка є прикладною частиною трибології й охоплює впорядковані знання про практичне застосування трибології.

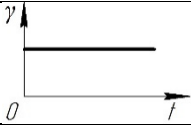
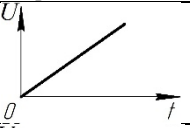
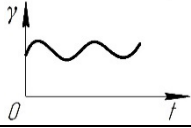
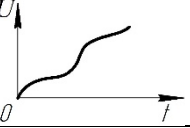
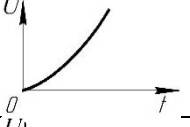
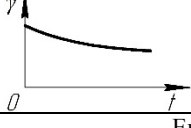
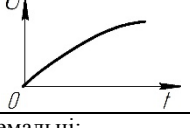
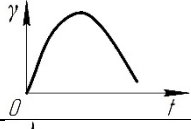
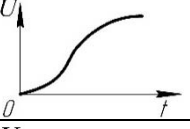
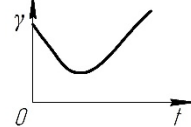
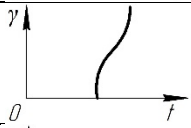
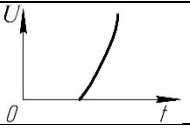
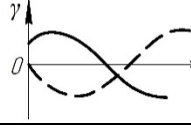
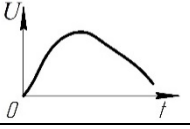
Т а б л и ц я 1 . 2

Показники ступеня uszkodzenia materiału w wyrobie

Ушкодження	Методи оцінки ступеню uszkodzenia		
	Інтегральний	Диференціальний	За вихідними параметрами або характеристиками виробу
Глибинне	Ослаблення перетину тріщинами (фактична площа перетину). Сумарна деформація деталі. Число дислокацій у небезпечному перетині	Розмір тріщин та їх розподіл. Епюра деформацій. Розподіл дислокацій за об'ємом деталі	Втрата несучої здатності деталі
Повне поверхневе	Вагове зношування. Середнє лінійне зношування. Об'ємний показник корозії	Лінійне зношування поверхні. Глибинний показник корозії. Зміна твердості по поверхні	Зміна навантажень, закону переміщення веденої ланки, температури, коефіцієнта тертя, витоків, щільності, тиску, вібрацій
Локальне поверхневе	Сумарна площа uszkodzenia. Число дефектів на одиницю площі. Розміри найбільшого uszkodzenia	Закони розподілу параметрів, що характеризують окремі uszkodzenia. Щільність uszkodzenia на окремих ділянках поверхні	

Таблиця 1.3

Типові закономірності протікання в часі процесів старіння

Процеси (за γ -характеристикою)	$\gamma(t) = \frac{dU}{dt}$	$U(t)$	Процес
Стаціонарні:			
Постійні			Зношування
Псевдо – стаціонарні			Зношування при змінних режимах
Монотонні:			
Зростаючі			Зношування при засміченні поверхонь
Спадні			Зношування в період припрацювання. Розпад мартенситу
Екстремальні:			
З максимумом			Корозія
З мінімумом			Зношування інструменту. Корозія. Повзучість
Із запізнюванням			Втома. Крихке пошкодження
Знако – змінні			Зміна механічних характеристик

2. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ

Властивості поверхневого шару відрізняються від властивостей матеріалу в об'ємі, що обумовлює природу цілого ряду явищ, поєднаних терміном «поверхневі», у тому числі і визначаючи природу зовнішнього тертя.

2.1. Дефекти структури твердих тіл

Застосовувані в техніці метали та їх сплави є в переважно полікристалами, що складаються із безлічі зерен; у межах одного зерна зберігається правильна кристалічна решітка. Для металів розміри зерен становлять $1...10\ 000\ \mu\text{м}$, товщина границь між зернами близько $0,5\ \text{нм}$.

Розрахунки на міцність реальних тіл показують, що їх теоретична міцність в $100...1000$ разів вище міцності, що реалізована реальними тілами. Причиною цього є дефекти структури цих тіл. Найпоширенішими є: точкові й лінійні дефекти, поверхневі й об'ємні неоднорідності матеріалу.

Точкові дефекти утворюються в процесі кристалізації або потім у результаті дії зовнішніх сил. У результаті внутрішня структура кристалічних тіл може зазнати істотних змін. При цьому можуть з'являтися *дефекти у вигляді «отвору»*, коли в одному з місць кристалічної решітки відсутній той або інший атом, *дефект «проникнення»*, коли одна із часток кристалічної решітки застрягає поміж її вузлів, *дефект «заміщення»*, коли необхідний вид частки решітки випадково заповнюється часткою зовсім іншого сорту. Кожний із цих дефектів вносить додаткові напруження в кристалічні решітки твердого тіла й зменшує його міцність.

Лінійні недосконалості твердих тіл формуються в процесі кристалізації у вигляді блоків кристалічних решіток, що трохи зсунуті за напрямками. Межі блоків являють собою області з порушеними структурами. Під дією зовнішніх сил у структурі кристалічних тіл може відбутися зсув часток, що приводить до порушень в їх будові. Геометричні форми лінійних дефектів дуже складні, однак їх граничні випадки – крайова й гвинтова можуть бути представлені у вигляді простих схем (рис. 2.1).

Лінійні порушення чергування атомних площ у кристалічних решітках твердих тіл – *дислокації* (у перекладі із грецької мови – зсув) приводять до виникнення додаткових концентрацій стискаючих і розтяжних напружень і, як наслідок, до істотної зміни міцності твердих тіл. На рис. 2.2 показано, що зі збільшенням щільності дислокацій ρ у матеріалі модуль Юнга E різко зменшується й після переходу через деякий мінімум трохи підвищується за рахунок виходу дислокацій на межі зерен або поверхню і за рахунок їх взаємного накладення і компенсації.

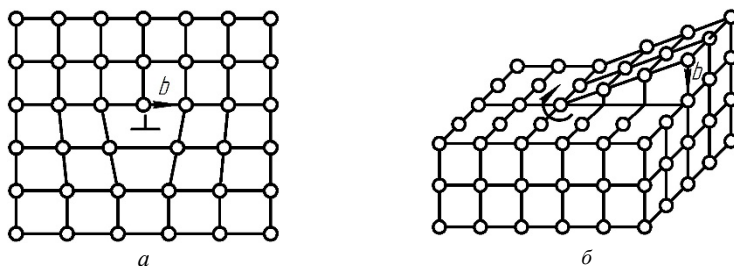


Рис. 2.1. Крайова (а) і гвинтова (б) дислокації в кристалі:
 b – вектор зсуву (Бюргерса)

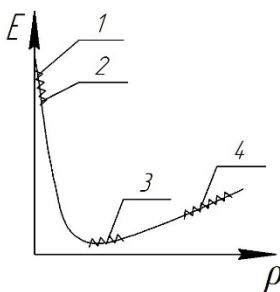


Рис. 2.2. Зміна міцності твердих тіл зі збільшенням щільності дислокацій:
 1 – теоретична міцність;
 2 – монокристали у вигляді «вусів»; 3 – чисті, незміцнені метали;
 4 – сплави, зміцнені легуванням, наклепом і термічною обробкою

Поверхневі (двовимірні) неоднорідності (поверхневі мікротріщини) являють собою поверхні меж зерен і дефекти пакування, що виникають як при зародженні кристалів, так і в процесі їх навантаження.

Об'ємні (тривимірні) неоднорідності являють собою міжкристалічні області, внутрішні пори й тріщини, поверхні поблизу всіляких включень і т.п.

У загальному випадку мікроструктура реальних тіл та їх поверхні має вкрай неоднорідну будову (рис. 2.3) і складний профіль на субмікрорівні полікристалів (рис. 2.4). Ці дефекти структури матеріалу й поверхні твердих тіл у своїй основі мають розміри, що у порівнянні з постійними кристалічними решітками ($10^{-9} \dots 10^{-8}$ м), є непомітними для візуального спостереження й навіть за допомогою оптичного мікроскопа. Однак вони здатні впливати на багато властивостей реальних тіл.

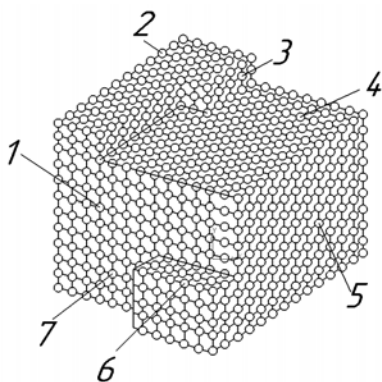


Рис. 2.3. Дефекти будови поверхні реального монокристалу:

- 1 – додатковий атом на поверхні; 2 – ребро; 3 – сходинка;
 4 – адсорбований іон; 5 – крайова дислокація;
 6 – гвинтова дислокація; 7 – молекулярна западина

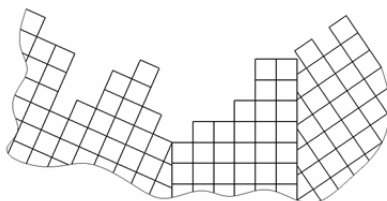


Рис. 2.4. Схема мікрогеометричного профілю поверхні твердого тіла

В об'ємі металів є велика кількість різних дефектів (вакансій, впроваджених сторонніх атомів, дислокацій). У вільному або зв'язаному стані присутній вуглець, постійні домішки (S , Mn , P , S , O , H та ін.) елементи, що легують (Cr , Ni , W , V та ін.), а також є розриви матеріалу у вигляді округлих пор і субмікротріщин.

Особливе місце в будові металів займають межі зерен. Матеріал на цих ділянках перебуває в послабленому стані внаслідок підвищеної концентрації відзначених вище дефектів.

Про рівень можливої концентрації дефектів у металах можна судити по розрахунково – експериментальним оцінкам критичної щільності дислокацій, при досягненні якої в локальному об'ємі виникають тріщини. Для металів *Fe, Ni, Cu, Al, Mg* та ін. ця величина перебуває в межах $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Пори і тріщини формують у металах розвинену мікрокапілярну мережу, яка починається на поверхні у вигляді системи мікроскопічних і субмікроскопічних тріщин і порожнин, а далі переходить у фазові поверхні розподілу елементів, структурні й внутрішні тріщини. Завдяки такій будові металів зовнішнє середовище за рахунок адсорбційних і дифузійних процесів проникає в їх середину і впливає на механічні властивості приповерхніх шарів твердих тіл.

2.2. Поверхнева енергія

Поверхня твердого тіла має надлишкову енергію, яку називають поверхневою. Для процесів тертя й зношування поверхнева енергія має важливе значення, тому що вона характеризує активність атомів поверхневого шару. У більшості металів кожний атом в об'ємі оточений дванадцятьма сусідами, а на поверхні – шістьма. Тому поверхнева енергія повинна бути приблизно рівною $1/6$ енергії сублімації, тобто енергії, що необхідна для поділу твердого тіла на незалежні атоми.

Величина поверхневої енергії впливає на здатність до утворення адгезійних зв'язків. Під адгезією розуміють притягання між різнорідними тілами, контактуючих між собою. Це притягання обумовлюється силами молекулярної взаємодії. На відміну від адгезії притягання між атомами або молекулами усередині одного тіла називають когезією. Чим більше поверхнева енергія, тем міцніше адгезійні зв'язки й тим більше опір відносному переміщенню контактуючих тіл.

Надлишкова поверхнева енергія визначає також хімічну активність поверхні твердого тіла. Тому при нормальних умовах поверхня твердого тіла ніколи не буває чистою. Вона завжди покрита різними поверхневими плівками: продуктами корозії, адсорбованими газовими й водяними плівками, адсорбованими вуглецями. Отримати чисту поверхню твердого тіла надзвичайно важко. Більшість металів активно вступають у реакцію з окиснювачами, у першу чергу з киснем і сіркою. Так, наприклад, навіть у вакуумі при тиску $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ поверхня твердого тіла покривається моношаром адсорбованого газу приблизно за 1 с. При тиску, яких дорівнює

10^{-10} мм рт. ст. цей час становить кілька годин. При атмосферному тиску – соті частки секунди. Оксидні плівки, що утворюються на поверхні металу, можуть мати захисну дію, і після того як на металах утворюється плівка деякої товщини, припиняється її подальше зростання.

Крім плівок оксидів на поверхні твердих тіл можуть утворюватися сульфідні, водні (до 100 нм) і полімерні плівки. Метал часто відіграє роль каталізатору в реакції полімеризації. Ці плівки мають високу міцність і відіграють значну роль при терті. Основний вплив їх на процеси тертя полягає в тому, що вони перешкоджають утворенню міцних металевих зв'язків, замінюючи їх набагато слабшими Ван – Дер – Ваальсовими. Якщо швидкість окиснення металу менше швидкості стерття плівки, то при терті плівка не встигає наростати і не ізолює поверхні що труться. Твердість плівок оксидів звичайно вище твердості металів.

Якщо поверхні двох твердих тіл зблизити до відстані порядку міжатомної, між атомами виникають сили взаємодії, такі ж самі, як між атомами в межах одного тіла. Ці сили є однією з причин опору відносному переміщенню тіл, що труться і обумовлюють молекулярну (адгезійну) складову сили тертя. Розрізняють чотири основні види сил міжатомної взаємодії: іонні, ковалентні, Ван – Дер – Ваальсові, металеві. Ці сили можуть мати фізичну або хімічну природу; їхня відмінність полягає, насамперед, в енергії взаємодії (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Вид, енергія розриву й природа утвору зв'язків

Вид зв'язку	Енергія розриву зв'язку, eВ	Природа утворення зв'язків
1	2	3
Іонний	8,5	Утворюється тільки між різнорідними атомами, при цьому один атом віддає частину електронів, а інший – отримує. Іонні кристали мають великий тепло – і електроопір і малу пластичність
Ковалентний гомео – поляр – ний)	6,0	Встановлюється за рахунок утворення стійких електронних конфігурацій шляхом усупільнення електронів окремими атомами. Природа цього зв'язку ковалентно – механічна (наприклад, алмаз). Має малу пластичність та тепло – і електропровідність
Мета – левий	2,5	Обумовлений вільними електронами («електронний газ»). Цей «газ» як би «скріплює» іони, що перебувають у кристалічних решітках. Металевий зв'язок між металами, що труться, можливий лише при відсутності окисних плівок або якщо швидкість стирання вище швидкості утворення цих плівок

1	2	3
Ван – Дер – Вааль– совий	0,1	Існує між будь – якими молекулами й атомами. Природа – електростатична. Найслабша, але й більш універсальна і розповсюджена при фрикційній взаємодії

2.3. Поверхневі явища

Сорбційні процеси. Виготовлення, зберігання й експлуатація пар тертя відбувається в середовищах, що містять мастильний матеріал, воду, повітря, кожне з яких являє собою, аж ніяк, не однорідну систему, й містить некомпенсовані позитивні й негативні заряди. У рідинах і газах можуть перебувати молекули поверхнево – активних речовин (ПАР). До них відносяться, наприклад, органічні речовини, що мають полярні групи OH , $COOH$ і NH_2 , добре розчинні у воді, і неполярні групи, що складаються із вуглецевих ланцюгів типу CH_2 , що не змочуються водою. До рідин, що містять гідрозолі і ПАР, відносяться сучасні мастильні матеріали.

Наявність некомпенсованих молекулярних зв'язків на межі розділу фаз, а також усередині матеріалу створює умови для поглинання твердими й рідкими тілами молекул і часток із прилеглих до них середовищ (газів і рідин). У загальному випадку процес поглинання сторонніх атомів і молекул рідкими й твердими речовинами одержав назву *сорбції*. Сорбція включає процес *адсорбції* – процес, що відбувається на границі розділу (такій як, наприклад, тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина і рідина – газ). Речовина, на поверхні якої відбувається адсорбція, називають *адсорбентом*, а поглинена із прилягаючого об'єму речовина – *адсорбатом*. Процес, зворотний адсорбції, одержав назву *десорбції*.

Розрізняють два види адсорбції:

– *фізичну* – оборотну, обумовлену дією відносно слабких Ван – Дер – Ваальсових сил;

– *хемосорбцію* – необоротну, обумовлену проявом досить великих за величиною хімічних зв'язків (валентних сил).

Поверхня твердого тіла має різну питому поверхневу енергію (гетерогенну), тому не всі її ділянки мають однакові адсорбційні властивості. Крім того, різні мікродефекти поверхні мають значно більшу здатність до адсорбції, ніж гладкі ділянки. Зазвичай їх називають активними центрами.

Хімічні процеси. Кристалічний стан металів є термодинамічно нестійким і поступово прагне перейти в більш стійкий аморфний (іонний) стан. Цьому процесу сприяють адсорбовані молекули газів і парів, і поява

на найбільш активних ділянках поверхонь твердих тіл молекул кисню, води, розчинів електролітів і поверхнево – активних речовин. Тим самим на границі розділу фаз, наприклад метал – навколишнє середовище, створюються умови для виникнення хімічних процесів, що приводять до пошкодження металу. Процес мимовільного пошкодження металевих матеріалів внаслідок їх фізико – хімічної взаємодії з навколишнім середовищем одержав назву *корозії металів*. Корозія металів переважно характеризується його окисненням. За механізмом процес окиснення металів поділяють на хімічний і електрохімічний.

Хімічний тип окиснення й відновлення окисного компонента корозійного середовища відбувається в одному акті. У цьому випадку окиснювач, наприклад адсорбований атом кисню O (*адс*), віднімає в металу, що перебуває у твердому стані Me (*Т*), валентні електрони та одночасно вступає з ним у хімічну взаємодію. В результаті цього на поверхні металу утворюється шар нового матеріалу (найчастіше оксиду), який звичайно значно відрізняється за властивостями від початкового металу.

Електрохімічний тип окиснення металів обумовлений переносом іонів металу під дією електрохімічного поля, джерелом якого можуть бути як зовнішні поля, так і контактна різниця потенціалів, наявна на поверхні твердого тіла, обумовлена, наприклад, включенням сторонніх атомів і аномаліями в будові структури основного матеріалу. Неодмінною умовою для цього типу окиснення металів повинно бути й електропровідне середовище (наприклад, що утворюється з сконденсованої вологи та осілих у неї аерозолів і гідрозолів з навколишнього середовища).

Зріст оксидних плівок на металах звичайно починається дуже швидко й поступово з наростанням товщини шару оксиду й утрудненням підведення кисню до металу вповільнюється.

Плівки оксиду звичайно розрізняють за товщиною: від $0,1$ до 40 нм – тонкі; від 40 до 500 нм – середні (що дають колір мінливості); понад 500 нм – товсті (видимі). На чистих поверхнях вуглецевих сталей, вкритих шаром води, товсті плівки оксиду стають помітними вже через $20...40$ хв. На тих же металах, але покритих шаром органіки, корозійні процеси суттєво вповільнюються.

На міцність з'єднання оксидних плівок з металом, їх суцільність і зміну мікрорельєфу поверхневих шарів твердих тіл впливає товщина шарів, що утворюються, і щільність оксиду. На суцільність оксидних плівок великий вплив має співвідношення між об'ємом оксиду $V_{ок}$, що виникає з металу і кисню, та об'ємом металу $V_{ме}$, витраченого на його утворення.

Якщо $V_{ок} - V_{ме}$, наприклад, у таких благородних металів, як срібло, золото й платина, то на їхній поверхні утворюються щільні оксидні плівки,

які міцно втримуються, активно гальмуючі подальше окиснення металу. Якщо $V_{ок} < V_{ме}$, то в поверхневих оксидних шарах виникають сильні розтягувальні напруження і шар розривається (рис. 2.5, а). Якщо $V_{ок} > V_{ме}$, то в поверхневих шарах виникають стискаючі сили, величина яких зростає прямо пропорційно товщині плівки оксиду. Під дією цих сил може відбуватися спучування, а також пошкодження шару оксиду. Найбільш характерні типи пошкодження поверхневих оксидних шарів представлені на рис. 2.5, б.

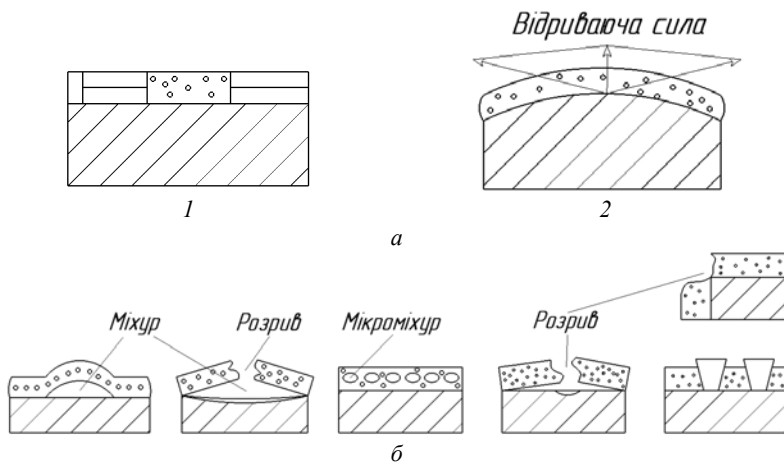


Рис. 2.5. Оксидні плівки на металах:

а – внутрішні напруження, що виникають при рості оксидної плівки;

б – типи пошкодження оксидних плівок

Оксидні шари, що утворюються на поверхнях твердих тіл, приводять до істотного (в 10 і більше разів) зменшення сил міжмолекулярної взаємодії між тілами. Саме тому ефективність ряду мастильних матеріалів може різко погіршуватися, коли вони починають працювати в середовищах, у яких відсутній кисень.

Крім кисню на властивості поверхні металів сильний хімічний вплив може виявити водень. Так, хімічна спорідненість водню до вуглецю може привести, наприклад, до відновлення карбідних фаз сталей. При високому тиску водню й температурі 200...600 °С створюються сприятливі термодинамічні умови реакцій дисоціації цементиту й зневуглецювання сталі.

Фізичні процеси. Поверхнево – активні речовини (ПАР) – речовини, здатні концентруватися на поверхні розділу фаз і знижувати поверхневий

(міжфазний) натяг. ПАР стосовно конкретних матеріалів можуть бути тверді, рідкі й газоподібні, наприклад, ртуть стосовно цинку, рідка мідь до сталі, вода до скла.

Адсорбційні шари ПАР приводять до того, що, наприклад, поверхневий шар рідини покривається молекулами інших речовин, які мають і свою поверхневу енергію, і поверхневий натяг. Навіть невелика кількість ПАР виявляється здатна суттєво впливати на властивості рідини.

На рівень статичного тертя твердих тіл важливий вплив має характер орієнтації поверхнево – активних молекул на поверхні твердого тіла (рис. 2.6). Найбільший коефіцієнт тертя спокою має місце на поверхнях, вільних від адсорбованих полярних молекул (фаза *0*). При заповненні поверхні молекулами ПАР тертя між твердими тілами падає й стає мінімальним, коли молекули щільно впаковані лежачи на поверхнях тертя (фаза *I*). При наступному збільшенні концентрації n ПАР частина молекул підіймається, а частина продовжує лежати на поверхнях тертя (фаза *II*). У цьому випадку тертя між тілами збільшується. При наступному збільшенні концентрації молекул n вони шикуються щільно вертикально (фаза *III*) і коефіцієнт тертя знову знижується до мінімуму. Він не міняється й у випадку, коли молекули шикуються в другий ряд (фаза *IV*) і утворюють наступні полімолекулярні шари. Характерним є те, що найменше тертя спостерігається лише в тому випадку, коли на поверхнях пар тертя утворювалися шари із площинами легкого ковзання, спрямованими уздовж діючої зовнішньої сили (фази *I*, *III* і *IV*).

У трибології роль ПАР винятково велика. Вони присутні практично в кожному мастильному матеріалі (жирні кислоти, спирти, мила й ін.) і впливають на механічні властивості твердих тіл.

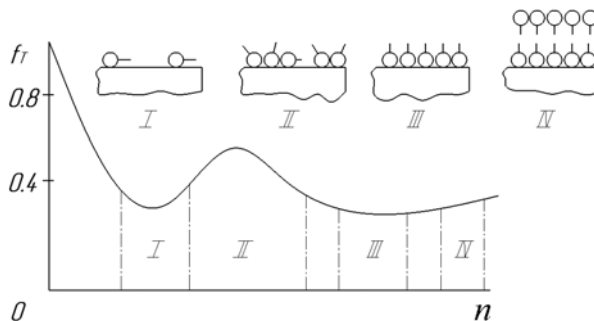


Рис. 2.6. Залежність коефіцієнта тертя f_m від характеру орієнтації поверхнево – активних молекул на поверхні пар тертя (n – концентрація ПАР в нейтральному навколишньому середовищі)

Під впливом поверхнево – активних речовин рідкого середовища виявляється ефект адсорбційного зниження міцності поверхневого шару твердих тіл (ефект П.А. Ребіндера). Розрізняють зовнішній і внутрішній адсорбційні ефекти (рис. 2.7).

Зовнішній ефект відбувається в результаті адсорбції ПАР на зовнішній поверхні твердого тіла, що деформується (рис. 2.7, а). Для його здійснення необхідно попереднє навантаження матеріалу й добір відповідного ПАР.

Внутрішній адсорбційний ефект викликається адсорбцією ПАР на внутрішніх поверхнях розділу – зародкових мікротріщинах пошкодження, що виникають у процесі деформації твердого тіла (рис.2.7, б).

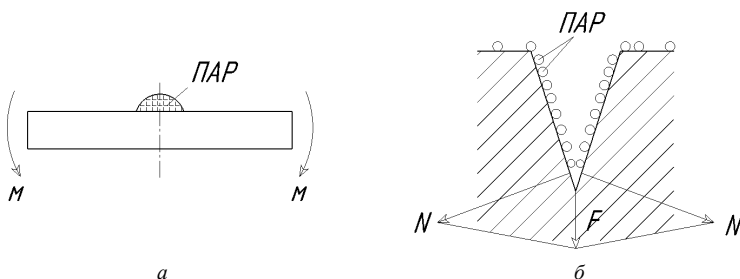


Рис. 2.7. Ефект Ребіндера:
а – зовнішній прояв ефекту; б – внутрішній прояв ефекту

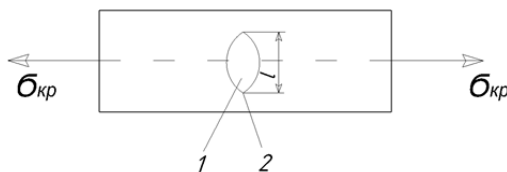


Рис. 2.8. Фізична модель міцності технічних металів (модель Гриффітса):
1 – тріщина; 2 – концентратор напруження

За теорією А. Гриффітса пошкодження твердого тіла відбувається, якщо прикладене до нього розтяжне напруження досягає критичного значення $\sigma_{кр}$, що викликає перенапруження у вершині тріщини, рівне теоретичній міцності металу, $\sigma_{теор} = \beta\sigma_{кр}$, де β – коефіцієнт концентрації напруження (рис. 2.8):

$$\sigma_{кр} = \alpha \sqrt{\frac{EW}{l}}, \quad (2.1)$$

де E – модуль пружності матеріалу; W – поверхнева енергія, чисельно рівна коефіцієнту поверхневого натягу σ , l – довжина тріщини; α – коефіцієнт пропорційності.

ПАР, проникаючи в різні тріщини, знижують величину поверхневої енергії W , а отже, і граничні критичні напруження, що викликають пошкодження матеріалу.

Взаємодія рідини й твердого тіла. Кут змочування й капілярні явища. При поганому змочуванні пар тертя мастильний матеріал не потрапляє в зону тертя, на поверхнях тертя не утворюються необхідні захисні шари, порушуються тепловий режим тертя й ряд інших процесів. Характер змочування твердих поверхонь визначають за кутом змочування θ (рис. 2.9, а) у результаті додавання векторів сил поверхневого натягу на границях розділу фаз: $\bar{\sigma}_{12}$ тверде тіло – рідина, $\bar{\sigma}_{23}$ рідина – газ і $\bar{\sigma}_{13}$ тверде тіло – газ. Коли результуюча цих векторів стає рівною нулю, система здобуває стійкого положення.

Кут змочування θ у цьому випадку визначається як кут між дотичною до поверхні рідини в точці її торкання із твердим тілом, проведеної через шар рідини. При $\theta < \pi/2$ (рис. 2.9, а) вважається, що поверхня твердого тіла гідрофільна (добре змочується рідиною), а при кутах $\theta > \pi/2$ (рис. 2.9, б) – поверхня гідрофобна (погано змочується рідиною). Кут θ є дуже чутливим до властивостей і стану поверхні як твердого тіла, так і рідини. Наприклад, по куту змочування чистою водою поверхні твердого тіла можна з великою вірогідністю судити про процеси, що відбуваються на поверхні твердого тіла (наприклад, ступень окиснення, забруднення й т.п.).

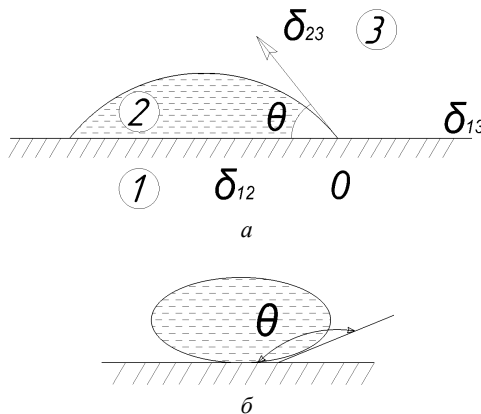


Рис. 2.9. Характер змочування рідиною поверхні твердого тіла: а – гідрофільної; б – гідрофобної; 1 – тверде тіло; 2 – рідина; 3 – газ

Кут змочування θ визначають за виразом:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{mz} - \sigma_{pz}}{\sigma_{mp}}, \quad (2.2)$$

де σ_{mz} , σ_{pz} , σ_{mp} – коефіцієнти поверхневого натягу відповідно на границі розділу: тверде тіло – газ, рідина – газ, тверде тіло – рідина.

Для олій крайовий кут змочування перебуває в межах $0 < \theta < 90^\circ$. При такому значенні θ рідина змочує поверхню й прагне розтектися по ній.

Адгезія й когезія контактуючих тіл. Утворення молекулярного зв'язку, нормального до поверхні розділу тіл, між поверхнями дотичних твердих або рідких тіл (фаз), отримало назву адгезії. Рівень адгезії оцінюють по силі відриву одного тіла від іншого або по питомій адгезії, що представляє відношення сили відриву до площі відриву (адгезійного шву).

Зазвичай, адгезія твердих тіл в атмосферних умовах низька, оскільки площі дійсного контакту і ділянок поверхні, що перебувають у полі дії молекулярних сил, незначні, а в реальних умовах виявляються покритими адсорбційними шарами. Граничні значення адгезії спостерігаються при гарячому зварюванні, пайці, лудінні й склеюванні поверхонь, коли площа дійсного контактування тіл суттєво збільшується й десорбуються поверхневі шари, що раніше там перебували. Гранична адгезія виникає також при зіткненні ювенільно чистих твердих тіл у пластичному й еластичному стані, а також при утворенні нової твердої фази на поверхнях контактуючих тіл.

Якщо дотичні тіла однакові, то адгезія при повному їхньому зіткненні переходить у когезію (зчеплення), яка характеризує міцність тіл – їх силу зчеплення між молекулами, атомами або іонами речовини в даному тілі. Вона багато в чому відображає особливість будови конкретного тіла. За характером розриву шва між тілами оцінюють характер молекулярної взаємодії, що існувала між ними. Якщо розрив відбувається по границі розділу між тілами, то був адгезійний зв'язок. Якщо розрив відбувається за об'ємом одного з тіл, то це розрив когезійного зв'язку. Цей випадок спостерігається в умовах, коли адгезійний зв'язок виявляється міцніше когезійного зв'язку більш слабкого матеріалу. Прикладами когезійного пошкодження матеріалів бувають задирки і виразкові ушкодження партертя.

Механохімічні процеси при терті твердих тіл. Високі контактні стискаючі й розтягувальні напруження, концентратори температури, рух дислокацій, розвиток внутрішніх і поверхневих дефектів, а також утворення свіжих поверхонь суттєво міняють хімічну активність поверхонь

і пов'язаних із цим явищ. У вузлах тертя значно зростають швидкості окиснення матеріалів, швидкості електрохімічних і термодифузійних процесів та ін. Наприклад, в 20...30 разів прискорюється корозія металів. Значно зростає ефективність адсорбційного зниження міцності металів. Тому застосовують спеціальні методи регулювання фрикційних властивостей поверхонь тертя. Ці механохімічні процеси при терті суттєво впливають на фізико – хімічну механіку тертя й зношування й тому значно змінюють процеси взаємодії, зміни і пошкодження поверхонь, які є сутністю зовнішнього тертя.

2.4. Механічні властивості матеріалу поверхневого шару

Найбільш важливими для трибології фізико – механічними показниками поверхневих шарів є *мікротвердість* (H_μ), модулі Юнга й зсуву (E , G), *межа міцності* (τ_s). Мікротвердість визначається найчастіше методом вдавнення в досліджувану поверхню алмазної піраміди з кутом між гранями 136° під навантаженням N . Під мікроскопом вимірюють діагональ відбитка (d). Величина мікротвердості розраховується за формулою

$$H_\mu = 1,854 \cdot N / d^2. \quad (2.3)$$

Величина мікротвердості пов'язана з межею плинності при роз тяжінні (σ_s) і межею зсувної міцності:

$$H_\mu \cong 3 \sigma_s \cong 6 \tau_s. \quad (2.4)$$

Зі зниженням температури (починаючи від кімнатної) мікротвердість слабо змінюється убік підвищення. При збільшенні температури мікротвердість суттєво знижується для багатьох металів за законом:

$$H_\mu = A \exp\left(-\frac{\alpha T}{T_{пл}}\right), \quad (2.5)$$

де A , α – коефіцієнти; $T_{пл}$ – температура плавлення.

Пружні властивості матеріалу в поверхневих шарах незначно відрізняються від об'ємних властивостей (E і G). Пластичні властивості, у тому числі й мікротвердість, природно змінюються по глибині.

Механічна обробка деталей супроводжується деформацією шарів і зміцненням (наклепом). У результаті наклепу утворюється сильно

деформована кристалічна решітка металу, що приводить до підвищення меж міцності, плинності й мікротвердості. Наступний шар, який лежить нижче, має перекручену кристалічну решітку, неоднорідно – розподілені внутрішні напруження між окремими зернами, нестійкі, неврівноважені положення атомів, пружні викривлення площин ковзання кристалів. Усе це на певній глибині надає металу структурно – нестійкий стан.

Структура поверхневого шару матеріалу деталі після механічної обробки або зовнішнього тертя однієї деталі відносно другої може бути представлена у вигляді п'яти шарів (рис. 2.10).

Механічна обробка конструкційних матеріалів у процесі виготовлення деталей вносить істотні зміни в будову і властивості поверхневих шарів. Одна з причин – пружна й пластична деформація. При механічному впливі активно утворюються і переміщуються дислокації, виникають нові структури, пов'язані зі здрібнюванням і орієнтацією зерен у напрямку дії сил. Деформування зерен і їх орієнтація відбуваються не тільки при механічній обробці поверхонь, але й при терті. Таку зміну структури в поверхневих шарах називають текстурованням. Наявність орієнтації текстурованих зерен, що відбувається у напрямку руху обробного інструменту або тертя, змінює міцність, твердість матеріалу, магнітні, електричні й інші властивості (рис. 2.11). Текстуровані шари мають високий ступінь анізотропії.

При текстурованні, що утворилося при обробці або терті, у самому поверхневому шарі й у підшарі виникають залишкові напруження розтягання – стиску, різні дефекти у вигляді мікротріщин і пор. Пластичне деформування супроводжується тепловиділенням. Ріст локальних температур прискорює окисні процеси, чому сприяє середовище (охолоджувальні емульсії, змащення). У поверхневому шарі при терті можуть відбуватися фазові перетворення. У табл. 2.2 наведені дані про властивості деформованого шару.

При вивченні мікротвердості після механічної обробки найбільше значення спостерігається не на поверхні, а на глибині *10...20 мкм*. На сталевих поверхнях верхній шар під впливом тертя або багаторазової пластичної передеформації може втрачати міцність. У ньому відбувається тонке здрібнювання кристалів і структура наближається до аморфної. Такий шар, товщина якого звичайно становить біля *5 мкм*, називається *шаром Бейльбі*.

При дослідженні процесів тертя й зношування особливе значення має втомна міцність матеріалів і деталей. При терті спостерігається наступна послідовність процесу втомного поверхневого пошкодження: виникнення дефектів у структурі решітки; поява в матеріалі мікротріщин; пошкодження поверхні при виході мікротріщин на поверхню. Зміни властивостей у кристалічних матеріалах, що відбуваються при пластичній деформації,

можуть бути усунуті тільки в процесі рекристалізації при відповідній термообробці.

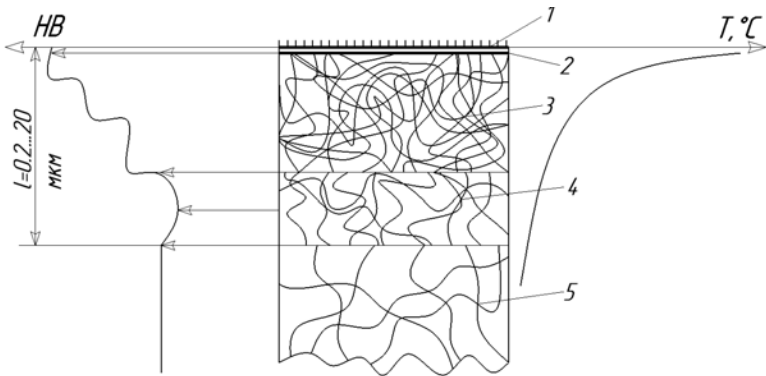


Рис. 2.10. Структура поверхневого шару металу деталі:

1 – адсорбований шар, що складається із плівок вологи, газів і забруднень (0,01...0,1 мкм);

2 – шар оксиду, що має підвищену твердість;

3 – шар із сильно деформованою кристалічною решіткою в результаті наклепу;

4 – більш глибокий шар з перекрученою кристалічною решіткою і більшим числом вакансій і дислокацій; 5 – метал з вихідною структурою

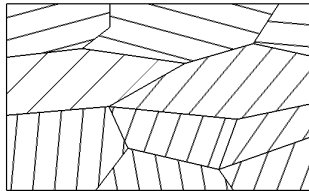


Рис. 2.11. Текстурування

Таблиця 2.2

Властивості деформованого шару

Вид обробки	$H_{\mu \text{ пов.}}/H_{\mu \text{ об'ємн.}}$	Товщина шару, мкм
Точіння	1,2 – 2	30 – 200
Фрезерування	1,4 – 2	40 – 200
Чистове точіння	1,5 – 2	20 – 75
Шліфування	1,5 – 2,5	30 – 60
Притирання	1,1 – 1,2	3 – 7

Рекристалізація металів – утворення і ріст одних кристалічних зерен за рахунок сусідніх зерен тієї ж фази. Протікає рекристалізація при нагріванні після холодної деформації. У результаті знижується міцність, твердість металу й збільшується його пластичність. Зазвичай для сталей температура рекристалізації становить 300...400 °C.

3. ГЕОМЕТРІЯ І КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1. Макрогеометрія поверхонь деталей

Геометрична форма, взаємне розташування поверхонь і розміри деталей машин зазвичай задаються кресленням і технічними умовами. Викривлення геометричної форми або макровідхилення деталі при її виготовленні або експлуатації приводить до підвищеного й нерівномірного зношування деталей, знижує точність роботи рухливих з'єднань, порушує характер посадок, викликає контактне тертя, а також створює осередок задирок і нерівномірний розподіл напруження у посадках з натягом.

На практиці найчастіше зустрічаються форми відхилення циліндричних поверхонь у поздовжньому напрямку, показані на рис. 3.1, *a* – *г*, а у поперечному напрямку – на рис. 3.1, *д* – *е*.

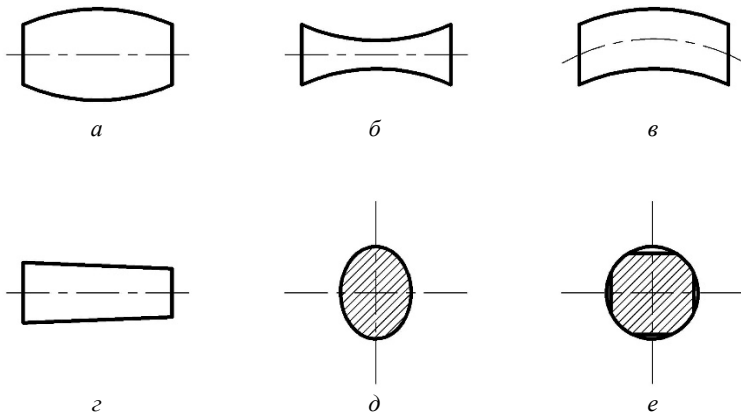


Рис. 3.1. Види відхилень форм циліндричних поверхонь:
a – опуклість; *б* – сідлоподібність; *в* — увігнутість; *г* – конусність;
д – овальність; *е* – огранювання

3.2. Мікрогеометрія поверхонь деталей

Мікрогеометрія характеризується хвилястістю й шорсткістю (рис. 3.2).

Хвилястість – це сукупність регулярно повторюваних нерівностей з відносно великим кроком. Звичайне відношення $L/H_{\text{хв}} = 50 \dots 1000$, де L – крок хвилі, $H_{\text{хв}}$ – висота хвилі.

Шорсткість – сукупність нерівностей з відносно малим кроком $l \approx 2 \dots 800 \text{ мкм}$ і висотою $H_{\text{max}} \approx 0,025 \dots 320 \text{ мкм}$, що утворюють рельєф поверхні деталі, розглянутих на певній базовій довжині $l_0 = 80 \dots 8000 \text{ мкм}$ і для шорсткостей $l/H_{\text{max}} < 50$. Поверхня виступів, що утворюють шорсткість, має ще шорсткість другого порядку – субмікрошорсткість, яка, однак, не нормується через відсутність досить надійних засобів її оцінки.

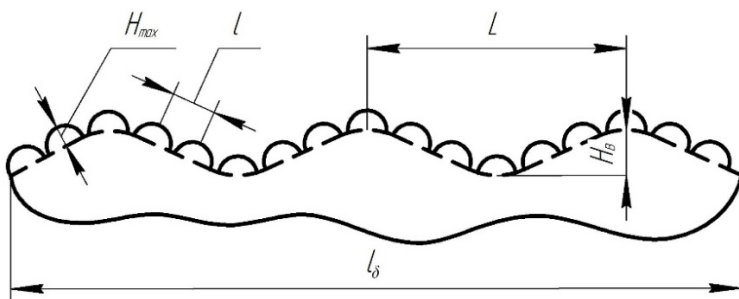


Рис. 3.2. Схема хвилястості й шорсткості поверхні $H_{\text{хв}}$

Шорсткість поверхні характеризується середнім арифметичним відхиленням профілю від середньої лінії R_a і висотою нерівностей R_z .

Для визначення R_z на ділянці профілограми довжиною l_0 (де l_0 – базова довжина) знаходять 5 найбільших максимумів і 5 мінімумів (рис. 3.3) і розраховують за цими десятима точками значення R_z :

$$R_z = \frac{1}{10} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{i\text{max}}| + \sum_{i=1}^5 |y_{i\text{min}}| \right), \quad (3.1)$$

де y_i – відстань розрахункових точок від середньої лінії.

Середнє арифметичне відхилення профілю

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{i\text{min}}|, \quad (3.2)$$

де n – число точок профілю.

Для виміру шорсткості застосовується цілий ряд різних методів. Однак багато методів оцінюють мікрогеометрію поверхні тільки за її профілем. Найбільш широко використовуються щуповий і оптичний методи. Оптичний метод заснований на використанні світлового перетину, коли на досліджувану поверхню проектується вузька яскраво освітлена щілина під кутом 45° . Так як поверхня має нерівності, проекція відтворює форму профілю. Цей профіль може бути обмірюваний за допомогою мікроскопа й сфотографований.

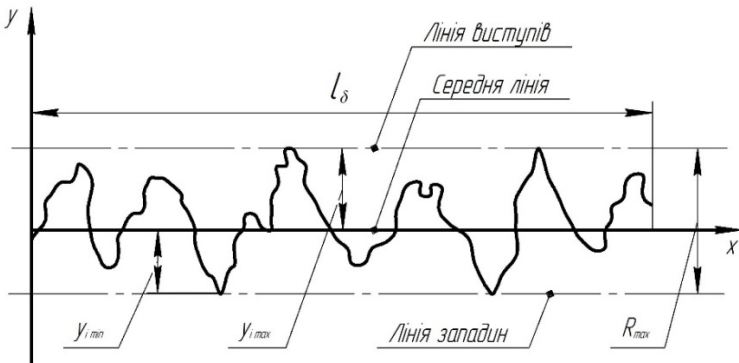


Рис. 3.3. Профілограма поверхні

Щуповий метод полягає в тому, що по поверхні переміщається голка 1 (рис. 3.4) з малим радіусом закруглення ($2...10$ мкм). Голка з'єднана з якорем 2 і може разом з ним повертатися відносно призми 4, при цьому змінюється проміжок між сердечником 3 і якорем 2.

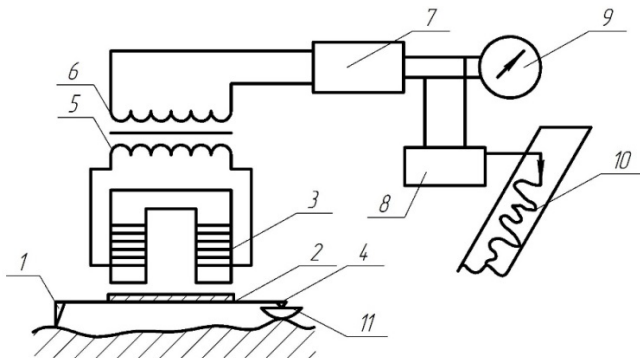


Рис. 3.4. Схема щупового приладу

Це приводить до зміни змінного струму в котушці 5. Струм від трансформатора 6 надходить до підсилювача 7 і звідти на самопис 8, і прилад 9, що показує. Самопис записує на спеціальному папері 10 профілограму досліджуваної поверхні.

Призма 4 закріплена нерухомо відносно кульової опори 11. Оскільки куля має більший радіус кривизни, то він ковзає по вершинах мікровиступів, опускаючись і підіймаючись відповідно до наявної на поверхні хвилястості. Завдяки цьому можна записати шорсткість поверхні, усунувши вплив хвилястості. Якщо кульова опора буде ковзати по спеціально виготовленій (еталонній) дуже гладкій поверхні, то голка 1 буде записувати одночасно як шорсткість, так і хвилястість.

3.3. Радіус кривизни мікронерівностей і крива опорної поверхні

Радіус кривизни мікронерівності (рис. 3.5) визначається за виразом

$$r = d^2 / 8h, \quad (3.3)$$

де d – ширина основи нерівності, узята на відстані $h = 0,35R_a$ від її верхньої точки.

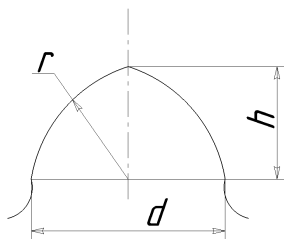


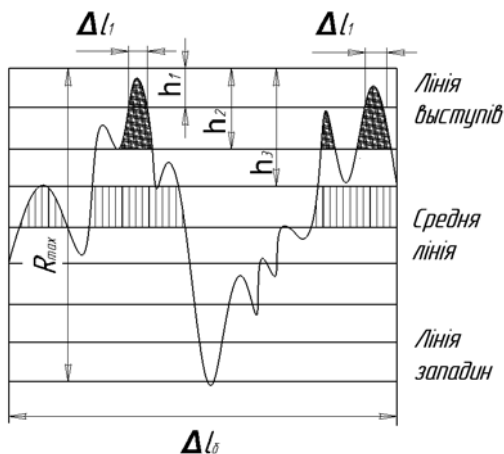
Рис. 3.5. Радіус кривизни мікронерівності

Наведений радіус $r_{нав}$ вершин нерівностей профілю визначається як середнє геометричне радіусів двох взаємно перпендикулярних напрямків – поперечного й поздовжнього:

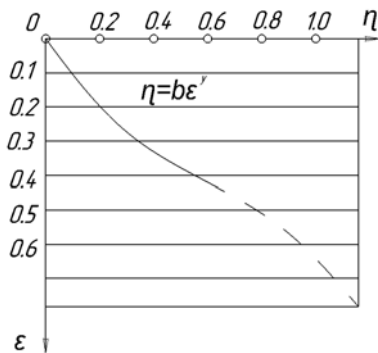
$$r_{нав} = \sqrt{r_{пон}^2 + r_{позд}^2}, \quad (3.4)$$

Діапазон виміру $r_{\text{нав}} = 5 \dots 1350 \text{ мкм}$.

До характеристик мікрогеометрії, досить важливих для вивчення процесу тертя, відноситься крива опорної поверхні (рис. 3.6).



a



б

Рис. 3.6. Крива опорної шорсткої поверхні твердого тіла:
а – профілограма; б – опорна крива

Для побудови цієї кривої профілограму розсікають на деякому рівні $h_1, h_2, \dots, h_i$ від вершини максимального виступу. Після цього сумують відрізки перетинів виступів на кожному поточному рівні:

$$\sum \Delta l_i = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_i, \quad (3.5)$$

Також знаходять відносну опорну довжину профілю

$$\eta = \sum l_i / l_\delta, \quad (3.6)$$

де l_δ – базова довжина профілю.

Ці значення відкладають по осі абсцис, а по осі ординат відкладають відповідні значення відносного зближення $\varepsilon = h/R_{max}$, де R_{max} – максимальна висота виступу. Крива, побудована в координатах ε і η називається кривою опорної поверхні у відносних координатах. Вона показує, яку частку займає матеріал у шорсткому шарі на кожному рівні по висоті. Початкову частину кривої описують статичною функцією

$$\eta_p = b\varepsilon^\gamma, \quad (3.7)$$

де b і γ – параметри, що залежать від виду обробки. Зазвичай $b = 0,5 \dots 3,5$; $\gamma = 1,3 \dots 2,3$.

Мікрогеометрія поверхні може бути охарактеризована узагальненим комплексом шорсткості поверхні

$$\Delta = R_{max} / rb^{1/\gamma}, \quad (3.8)$$

3.4. Площі контакту шорстких поверхонь

При контакті шорстких поверхонь розрізняють номінальну $A_a = a \times b$, контурну A_c і фактичну A_r площі дотику (рис. 3.7).

На рис. 3.8 показана структурна схема площі контакту. Площини фактичного контакту ΔA_{ri} згруповані на площах дотику хвиль, сукупність яких становить контурну площу контакту ΔA_{ci} (КПК). Загальна площа дотику тіл, у межах якої укладені ФПК і КПК, називається номінальною площею контакту A_a (НПК).

При контактуванні деталей внаслідок хвилястості їх поверхонь контур контакту буде виникати переважно на вершинах хвиль. Кожна така область буде обмежена контуром ΔA_c , усередині якого існують фактичні плями контакту ΔA_r .

Ці контури віддалені один від іншого на відстань кроку хвилі L . Загальна контурна площа буде $A_c = \sum \Delta A_c$. У більшості випадків величина контурної площі контакту A_c становить 5...15 % величини номінальної площі контакту A_a . Фактична площа контакту (ФПК) $A_r = \Delta A_r$ – це площа, на

якій здійснюється контакт мікронерівностей, що утворюють шорсткість поверхні. ФПК зазвичай мала й займає не більш 1...10 % номінальної площі A_a . Плями фактичного контакту, утворені внаслідок деформації окремих мікровиступів, мають діаметр $d_r = 10...20 \text{ мкм}$.

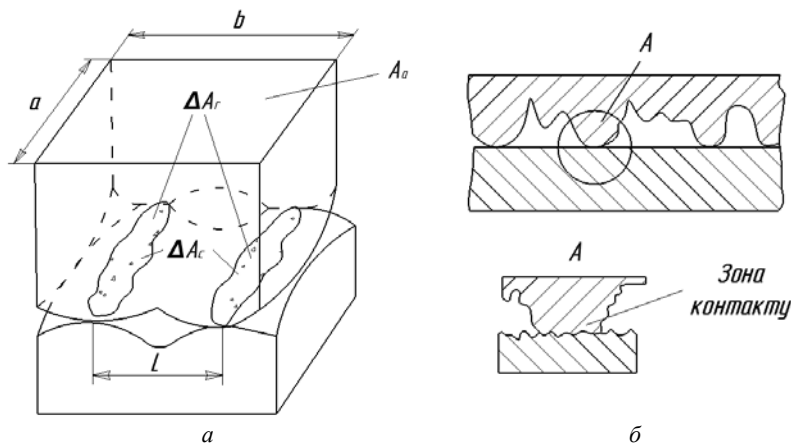


Рис. 3.7. Контакт твердих тіл: *а* – площі дотику; *б* – зона фактичного контакту

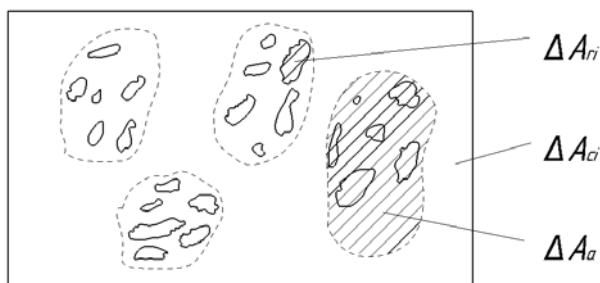


Рис. 3.8. Структурні компоненти реального контакту шорстких поверхонь:

A_a – номінальна площа контакту; A_{ci} – контурна площинка;

ΔA_{ri} – фактична площа одиничної плями контакту

Відповідно до цього розрізняють три види контактних тисків:

$p_r = F_n/A_r$ – фактичний тиск;

$p_c = F_n/A_c$ – контурний тиск;

$p_a = F_n/A_a$ – номінальний тиск,

де F_n – номінальне навантаження.

Площа фактичного контакту A_r відіграє виняткову роль у всіх фізичних і хімічних процесах, які можуть протікати на границі розділу деталей машин. Тертя й зношування, електро – і теплопровідність контактів, твердість стиків, контактна хімічна корозія й міцність пресових з'єднань – усі ці явища у значній мірі залежать від площі фактичного контакту твердих тіл.

Контакт шорстких поверхонь має дискретний характер, при цьому окремі нерівності за формою близькі до сферичних сегментів; елементарні плями фактичного контакту виникають у результаті як пружних, так і пластичних деформацій; фактична площа дотику пропорційна прикладеному навантаженню, при зростанні якого збільшення площі відбувається переважно за рахунок виникнення нових плям контакту при збереженні середнього розміру плями в межах $d_r = 10...20 \text{ мкм}$.

При контактних тисках, що не перевищують межі текучості матеріалу σ_m , напружено – деформований стан тіла визначається з розв'язання задачі Герца про контакт пружної сфери із пружним півпростором. У пластичний стан матеріал переходить при середніх нормальних тисках на контакті відповідно до залежності:

$$p_r = c\sigma_T, \quad (3.9)$$

де σ_m – межа текучості матеріалу при одновісному напруженому стані; c – коефіцієнт, що враховує вплив форми тіла.

На основі експериментально – теоретичних досліджень встановлено, що для сфери $c \approx 3$, тому в пластичний стан матеріал перейде при

$$p_r \approx 3\sigma_T \approx HB, \quad (3.10)$$

де HB – твердість матеріалу за Брінеллем.

При пружному контакті окремої сферичної нерівності радіусом r із плоскою поверхнею площа фактичного контакту ΔA_r і зближення тіл a згідно з теорією Герца:

$$\Delta A_{ri} = 2,82 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} - \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) (rF_n)^{2/3}; \quad (3.11)$$

$$a = 0,82 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} - \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) r^{-1/3} F_n^{2/3}, \quad (3.12)$$

де $E_{1,2}$ і $\mu_{1,2}$ – модулі пружності й коефіцієнти Пуассона матеріалів; F_n – нормальне навантаження.

У випадку пластичної деформації сферичної нерівності площа її контакту може бути приблизно розрахована, виходячи із припущення, що середній нормальний тиск на контакті дорівнює твердості матеріалу за шкалою HB :

$$\Delta A_{ri} \approx \frac{F_n}{HB}. \quad (3.13)$$

При контакті шорсткої поверхні із гладкою площиною площа фактичного контакту дорівнює сумі площинок контакту ΔA_{ri} , утворених у результаті деформації окремих виступів:

$$A_r = \sum_1^n \Delta A_{ri}, \quad (3.14)$$

де n – число контактуючих виступів.

Тоді у випадку *пластичної* деформації нерівностей

$$A_{r(nl)} = \frac{1}{HB} \left(\sum_1^n F_{ni} \right) = \frac{F_n}{HB}. \quad (3.15)$$

При *пружній* деформації нерівностей

$$A_{r(yn)} = \int_0^n \Delta A_{ri} dn_r, \quad (3.16)$$

$$\Delta A_{ri} = \pi r a_i; \quad n_r = nb \left(\frac{a_i}{R_{\max}} \right)^{\nu-1}, \quad (3.17)$$

де r , a – радіус і зближення нерівностей під навантаженням F_n ; $R_{\max}$ – максимальна висота нерівностей; b , ν – параметри кривої опорної поверхні; n – число всіх виступів на площі A_c . Підставляючи в вираження (3.16) вираження (3.12), (3.17), і інтегруючи рівняння (3.16), отримаємо при $\mu_1 = \mu_2 = \mu$; $E_1 = E_2 = E$:

$$A_r = \left[\frac{2,35b^{1/2\nu} A_c^{1/2\nu} (1-\mu^2) r^{1/2} F_n}{2^{1/2\nu} K_1 R_{\max}^{1/2} E} \right]^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}, \quad (3.18)$$

де K_1 – коефіцієнт, що залежить від ν .

Для того щоб перейти до контакту двох шорстких поверхонь, рекомендується замість ν , b , $R_{\max}$, r для однієї поверхні підставити їх еквівалентні значення ν_Σ , b_Σ , $R_{\max\Sigma}$, r_Σ , що враховують властивості двох тіл:

$$\nu_\Sigma = \nu_1 + \nu_2; \quad (3.19)$$

$$R_{\max\Sigma} = R_{\max 1} + R_{\max 2}; \quad (3.20)$$

$$r_\Sigma = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}; \quad (3.21)$$

$$b_\Sigma = \frac{K_2 b_1 b_2 R_{\max\Sigma}}{R_{\max 1}^{\nu_1} + R_{\max 2}^{\nu_2}}, \quad (3.22)$$

де K_2 – коефіцієнт, що залежить від ν_1 і ν_2 .

3.5. Вплив геометричних параметрів поверхонь тертя на зносостійкість деталей

Шорсткість поверхні тертя значно впливає на зносостійкість деталей машин, особливо в період припрацювання. У результаті припрацювання для кожного режиму тертя встановлюється оптимальна шорсткість, що майже не залежить від початкової мікрогеометрії. Тому треба створювати поверхні, шорсткість яких за можливістю буде відповідати приробленим поверхням тертя для конкретних умов роботи.

На зносостійкість впливають не тільки висота нерівностей, але і їх напрям, способи формування поверхневих шарів і їх фізико – механічні властивості. Найбільш зносостійка поверхня – з однаковою мікрогеометрією у всіх напрямках. Подібна поверхня може бути отримана, наприклад, після гідрополірування.

Шорсткі поверхні контактують на порівняно малій загальній площі при високих значеннях середніх тисків. Необхідність видалення великих нерівностей приводить до зростання початкового зношування в процесі

припрацювання, збільшує час припрацювання, можливо також утворення великих часток зношування, які можуть викликати задирки. Занадто гладкі поверхні менше адсорбують мастильний матеріал. Через більшу фактичну площу контакту швидкість зношування невелика й може виявитися недостатньою для припрацювання сполучених поверхонь, необхідного для попередження небезпечної концентрації навантаження й привести до заїдання навіть після тривалої роботи.

Найбільш вигідне розташування оброблювальних рисок на поверхнях тертя з урахуванням напрямку відносної швидкості залежить від тиску, режиму змащення, матеріалів пари тертя й значень параметрів шорсткості. При терті без мастильного матеріалу й великих тисках ризику на обох поверхнях, що розташовані перпендикулярно напрямку руху, сприяють заїданню. Попередити заїдання можна взаємно перпендикулярним розташуванням рисок на сполучених поверхнях. Таке ж розташування рисок рекомендується при терті із граничним змащенням поверхонь малої шорсткості. При терті без мастильного матеріалу й невеликих тисках або при граничному змащенні й щодо великої шорсткості ($Ra = 2,5...1,25 \text{ мкм}$) доцільна паралельність оброблювальних рисок у напрямі руху.

Хвилястість поверхонь тертя зменшує площу їх фактичного контакту й підвищує фактичний контактний тиск. Наявність хвилястості міняє характер контакту: замість плоских контактують криві поверхні із властивими їм значними напруженнями на малих площинках взаємного торкання. Незмащені хвилясті поверхні менш стійкі проти заїдання, ніж рівні, при змащених поверхнях більш стійкими виявляються хвилясті, оскільки вони втримують мастильний матеріал у западинах між хвилями. Іноді робочі поверхні прямолінійних напрямних навмисно виконують хвилястими для збільшення їх надійності.

Однак хвилястість поверхні негативно впливає на властивості деталей, що працюють в умовах кочення або кочення з ковзанням. Так, хвилястість поверхні кулачків може при певних швидкостях підсилити вібрацію механізму. При зачепленні шестерні й колеса, що має хвилястість на робочій профільній поверхні, контактування зубів відбувається як по вершинах, так і по западинах хвилястості. В окремі моменти відбувається розвантаження аж до повного розриву контакту, після чого під дією крутного моменту знову настає контакт зубів, що супроводжується різким зростанням динамічного навантаження на зуб. У підсумку виникають крутні й поперечні коливання валів і пов'язаних з ними інших деталей.

Макрогеометричні відхилення поверхонь тертя і їх взаємного розташування погіршують умови контактування поверхонь: зменшується номінальна площа контакту, лінійне контактування переходить у точкове.

Макрогеометричні відхилення змінюють товщину мастильного прошарку. Може якісно змінитися й сам процес тертя. Наприклад, овальність шийки приводить при постійному навантаженні й рівномірному обертанні валу до періодичної зміни товщини мастильного шару в підшипнику.

Точність розмірів деталей вузлів тертя також впливає на їхню довговічність. У підшипників ковзання термін служби при правильно встановленому гарантованому проміжку зменшується зі збільшенням допусків на діаметр. У підшипниках кочення через розкид діаметрів тіл кочення навантаження на них суттєво відрізняються.

4. ТЕРТЯ СПОЛУЧЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Зовнішнє тертя твердих тіл

За кінематичними ознаками розрізняють тертя спокою, ковзання й кочення (рис. 4.1).

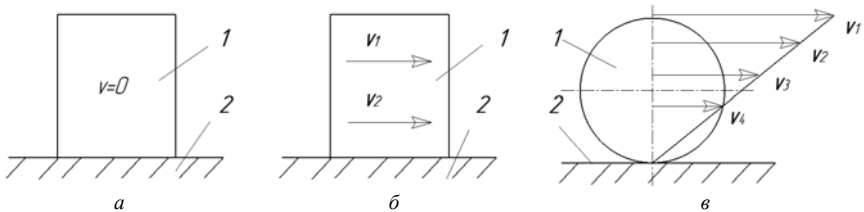


Рис. 4.1. Види зовнішнього тертя:
а – спокою; б – ковзання; в – кочення

Силою тертя спокою називають тангенціальну силу, що прикладається до нерухомих тіл й не викликає їхнього ковзання (рис. 4.1, а). При терті ковзання сполучені тіла переміщуються поступально і відносні швидкості різних точок тіла, що переміщується, однакові (рис. 4.1, б). При терті кочення одне тіло перекочується по іншому й відносні швидкості різних точок тіла, що котиться, різні (рис. 4.1, в). У той же час реальні тіла, що володіють пружністю, контактують не в точці, а на деякій площинці. Тому іноді обидва види тертя проявляються спільно.

Залежно від наявності змащення й характеру його поведінки розрізняють наступні режими тертя: сухе, на межі, рідинне й газо – або гідродинамічне. На показники тертя й зношування впливають:

- властивості матеріалів пари тертя й навколишнього середовища;
- мікро – і макрогеометрія контактуючих елементів і коефіцієнт взаємного перекриття;
- режим тертя по навантаженню, по швидкості ковзання, по початковій, поточній об'ємній і поверхневій температурі і градієнту температури по координаті й часу.

Характер фрикційних зв'язків на одиничній плямі контакту, що утворилася під дією нормальних і тангенціальних сил, залежить від

геометричних, механічних, фізичних і хімічних факторів. Одним з найбільш важливих комплексів, що враховують перераховані вище фактори, є безрозмірна величина h/r , де h – глибина проникнення мікронерівності; r – радіус мікронерівності. Залежно від його значення розрізняють наступні види фрикційних зв'язків на одиничній плямі контакту (рис. 4.2).

I. Пружне відтискування матеріалу нерівністю, при якому контактні напруження не перевищують межі пружності. У цьому випадку $h/r < 0,01$ для сталей і $h/r < 0,001$ для кольорових металів.

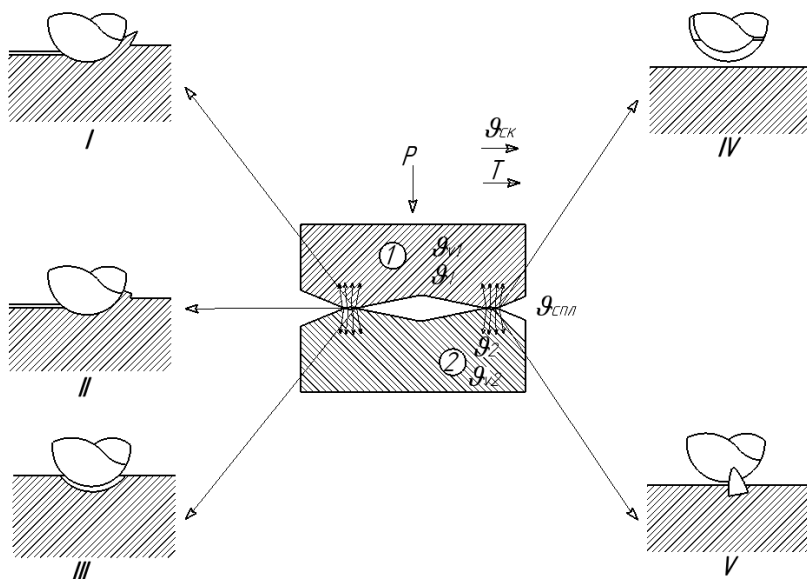


Рис. 4.2. Види фрикційної взаємодії: *I* – зріз матеріалу; *II* – пластичне відтискування; *III* – пружне відтискування; *IV* – схоплювання плівок; *V* – схоплювання поверхонь; *1* і *2* – контактуючі тіла; P – нормальне навантаження; v – швидкість ковзання; g_{v1} і g_{v2} – об'ємні температури тіла *1* і *2*; g_1 і g_2 – середні температури поверхонь тертя тіла *1* і *2*; g_{spl} – температурний спалах на фактичній плямі торкання

II. Пластичне відтискування матеріалу нерівністю, при якому контактні напруження досягають межі плинності ($h/r < 0,5$).

III. Мікрорізання, контактні напруження або деформації досягають руйнуючих значень ($h/r \geq 0,5$).

IV. Адгезійне порушення фрикційного зв'язку, що має місце безпосередньо на поверхні контакту твердих тіл. Такий вид порушення фрикційного зв'язку можливий, якщо дотримується правило позитивного градієнта механічних властивостей матеріалу по глибині $d\tau/dh > 0$, тобто нижче лежачі шари матеріалу є більш міцними, ніж поверхневі шари.

V. Когезійне порушення фрикційного зв'язку відбувається усередині матеріалу з вирином деякого мікрооб'єму. Це можливо у тому випадку, коли міцність зв'язку матеріалу з нерівністю вище міцності лежачого нижче матеріалу $d\tau/dh < 0$.

В умовах пластичного контакту відбувається обтікання пластично деформованим матеріалом поверхні одиначної нерівності більш твердого тіла. При певному значенні проникнення h/r і зсувного опору τ/σ_T , що викликаний адгезійною взаємодією тіл, перед нерівністю в об'ємі матеріалу утворюється застійна зона й змінюється характер фрикційної взаємодії на контакті. Пластичне відтискування матеріалу переходить у мікрорізання. Умови його виникнення визначаються нерівністю:

$$\frac{h}{r} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right), \quad (4.1)$$

де τ – дотичне напруження зрізу адгезійного зв'язку; σ_T – межа текучості матеріалу.

Якщо під дією навантаження величина h/r перевищить критичну величину, встановлювану нерівністю, то на контакті настане найнебезпечніший вид фрикційної взаємодії – мікрорізання.

На працездатність рухливих сполучень різних машин і механізмів найбільший вплив виявляють два явища: зношування контактуючих деталей рухливих сполучень машин і механізмів; виділення теплоти в процесі тертя. *Нагрів тіл тертя* веде до пошкодження мастильних шарів, що розділяють їхні контактуючі поверхні, до інтенсифікації процесу зношування й виходу з ладу вузлів тертя.

4.2. Тертя ковзання при відсутності мастильного матеріалу (сухе тертя)

Сухе тертя має місце при відсутності мастильного матеріалу між поверхнями тертя тільки у вакуумі. Умовно сухе тертя при наявності адсорбованих плівок на поверхні твердого тіла зустрічається в гальмах, фрикційних передачах і муфтах, що працюють при відсутності мастильного

матеріалу, в інших вузлах тертя верстатів та обладнання, де змащення щоб уникнути псування продукції або з міркувань безпеки неприпустиме.

Механічна взаємодія поверхонь тертя обумовлена взаємним проникненням окремих точок торкання. Одна поверхня проникає в іншу не тільки за рахунок шорсткості, але й деформації, що утворюється під навантаженням внаслідок анізотропії механічних властивостей (рис. 4.3).

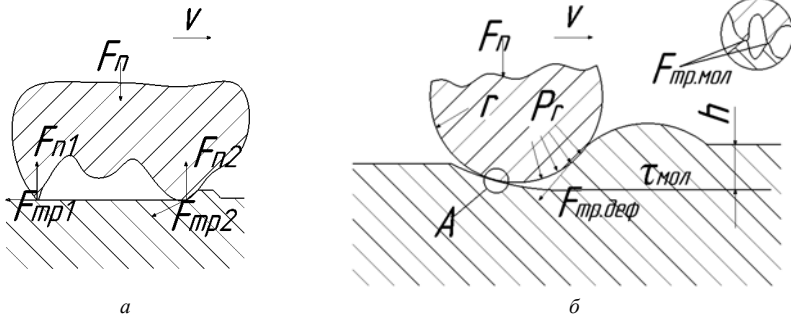


Рис. 4.3. Контакт двох шорстких тіл:

a – сила тертя, що виникає при контактній взаємодії двох нерівностей;

б – контакт твердої сфери з деформованим тілом;

F_n – нормальне навантаження; $F_{тр.}$ – сила тертя;

$\tau_{мол.}$ – дотичне напруження зрізу;

r і h – радіус нерівності й глибина її проникнення;

$\Delta F_{тр.мол.}$ і $\Delta F_{тр.деф.}$ – молекулярна й деформаційна складові сили тертя, що діють на окрему нерівність

Молекулярна взаємодія обумовлена взаємним притяганням поверхонь двох тіл. Практично молекулярне притягання або дуже мале, або таке, що приводить до утворення міцного зв'язку в об'ємі й може бути зруйноване тільки при зсуві. Сумарна величина сили тертя:

$$F_{тр.} = F_{тр.мол.} + F_{тр.деф.} = \sum_1^{n_i} \Delta F_{тр.мол.} + \sum_1^{n_i} \Delta F_{тр.деф.}, \quad (4.2)$$

де $\Delta F_{тр.мол.}$ і $\Delta F_{тр.деф.}$ – молекулярна (адгезійна) і деформаційна складові сили тертя, що діють на окрему нерівність, що проникла на глибину h (рис. 4.3, *б*), й рухається по тілу, що деформується.

Розділивши ліву й праву частини рівняння на нормальне навантаження F_n , отримаємо вираз для коефіцієнта тертя, рівний сумі його молекулярної й деформаційної складових:

$$f = f_{\text{мол.}} + f_{\text{деф.}} = \frac{\sum_{n_i} \Delta F_{\text{тр.мол.}}}{F_n} +$$

$$+ \frac{\sum_{n_i} \Delta F_{\text{тр.деф.}}}{F_n} = \frac{F_{\text{тр.мол.}}}{F_n} + \frac{F_{\text{тр.деф.}}}{F_n}. \quad (4.3)$$

Для випадку проникнення окремої мікронерівності (див. рис. 4.3, б) зсувний опір молекулярного зв'язку дорівнює:

$$\tau = \tau_o + \beta p_r ; \quad (4.4)$$

$$\tau_o = at_o + at_o \frac{E}{kT}, \quad (4.5)$$

$$\beta = at_o \gamma / kT, \quad (4.6)$$

Розділивши праву й ліву частини рівняння для τ на p_r , отримаємо значення *молекулярної складової коефіцієнта тертя* для окремої нерівності:

$$f_{\text{мол.}} = (\tau_o / p_r) + \beta, \quad (4.7)$$

де τ_o – напруження зрізу молекулярного зв'язку; β – п'єзокоефіцієнт.

Ці параметри є характеристиками поверхневого шару матеріалів і залежать від плівок, які покривають поверхню контактуючих тіл. Для більшості металів і полімерів $\tau_o = 0,2...30 \text{ МПа}$, $\beta = 0,02...0,15$.

Можна прийняти, що площа перетину, перпендикулярна до напрямку руху нерівності, у першому наближенні дорівнює площі вписаного трикутника $A = ha_k$ (рис. 4.4). Якщо границя текучості матеріалу σ_T буде відповідати напрузі, що діє на нерівність у напрямі руху, то деформаційна складова сили тертя складатиме:

$$F_{\text{тр.деф.}} = ha_k \sigma_T. \quad (4.8)$$

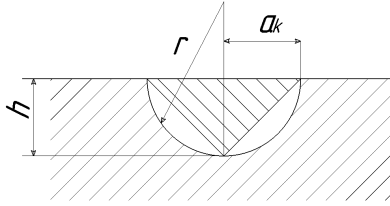


Рис. 4.4. Схема контакту: a_k – радіус плями контакту;
 h – глибина проникнення; r – радіус нерівності у вигляді сферичного сегмента

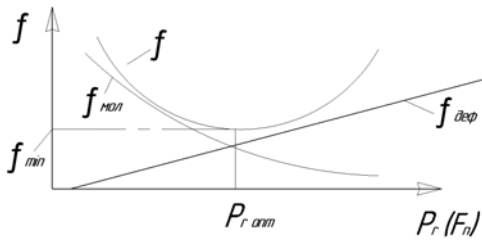


Рис. 4.5. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження

Нормальне навантаження на таку нерівність складає:

$$F_n = \frac{\pi a_k^2 \sigma_n}{2}, \quad (4.9)$$

де σ_n – нормальне напруження (перпендикулярне до напрямку руху).

Тоді за умови, що $\sigma_n \approx \sigma_T$, отримаємо *деформаційну складову коефіцієнта тертя*:

$$f_{def.} = \frac{F_{mp.def.}}{F_n} = \frac{2h}{\pi a_k}, \quad (4.10)$$

або з обліком, що радіус сегмента дорівнює:

$$a_k = \sqrt{2hr}, \quad (4.11)$$

отримаємо остаточно

$$f = k \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (4.12)$$

де $k = 0,55\alpha$ – при пластичному контакті; $k = 0,19\alpha$ – при пружному контакті (α – коефіцієнт гістерезисних втрат матеріалу).

Загальний коефіцієнт тертя для одиничної нерівності буде мати вигляд:

$$f = f_{\text{мол.}} + f_{\text{деф.}} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k\sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (4.13)$$

де τ_0 – питома зсувна міцність молекулярного зв'язку; p_r – тиск на площі фактичного контакту; β – коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під впливом нормальних стискаючих напружень (п'єзокоефіцієнт); h – глибина проникнення нерівності; r – радіус нерівності.

З виразу (4.13) виходить, що зі збільшенням навантаження зростає фактичний тиск p_r при пружному контакті й, отже, зменшується молекулярна складова коефіцієнта тертя (перші два доданки). Одночасно збільшується проникнення до нерівності, внаслідок чого збільшується деформаційна складова коефіцієнта тертя. У загальному випадку f проходить через мінімум і існує деяке оптимальне значення тиску $p_{r \text{ опт.}}$, відповідне до цього мінімуму (рис. 4.5).

Зменшення R_z приводить до росту A_r і збільшенню $f_{\text{мол.}}$. Збільшення висоти виступів і, як наслідок, зменшення радіуса закруглення їх вершин приводить до росту деформаційної складової сили тертя.

При збільшенні температури, з одного боку, зменшується міцність молекулярних (адгезійних) зв'язків, але, з іншого боку, збільшується пластичність контакту й, отже, його площа. Тому коефіцієнт тертя f збільшується.

Температура в зоні контакту суттєво залежить від швидкості ковзання v . У загальному випадку залежність коефіцієнта тертя від швидкості проходить через максимум, положення якого залежить від тиску p_r на контакті. Наявність максимуму пояснюється гістерезисними втратами, що виникають у деформованому матеріалі при терті.

Оскільки фрикційний контакт неоднорідний і дискретний, то сила тертя для реальних тіл являє собою суму елементарних сил тертя, що виникають на окремих ділянках дотику.

При переході від одного виду навантаження фрикційного зв'язку до іншого коефіцієнт тертя зазвичай змінюється. При розрахунках коефіцієнту тертя f необхідно враховувати вид контакту: пружний, пластичний (ненасичений або насичений) або пружнопластичний.

Пружний контакт має місце в трибосполученні, коли навантаження, що діє, і сила молекулярної взаємодії не приводять до виникнення в

поверхневих шарах матеріалів деталей напруження, що перевищує границю текучості матеріалу.

Пластичний контакт характеризується контактними напруженнями, що перевищують межу текучості матеріалу, що приводить до проникнення одиничних нерівностей у поверхню, що має меншу твердість.

По числу контактуючих нерівностей розрізняють насичений і ненасичений контакт.

Насиченим називають контакт двох шорстких поверхонь, при якому число контактуючих нерівностей дорівнює числу нерівностей, розташованих на контурній площі дотику. Насичений контакт характерний для умов ковзання шорсткої поверхні більшої твердості по рівній поверхні матеріалу, що має меншу шорсткість та меншу твердість.

Ненасичений контакт виникає, коли число контактуючих нерівностей менше числа нерівностей, розташованих на контурній площі дотику. Він виникає при терті тіл, твердість яких різниться незначно. Переважна більшість трибосполучень машин працює при пружнопластичних деформаціях і в умовах пластичного ненасиченого або насиченого контакту.

Для пластичного контакту приблизне значення коефіцієнта тертя визначають за умови $p_r \approx HB$:

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,5\alpha\sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (4.14)$$

В інженерних розрахунках при визначенні коефіцієнта тертя деталей, що працюють в умовах пластичного ненасиченого контакту, використовують формулу:

$$f = \frac{\tau_n}{HB} + 0,44\Delta^{1/2} \left(\frac{2p_c}{HB} \right)^{1/4}, \quad (4.15)$$

де τ_n – напруження дотику, що виникають у поверхневих шарах матеріалу в результаті молекулярної взаємодії; p_c – контурний тиск; Δ – комплексна характеристика шорсткості поверхні:

$$\Delta = R_{\max} / (rb^{1/\gamma}). \quad (4.16)$$

Перший доданок формули (4.15) характеризує молекулярну складову, а другий доданок – деформаційну складову коефіцієнта тертя.

Коефіцієнт тертя деталей, що працюють в умовах насиченого пластичного контакту дорівнює:

$$f = \frac{\tau_n}{HB} + 0,76 \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{1/2} \left(\frac{P_c}{HB} \right)^{1/2}. \quad (4.17)$$

Для наближеного розрахунку коефіцієнта зовнішнього тертя тяжко напружених трибосполучень, що працюють в умовах пластичного контакту, може бути використаний вираз:

$$f = \frac{0,65 \left[10 + \lg \left(60 \cdot 10^4 \left(R_z / E_{\text{пр}} \right) \rho_{\text{пр}} \right) \right]}{\mu^{0,07} v_{\Sigma}^{0,12} v_{\text{ск}}^{0,2}}, \quad (4.18)$$

де $\rho_{\text{ин}}$ – наведений радіус кривизни поверхні; $E_{\text{пр}}$ – наведений модуль пружності; μ – кінематична в'язкість змащення при 50°C ; v_{Σ} – сумарна швидкість кочення ($v_{\Sigma} = v_1 + v_2$); $v_{\text{просл}}$ – швидкість відносного прослизання поверхонь тертя.

4.3. Тертя при граничному змащенні

При граничному змащенні поверхня сполучених тіл розділена шаром мастильного матеріалу досить малої товщини (від товщини однієї молекули до $0,1 \text{ мкм}$). Ця плівка досить міцно пов'язана з металеву підкладкою силами молекулярної взаємодії й тому втрачає властивості, властиві рідині у великому об'ємі, де частки рідини можуть вільно переміщатися відносно один одного; опір руху рідини визначається внутрішнім тертям.

Наявність граничного шару (плівки) знижує сили тертя в порівнянні з тертям без змащення в $2 \dots 10$ разів, зменшує зношування сполучених поверхонь у сотні раз. Усі оливи здатні адсорбуватися на металевій поверхні. Завдяки рухливості молекул мастильного матеріалу на поверхні тертя адсорбція протікає з великою швидкістю, що надає мастильний плівці властивість «самозаліковуватися» у місцях її ушкодження.

Ефективність застосування мастил, крім фактору адсорбції, залежить від хімічної взаємодії металу й мастильного матеріалу. Жирні кислоти, що входять у якість присадок до оливи, вступають у реакцію з металом, утворюють миля, здатні витримувати без пошкодження значні деформації. Молекули мастильного матеріалу звичайно орієнтуються перпендикулярно до твердої поверхні, у вигляді «ворсу» (рис. 4.6).

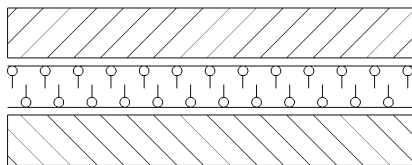


Рис. 4.6. Схема ідеального граничного шару

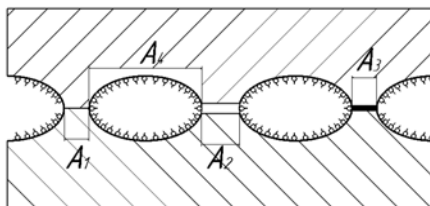


Рис. 4.7. Схема реального граничного шару:

A_1 – металевий контакт; A_2 – мономолекулярний шар;
 A_3 – контакт окислів; A_4 – полімолекулярний шар

Між полярними групами *COOH* можуть виникнути додаткові зв'язки, які зміцнюють граничний шар. Слідом за першим моношаром формується другий, третій і т.д., до 20...50 шарів.

Досить слабкий зв'язок між молекул суміжних шарів визначає легке ковзання при граничному терті між плівками, що належать твердим тілам. При взаємному переміщенні поверхонь тертя «ворсинки» як би звиваються в протилежні сторони. Мазильний матеріал у граничному шарі анізотропний, у тангенціальному напрямку молекулярні шари легко вигинаються і зісковзують один з одного; по нормалі до твердої поверхні плівка має високий опір стисканню.

Механізм тертя при граничному змащенні представляється в наступному виді. Під навантаженням відбувається пружна й пластична деформації на поверхнях контакту, на яких може реалізовуватися взаємне проникнення поверхонь без порушення цілісності мазильної плівки. Опір руху при ковзанні складається з опору зрушення граничного шару й опору «проорюванню» поверхонь об'ємами, що проникли. Крім того, на поверхні контакту A_1 може відбутися тимчасове пошкодження мазильної плівки й навіть схоплювання металів на мікрошорсткостях (рис. 4.7). Це буде викликати додатковий опір руху. Надалі, завдяки адсорбції, такі металеві ділянки знову покриваються мазильним шаром, тобто «заліковуються», і т.д.

Сила тертя і коефіцієнт тертя при граничному змащенні залежать від ряду факторів. Міцність плівки залежить від молекулярних властивостей граничної плівки, властивостей контактуючих поверхонь і від температури. Найбільш чутливий до коливань температури параметр $f_{\text{мол}}$. Зі зменшенням температури величина $f_{\text{мол}}$ зменшується. При збільшенні шорсткості коефіцієнт тертя переходить через мінімум, до того ж, чим тонше плівка змащення, тим вплив цього параметру виражається більш чітко (рис. 4.8).

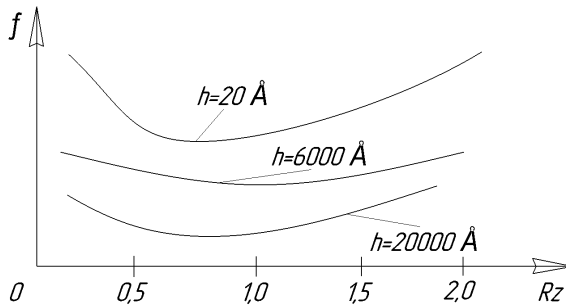


Рис. 4.8. Вплив R_z на величину коефіцієнта тертя

Чим менше радіус хвилястості, тим тонше плівка мастильного матеріалу, що перебуває на вершинах хвиль (рис. 4.9, *а*). При збільшенні радіуса хвилястості в терті беруть участь усе більш товсті плівки (рис. 4.9, *б*), що відповідно знижує коефіцієнт тертя. При граничному терті ковзання мінімальному тертю відповідає оптимальна шорсткість порядку $R_z = 0,1 \text{ мкм}$.

Вплив швидкостей ковзання на коефіцієнт тертя зображений на рис. 4.10 і 4.11. При збільшенні навантаження коефіцієнт тертя зменшується. При збільшенні навантаження товщина плівки мастильного матеріалу зменшується. Оскільки тонкі шари змащення мають більший опір на зрушення, сила тертя збільшується, однак повільніше, ніж росте навантаження (рис. 4.12). Починаючи із точки *В*, стоншення плівки припиняється. На ділянці *AB* є досить товстий шар змащення, внаслідок чого в цьому шарі молекули рідини не зв'язані так міцно із твердим тілом.

Іноді спостерігається ріст коефіцієнту тертя при збільшенні навантаження, оскільки граничне тертя в окремих точках фактичного контакту переходить у сухе тертя. Коефіцієнт тертя падає в міру наближення до точки плавлення змащення і різко зростає при переході до змащення з низькою в'язкістю η (рис. 4.13).

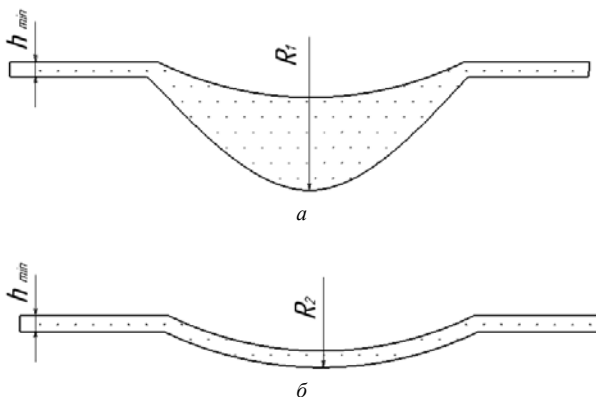


Рис. 4.9. Вплив радіуса хвилястості на товщину плівки мастильного матеріалу ($R_1 < R_2$): *a* – тонка плівка; *б* – товста плівка

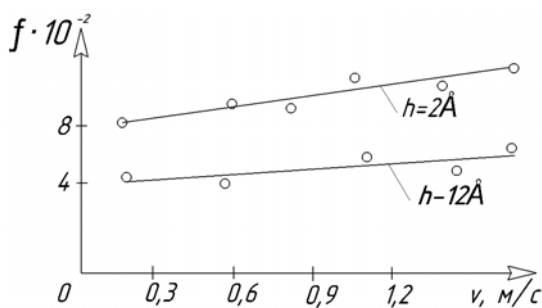


Рис. 4.10. Вплив низьких швидкостей ковзання на коефіцієнт тертя:
 h – товщина межового шару

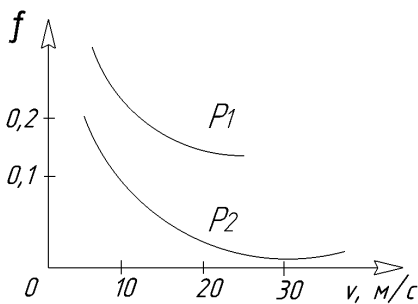


Рис. 4.11. Вплив підвищених швидкостей і тиску на коефіцієнт тертя ($p_1 > p_2$)

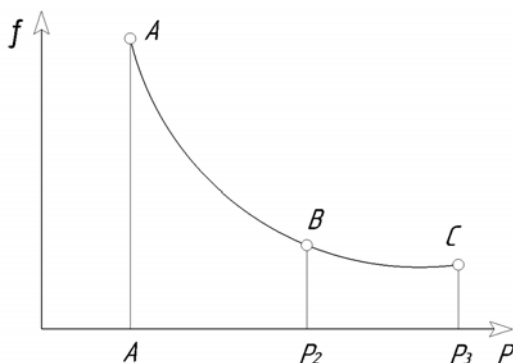


Рис. 4.12. Вплив тиску на величину коефіцієнта тертя

Позитивний градієнт механічних властивостей поверхневого шару можна забезпечити за рахунок зниження міцності поверхневого шару самих твердих тіл в умовах дії середовищ, що містять ПАР (ефект Ребіндера).

Застосування ПАР є особливо перспективним в комбінації з хімічними компонентами, що усувають вплив кисню з повітря або змащення. Оксидні плівки на метали знижують ефективність дії ПАР. В основі ефекту Ребіндера лежить фізична, а не хімічна адсорбція. Тому ефект зменшується з підвищенням температури, що пов'язано з переходом від фізичної адсорбції до хімічної. Додавка хімічно активних присадок у оливи сприяє протіканню фізичної адсорбції й зменшенню хімічної.

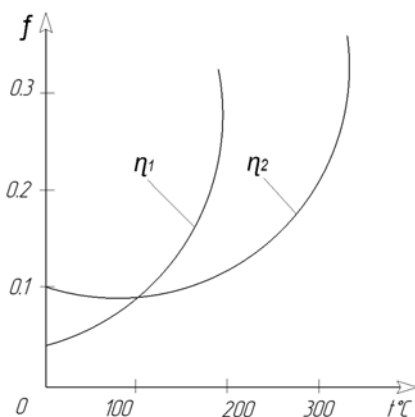


Рис. 4.13. Вплив температури на коефіцієнт тертя ($\eta_1 < \eta_2$)

4.3. Рідинне тертя

Мастильні матеріали в сукупності з деталями трибосполучення, формують трибосистему, що складається з двох деталей і «третього тіла» – мастильного матеріалу. Оптимально підібрані мастильні матеріали дозволяють у десятки й сотні разів знизити інтенсивність трибологічних процесів у вузлах тертя машин.

Від кількості мастильного матеріалу, що надходить у зону контакту твердих тіл, залежить виникнення різних видів змащення. Залежність між коефіцієнтом тертя f у підшипнику й числом Зоммерфельда показує діаграми Герсі – Штрибека (рис. 4.14). Число Зоммерфельда може бути знайдене за формулою

$$S_o = \frac{p\psi^2}{\eta\omega}, \quad (4.19)$$

де p – середній тиск у підшипнику; $\psi = (d_{\text{вн.}} - d_{\text{в.}}) / d_{\text{в.}}$ – відносний проміжок у підшипнику; $d_{\text{вн.}}$ і $d_{\text{в.}}$ – діаметр отвору у втулці й валу під підшипником; η – коефіцієнт динамічної в'язкості оливи; ω – кутова швидкість обертання валу.

У зоні змащення $A - B$ має місце граничне тертя, у зоні $B - C$ – рідинне тертя. Рідинне змащення забезпечує стійкий режим роботи сполучення. Деяке підвищення коефіцієнта тертя f у зоні правіше точки B пов'язане з підвищенням товщини шару змащення. Граничне змащення є нестійкою фазою. Збільшення коефіцієнта тертя на ділянці $B - A$ пов'язане зі зниженням частоти обертання валу. Це приводить до зменшення товщини оливної плівки й, відповідно, підвищення середнього тиску p , у результаті чого погіршуються умови роботи сполучення (насамперед через схоплювання поверхонь на мікровиступах).

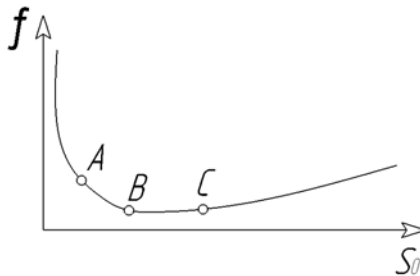


Рис. 4.14. Діаграма Герсі – Штрибека

При реалізації рідинного тертя забезпечуються мінімальні значення коефіцієнта тертя й зниження інтенсивності зношування матеріалів. Примусове прокачування оливи через вузол тертя з наступним його очищенням у фільтруючих елементах крім *відводу тепла* вирішує важливе технічне завдання – видалення із зони контакту трибосполучень продуктів зношування. З ростом температури масло втрачає свої експлуатаційні властивості – знижується коефіцієнт динамічної в'язкості η , а виходить, і товщина гідродинамічної плівки, що розділяє сполучені поверхні.

Змащення забезпечує захист сполучених деталей від корозії. Захисні властивості оливи обумовлені двома основним факторами: механічною ізоляцією поверхні металів від атмосферного впливу й гальмуванням електрохімічних процесів корозії на поверхні металів.

І, нарешті, змащення поліпшує динамічні й акустичні характеристики трибосполучення, тому що володіючи одночасно пружними й в'язкими властивостями, допомагає згладжувати динамічні навантаження й знижує шум у процесі експлуатації механізму.

При рідинному терті поверхні розділені шаром змащення h_{min} , який сприймає прикладене нормальне навантаження (рис. 4.15). Для рідинного тертя $h_{min} > (R_{z1} + R_{z2})$ робочий проміжок повинен бути $h_{роб.} = h_{min} / (R_{a1} + R_{a2})$. Практикою вироблений наступний критерій для рідинного тертя: $5 \leq h_{роб.} \leq 100$. Поділ поверхонь тертя шаром рідини (оливи) досягається такими способами: а) гідростатичним шляхом – примусовим прокачуванням оливи в проміжок під тиском; б) за допомогою гідродинамічного ефекту.

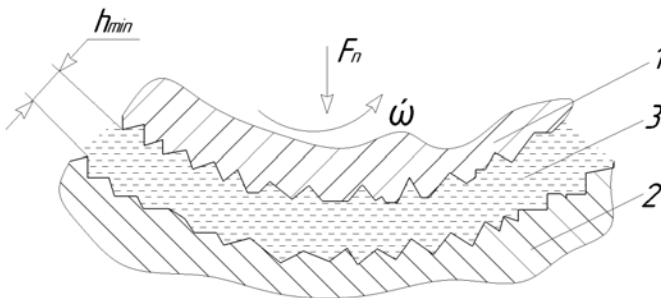


Рис. 4.15. Схема трибосполучення з рідинним змащенням:
1 – вал; 2 – підшипник; 3 – шар змащення

Наприклад, у гідростатичному під'ятнику (рис. 4.16) рідинне тертя в якому здійснюється за рахунок оливи, що подається в проміжок між п'ятою 1 і під'ятником 2 спеціальним насосом високого тиску. Тиск у проміжку

підтримується увесь час постійним, зазвичай не нижче $15...20 \text{ МПа}$. Для цих цілей встановлюється спеціальне ущільнення 3 і пристрій для підтримки заданого тиску. У цьому випадку вал 4 як би спливає, а п'ята 1, оточена з усіх боків шаром оливи високого тиску, буде відчувати рідинне тертя при повороті валу. Однак гідростатичні підп'ятники й підшипники мають дуже істотні недоліки, що обмежують їхнє застосування: необхідна наявність спеціальних ущільнювальних пристроїв, спеціальних насосних станцій, а при помірних і високих швидкостях обертання валу – спеціальної системи охолодження вузла тертя та ін.

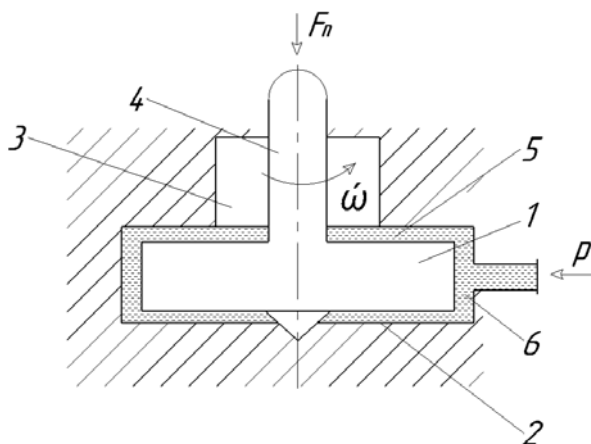


Рис. 4.16. Схема гідростатичного підп'ятника:
1 – п'ята; 2 – підп'ятник; 3 – спеціальний ущільнювальний пристрій;
4 – вал; 5 – шар рідини високого тиску; 6 – система подачі оливи

На практиці використовується в основному гідродинамічний ефект, що виникає внаслідок затягування в проміжок, що звужується, оливи під впливом тертя об рухомі стінки, валу й підшипника. Усередині оливного клину виникає додатковий тиск, здатний зрівноважити плаваючий вал. Рівняння несучої здатності гідродинамічного грузолого шару має вигляд:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta v \frac{h - h_0}{h^3}, \quad (4.20)$$

де $h_0 \approx h_{min}$ і h – проміжки між деталями.

Більшість деталей мають криволінійні поверхні тертя, тому в них відносно просто реалізується ефект гідродинамічного рідинного тертя, як показано на прикладі підшипника ковзання (рис. 4.17). Вал діаметром d обертається з кутовою швидкістю ω . При деякій критичній швидкості $\omega_{кр}$ між поверхнею валу і втулки утворюється безперервний мастильний шар, що відокремлює ці поверхні друг від друга. Центр валу займає положення O_2 , внаслідок чого утворюється клиноподібний проміжок. У перетині площини, що проходить через лінію центрів $O_1 O_2$, мастильний шар має мінімальну товщину h_{min} , величина якого повинна задовольняти нерівності:

$$h_{min} \geq K(Rz_1 + Rz_2), \quad (4.21)$$

де $K = 1, 2 \dots 1,3$ – коефіцієнт запасу.

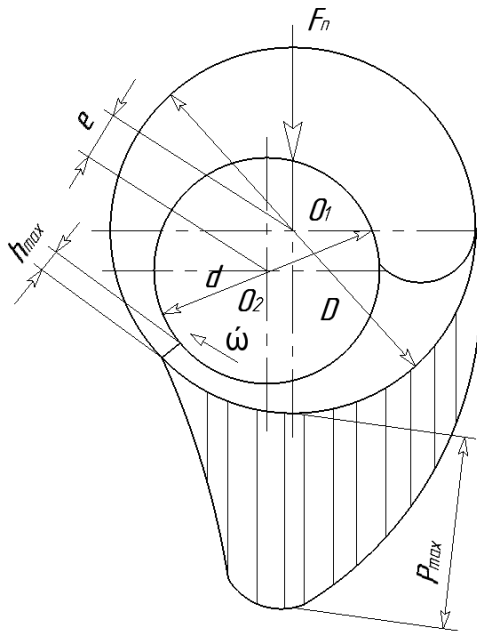


Рис. 4.17. Схема підшипника ковзання

Максимальний тиск p_{max} зміщений від осі $O_1 O_2$ убік, протилежно обертанню валу. Робота, затрачувана на подолання опору в'язкої рідини, переходить у теплову енергію, яка йде на нагрівання оливи і деталей підшипника.

Геометрія мастильного шару й положення валу у втулці підшипника визначаються двома безрозмірними параметрами: ψ – відносним проміжком і χ – відносним ексцентриситетом:

$$\psi = \frac{D-d}{d} = \frac{R-r}{r} = \frac{\delta}{r}; \quad (4.22)$$

$$\chi = \frac{e}{\delta}, \quad (4.23)$$

де $\delta = R - r$; e – абсолютний ексцентриситет.

Коефіцієнт тертя для підшипників ковзання f визначають на основі закону в'язкої течії рідини

$$A = \pi dL, \quad (4.24)$$

$$(dv / dy) \approx v / \delta = r\omega / r\psi = \omega / \psi. \quad (4.25)$$

Сила тертя $F_{тер.}$ дорівнює:

$$F_{тер.} = \eta A \frac{dv}{dy} = \eta \pi dL \frac{\omega}{\psi}. \quad (4.26)$$

Звідси коефіцієнт тертя дорівнює:

$$f = \frac{F_{тер.}}{F_n} = \frac{\eta \pi dL \omega}{pdL\psi} = \frac{\pi}{\psi} \frac{\eta \omega}{p}. \quad (4.27)$$

Гідродинамічна теорія змащення припускає, що деталі пари тертя являють собою абсолютно тверді тіла, що не деформуються, а в'язкість мастильного матеріалу є постійною величиною, яка не залежить від тиску і температури. Ця теорія дозволяє розрахувати несучу здатність мастильного контакту та товщину мастильної плівки при відносно малих контактних тисках у вузлах тертя (до 50 МПа). При більш високих тисках ($p > 300 \text{ МПа}$) на стан мастильного шару починають проявляти все більший вплив пружні властивості твердих тіл і теплові процеси, що розвиваються в мастильному матеріалі. Ці явища враховуються контактної – гідродинамічною теорією змащення.

Контактно – гідродинамічна теорія змащення описує стан мастильного шару в умовах високих контактних напружень, що властиві зубчастим передачам, підшипникам кочення, кулачковим механізмам та ін.

Гідродинамічні підшипники застосовують у шпиндельних вузлах верстатів, коли змінюється частота обертання (шліфувальні, спеціальні). У верстатах особливо високої точності застосовують аеростатичні підшипники, де потрібно забезпечити високу точність обертання і незначне тепловиділення. Переваги газового змащення: низький опір тертю, доступність мастильного матеріалу (повітря), відсутність забруднення поверхні підшипника, можливість застосування в широкому діапазоні температур (від низьких від'ємних до високих додатних). Недоліки газодинамічного змащення: низька несуча здатність, оскільки тиск у газодинамічних підшипниках приблизно в 100 разів нижче, ніж при гідродинамічному змащенні; низька стабільність роботи; високі вимоги до точності виготовлення й шорсткості поверхні підшипників.

4.5. Роль температури при терті

Пошкодження мастильної плівки в контактї приводить до миттєвого підвищення температури на кілька сотень градусів з наступною задиркою і виходом вузла з ладу. З ростом температури знижується міцність поверхневих шарів:

$$H_{n.ш.} = H_0 \exp \left[-\beta \frac{\theta}{\theta_{пл.}} \right], \quad (4.28)$$

де $H_{n.ш.}$ – мікротвердість поверхневого шару матеріалу при температурі θ ; H_0 – мікротвердість поверхневого шару матеріалу при температурі 20 °С; $\theta_{пл.}$ – температура плавлення тіла; β – коефіцієнт, що відрізняє даний матеріал від інших.

Термопружні напруження $\sigma_{mn.}$ на поверхні контакту криволінійних тіл з однакових матеріалів при терті:

$$\sigma_{mn.} = \sigma_n + \frac{0,3}{\pi} f F_n v \frac{E}{1 - \mu} \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (4.29)$$

де σ_n – максимальне напруження Герца для нерухливого контакту; f – коефіцієнт тертя; F_n – навантаження; v – швидкість ковзання; E , μ – модуль

пружності і коефіцієнт Пуассона; α , λ – коефіцієнти температуро – і теплопровідності матеріалів.

Величина термopужних напружень порівнянна з величиною σ_n .

Підвищення температури з 50 до 100 °C приводить до зменшення товщини гідродинамічної плівки у 8 разів. При граничному терті при температурі тіла, що перевищує критичну температуру мастильного матеріалу $T > T_{кр}$, відбувається пошкодження граничних плівок змащення і різке зростання коефіцієнту тертя й зношування матеріалів.

Сумарна температура на фактичній плямі контакту T_{Σ} дорівнює сумі середньої поверхневої температури T_n і температури спалаху T_{cn} :

$$T_{\Sigma} = T_n + T_{cn}. \quad (4.30)$$

Температура T_{cn} для круглої ділянки контакту радіусом r_{ϕ} :

$$T_{cn} = \frac{9}{32} \frac{f F_n v}{(\lambda_1 + \lambda_2) r_{\phi}}. \quad (4.31)$$

Для найбільш загального випадку контакту тіл, що котяться, наприклад, зубчастих передач, T_{cn} дорівнює:

$$T_{cn} = \frac{0,83 f F_n (v_1 - v_2)}{(\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1 v_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2 v_2}) l \sqrt{a}}, \quad (4.32)$$

де F_n – нормальне навантаження в контактi; $v_{1,2}$ – окружні швидкості тіл; $\lambda_{1,2}$, $C_{1,2}$, $\rho_{1,2}$ – теплопровідність, теплоємність і щільність тіл 1 і 2; a – півширина площі контакту; l – довжина ділянки контакту.

5. ПРОЦЕСИ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

5.1. Загальні відомості

Зношування деталей і вузлів тертя приводить до погіршення функціональних показників верстату і, як правило, регламентує його ресурс. У результаті зношування порушується кінематична точність механізмів, знижується продуктивність, зменшується міцність деталей, збільшуються витрати на ремонт, витрати енергії на виробництво продукції, з'являються додаткові навантаження, вібрація, шум.

Кількісно зношування характеризується *швидкістю зношування* γ – відношенням значення зношування Δh до інтервалу часу t , протягом якого виникає зношування, або *інтенсивністю зношування* I – відношенням зношування Δh до обумовленого шляху L , на якому відбувалося зношування, або до об'єму виконаної роботи. Розрізняють миттєву (у певний момент часу) і середню швидкість зношування (за певний інтервал часу).

Під *зносостійкістю* розуміють властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, оцінювану величиною, зворотною швидкості або інтенсивності зношування.

Значення зносостійкості на практиці коливаються в широких межах $103...1013$. Встановлено десять класів зносостійкості виробів (табл. 5.1) – від 3 до 12 відповідно до показника ступеня.

Наприклад, напрямні токарного верстата відносяться до $10...9$ класів зносостійкості, підшипники ковзання до $8...5$ класів, різці – до 8-го класу.

Таблиця 5.1

Класи зносостійкості

Клас	Зносостійкість	Клас	Зносостійкість
3	103...104	8	108...109
4	104...105	9	109...1010
5	105...106	10	1010...1011
6	106...107	11	1011...1012
7	107...108	12	1012...1013

За характером дії на поверхню тертя й процесів, що відбуваються на ній, при експлуатації машин розрізняють два види зношування:

механічне зношування – абразивне; гідроабразивне (газоабразивне); гідроерозійне (газоерозійне); кавітаційне; втомне; зношування при фретінгу; зношування при заїданні;

корозійно – механічне – окисне; зношування при фретінг – корозії; електроерозійне.

Механічне зношування є результатом механічного впливу, на відміну від корозійно – механічного зношування, при якому механічна дія супроводжується хімічною і (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем.

Абразивне зношування відбувається зазвичай в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих часток. Такими частками можуть бути мікрочастинки більш твердої сполученої поверхні, тверді частки ґрунту, оброблюваної породи, металевої стружки, окисної плівки, піску та ін., що потрапили у контакт сполучених деталей. Тверді частки можуть перебувати в закріпленому або вільному стані.

Гідроабразивне (газоабразивне) зношування відбувається в результаті дії твердих часток, що захоплюються потоком рідини.

Гідроерозійне (газоерозійне) зношування поверхні тіла відбувається під впливом потоку рідкого або газового середовища.

Втомне зношування є результатом втомного пошкодження при повторному деформуванні мікрооб'єктів матеріалу поверхневого шару. Цей процес має схований латентний період, внаслідок якого відбувається нагромадження ушкоджень усередині матеріалу. Типовим представником такого зношування є пітінг, що виникає при терті кочення, наприклад, у кулькових і роликових підшипниках.

Кавітаційне зношування виникає при переміщенні потоку рідини відносно поверхні твердого тіла у випадку розриву суцільності цієї рідини, утвору каверн, заповнених газом (паром), і наступного схлипування каверн поблизу поверхні з великою швидкістю. При цьому ударні хвилі багаторазово впливають на ділянку поверхні й приводять до втомного пошкодження останньої.

Зношування при фретінгу має місце при малих багаторазових коливальних відносних переміщеннях сполучених деталей.

Зношування при захопленні (заїданні) виникає в результаті локального з'єднання двох твердих тіл внаслідок дії молекулярних сил, наступного глибокого виривання матеріалу з однієї поверхні й переносу його на іншу. Цей вид зношування має місце при сухому терті, при розриві оливої плівки, оголенні і взаємодії ювенільних поверхонь матеріалів. При ковзанні захоплення на локальних ділянках може поширюватися на більші площі контакту, викликаючи глибоке виривання матеріалу,

задирку і заїдання вузлів тертя. Останнє може завершитися припиненням відносного руху деталей.

При *окисному зношуванні* головну роль відіграють хімічні реакції матеріалу з киснем повітря або окисним середовищем і механічні властивості оксидних плівок, що утворилися на поверхні. Оксидні плівки в ряді випадків захищають метал і запобігають схоплюванню. При терті в умовах змащення металева поверхня окислюється киснем, розчиненим у маслі. Поступово руйнуючись, оксидні плівки стираються, а продукти зношування видаляються з оливою. Потім плівка утворюється знову. Таким чином, окисне зношування являє собою процес зношування безупинно поновлюваних оксидних плівок.

Зношування при фретінг – корозії зазнають контактуючі тіла при вібрації. У результаті вібраційного впливу відбувається втомне пошкодження поверхневих шарів матеріалу, вони окислюються, також відбувається абразивна дія на поверхню твердих продуктів окислення. На характер та інтенсивність цього виду зношування впливають одночасно механічні процеси деформування поверхонь і електрохімічні процеси взаємодії з навколишнім середовищем, що взаємно інтенсифікують один одного.

5.2. Закономірності зношування

При аналізі інтенсивності зношування I трибосолучення протягом життєвого циклу ($I = f(t)$ де di/dt – швидкість зношування; t – час (рис. 5.1)) можна виділити три характерні періоди роботи: припрацювання $0t_1$, зі зменшуваною швидкістю зношування, коли $tg\alpha_1 \sim tg\alpha_2$; нормальної роботи t_1t_2 з постійною швидкістю зношування; аварійного зношування t_2t_3 , що характеризується прискореним зношуванням.

Зношування під час припрацювання може досягати при невдалому виборі конструкції і технології обробки поверхонь елементів пари тертя до 30...50 % від граничного. Припрацювання є здебільшого корисним процесом, тому що відбувається утворення робочого поверхневого шару, найбільш пристосованого до умов експлуатації. У результаті припрацювання швидкість зношування зменшується в нормальні періоди роботи вузла тертя.

Динаміка зношування вузла тертя є відбиттям зворотного зв'язку між поточним значенням зношування Δ і миттєвою швидкістю зношування Δ' . Характер зв'язку цих параметрів залежить від конструктивного оформлення й знаходить своє відбиття в характері наростання зношування в процесі експлуатації вузлів тертя або робочого органу машини. Аналітично цей зв'язок виражається рівнянням динаміки зношування:

$$\Delta = \psi(t). \quad (5.1)$$

Є шість основних законів динаміки зношування (рис. 5.2). Найпростіший з них – лінійний (тип *I*); рівняння, що зв'язує зношування Δ із тривалістю t роботи деталі, має вигляд $\Delta = Kt$. При відомому граничному зношуванні Δ_3 конструктор у першому наближенні може оцінити термін служби деталі – елемента вузла тертя:

$$t_{\partial.} = \frac{\Delta_3}{K}. \quad (5.2)$$

Значно складніше оцінювати ресурс для інших нелінійних залежностей виду $\Delta = Kt^n$. Для цього базові залежності, на підставі яких отримують показники ступеня n , виявляються за результатами лабораторних модельних або натурних експериментів.

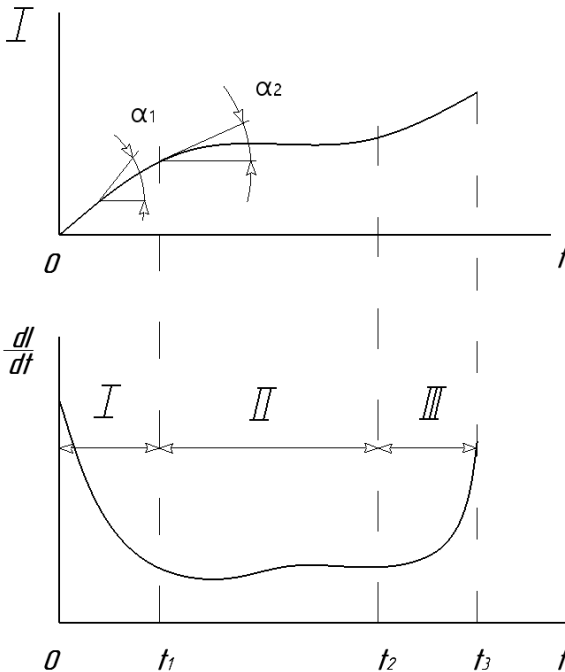


Рис. 5.1. Три характерні періоди експлуатації трибосполучення:

I – припрацювання; *II* – нормальний;
III – попередній відмові через аварійне зношування

Нелінійні закони динаміки зношування *II* і *III* типові для шарнірних з'єднань, підшипників ковзання, самозагострювальних інструментів. Якщо внаслідок збільшення проміжків суттєво виростають динамічні навантаження, то має місце прогресуюче збільшення швидкості зношування *IV*. До аналогічних результатів приводить недостатній захист контакту від влучення абразивних часток.

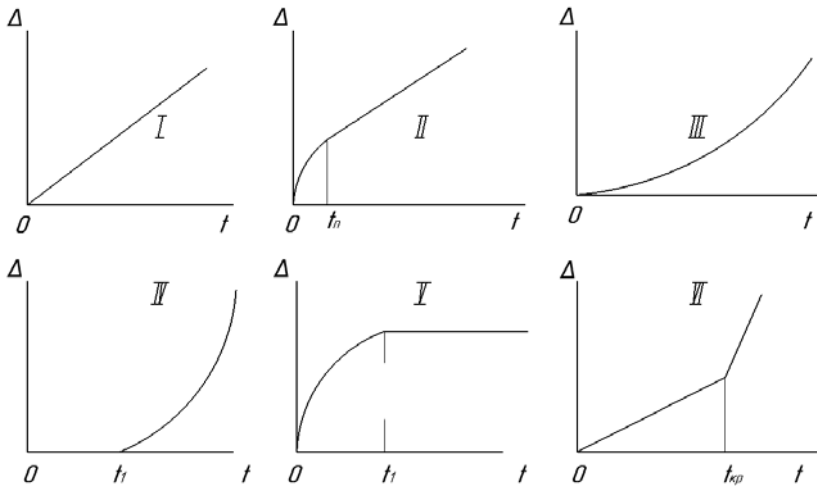


Рис. 5.2. Основні закони динаміки зношування: *I* – лінійний; *II* – період припрацювання й стаціонарне зношування (підшипники, шарніри); *III* – прогресуюче зношування (шарніри при збільшенні проміжку в шарнірі); *IV* – прогресуюче зношування в підшипнику, що збирається з натягом (характеризується наявністю схованого періоду $0t_1$); *V* – зношування після припрацювання ($0t_1$); *VI* – катастрофічне зношування після критичної точки $t_{кр}$. (зношування трибосполучення після деструкції мастильних матеріалів)

Зношування партії однотипних деталей в однакових машинах носить яскраво виражений випадковий характер, обумовлений імовірнісною природою контакту шорстких поверхонь, розкидом властивостей конструкційних і мастильних матеріалів, полем допусків на виготовлення, похибками монтажу, широким спектром експлуатаційних навантажень, швидкостей, умов роботи (флуктуації потужності машини, технологічних опорів, реакції ґрунту, рельєфу дороги та ін.).

Розподіл випадкової величини зношування в процесі зношування (як випадкового процесу) є асимптоматично нормальним. Імовірнісний

характер зношування описується щільністю ймовірності ресурсного показника $P(t)_{z=const}$ і щільністю ймовірності зношування $P(t)_{t=const}$ партії деталей (рис. 5.3). Великий розкид зношування однойменних деталей ускладнює вірогідність отримання детерміністичних моделей, що описують процеси зношування.

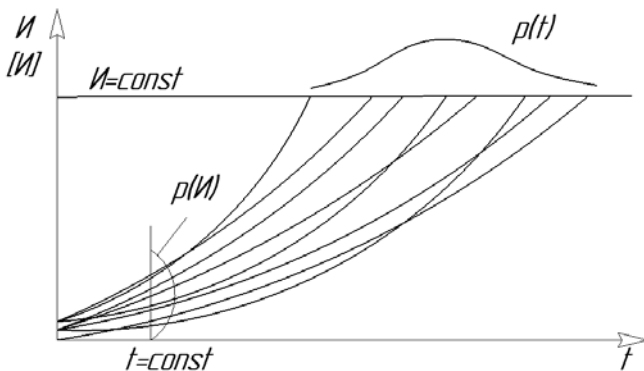


Рис. 5.3. Зміна зносостійкості N в часі t партії деталей

Природа зношування матеріалів залежить від полікристалічної будови матеріалів, масштабного фактору, реології матеріалу, зміни структури й властивостей поверхневих шарів у часі й по глибині від поверхні, ролі поверхні сполученої деталі, адгезійної взаємодії сполучених поверхонь, адсорбційно – хімічної взаємодії поверхонь із середовищем, утворення вторинних структур, наявності абразивних часток та інших механічних домішок в експлуатаційному середовищі, доданих різних силових дій (вібрації, вибухів, ударних навантажень та ін.).

5.3. Абразивне зношування

Основними видами абразивного зношування є:

- 1) зношування обумовлене нерухомо закріпленими твердими зернами, що входять у контакт по дотичній або під невеликим кутом атаки до поверхні деталі (наприклад, шаржування сторонніми твердими частками м'яких антифрикційних матеріалів);
- 2) зношування незакріпленими частками, що входять у контакт з поверхнею деталі (наприклад, насипні вантажі при їхньому транспортуванні різними пристроями, абразивні частки в ґрунті при роботі ґрунтообробних машин та ін.), зношування в абразивній масі;

- 3) зношування вільними частками в проміжку сполучених деталей;
- 4) зношування вільними абразивними частками, що захоплені потоком рідини або газу.

На протікання абразивного зношування впливають природа абразивних часток, агресивність середовища, властивості поверхонь, що зношуються, ударна взаємодія, нагрів та інші фактори. Абразивне зношування викликають пил, що потрапив на поверхню тертя, металева стружка, оксидні плівки, закріплені на поверхні тертя або зруйновані, нагар і продукти зношування, особливо частки твердих структурних складових.

Абразивні частки можуть мати різну форму й бути по – різному орієнтовані відносно сполученої поверхні. Здатність абразивного зерна вдавлюватися в поверхню залежить не тільки від співвідношення твердості, але й від геометричної форми зерна. Зерно опуклою поверхнею або гострим ребром може бути втиснене, навіть без ушкоджень, у плоску поверхню більш твердого тіла. Тому спостерігається зношування металу абразивними частками з меншої, ніж в нього, твердості.

Відділення часток зношування відбувається в результаті одноразової або переважно багаторазової дії абразивного тіла, тобто має місце або мікрорізання (в'язкого й крихкого характеру), або втома – малоциклічна (у пластичній області) і багатоциклічна (у пружній області).

Для багатьох металів твердість оксидних плівок вище твердості самих металів. Найбільшу твердість (9) за шкалою Мооса має оксид алюмінію Al_2O_3 , твердість самого алюмінію невисока (~2). Тому при терті алюмінію по сталі оксидні плівки, а також продукти пошкодження оксидних плівок алюмінію можуть викликати зношування навіть твердих сталей. Магній утворює дуже м'який оксид $Mg(OH)_2$, тому зношування магнієм більш твердих металів невелике навіть при сприятливих умовах утворення оксиду. Інтенсивність абразивного зношування збільшується у вологому і агресивному середовищі.

Абразивне зношування закріпленими частками. При входженні в контакт з металевою поверхнею по дотичній абразивні частки пружно деформують метал, залишаючись цілими або руйнуючись. Залежно від структури абразивного матеріалу й середовища частки можуть вдавлюватися в це середовище, повернутися або навіть вийти з зони контакту. Абразивна частка вдавлюється в метал деталі, якщо вона має більшу твердість. При русі відносно поверхні частка може подрпати риску або зрізати мікроостружок. Різання відбувається при певному відношенні глибини проникнення абразивної частки до радіусу округлення імплантованої кромки. При сферичній кромці частки для сталі $Ст3$ це відношення повинне бути більше 0,16.

Частота проникнення абразивних часток мала, а їх основна дія – дряпання з відтискуванням матеріалу в сторони. По шляху дряпання вільна частка може повернутися і припинити видавлювання матеріалу, дійти до твердої структурної складової сплаву, переступити через неї і знову почати дряпання. Її виступ може вирвати тверду складову, зламатися, частка може роздробитися. Якщо частка закріплена й повернутися не може, то в цьому випадку канавки будуть найбільш глибокими (0,001...0,02 мм) при невеликій довжині (0,05...0,5 мм). Дно канавки зазнає наклепу. Коли вся робоча поверхня зміцниться, опір проникненню підвищиться. Якщо проникнення повністю не виключається, то після багаторазової пластичної деформації настане крихкість матеріалу.

Якщо твердість абразивних часток значно перевищує твердість металу, то зношування не залежить від різниці твердості і швидко зменшується зі збільшенням цієї різниці. Якщо твердість металу перевищує 60 % твердості абразиву, зносостійкість різко зростає.

Зношування абразивними частками в проміжку пари тертя. Абразивні частки, що потрапили в проміжки пар тертя, під дією навантаження можуть залежно від умов упресовуватися в поверхні тертя, дробитися на більш дрібні фракції, ковзати або перекочуватися уздовж поверхні зношування, пружно й пластично деформуючи її. Сутність даного виду абразивного зношування полягає в ковзанні й проникненні твердих абразивних часток на поверхні контакту, що деформують, руйнують й зрізують мікрооб'єми металу в поверхневих шарах. Розвиток зношування пов'язаний зі зміною:

- 1) глибини та інтенсивності деформації мікрооб'ємів металу поверхневих шарів;
- 2) глибини проникнення абразивних часток у метал;
- 3) співвідношення між об'ємами металу в поверхневих шарах, що деформуються й руйнуються.

Зміна структури й властивостей поверхневих шарів при абразивному терті пов'язана з пластичною деформацією і зміцненням металу. Ці зміни вкрай нерівномірні як по поверхні тертя, так і в перетині поверхневих шарів.

Зі збільшенням концентрації і розміру абразивних часток, що попадають у проміжок тертьових сполучень, їх зношування збільшується. Особливу роль відіграє механічна міцність абразивних часток, тому що зношування важко навантажених сполучень пов'язане з їхнім інтенсивним дробленням. Чим міцніше абразивна частка, тим більше глибина її проникнення до пошкодження й пов'язане із цією глибиною проникнення зношування. Міцність часток збільшується зі зменшенням їх розміру внаслідок масштабного ефекту й зменшенням твердості поверхневих шарів

поверхонь, що сполучаються. Дроблення часток не спостерігається в контактї сталь – пластмаса, тому що частки майже повністю проникають в пластмасу. Наслідком інтенсивного дроблення абразивних часток у контактї зубчастих передач, підшипників кочення, важко навантажених шарнірних з'єднань є досить слабка залежність зношування від зовнішнього навантаження, тому що напруження в контактї визначаються механічною міцністю часток. В області невеликих тисків, а також у сполученнях сталь – пластмаса зношування значно підвищується зі збільшенням зовнішнього навантаження. В елементах пар тертя кочення (зубчастих, фрикційних передач, підшипників кочення) зношування лінійно збільшується з ростом проковзування. Інтенсивність зношування слабко залежить від швидкості обертання шарнірних з'єднань, підшипників кочення, тихохідних і середньошвидкісних зубчастих передач. Зі збільшенням твердості поверхневих шарів зменшується зношування даної деталі і деталі, що сполучається. Зносостійкість помітно підвищується в тому випадку, якщо твердість поверхонь, що зазнають дію абразиву, перевищує деяку критичну величину, що складає половину твердості матеріалу.

При проникненні абразивних часток у підшипники з м'яким антифрикційним шаром вони упресовуються в цей шар (шаржують його) і прискорюють зношування сполученого валу. Тому бронзові підшипники при мастильному матеріалі, що містить абразив, працюють гірше, ніж при бабіті. Формування сил тертя при абразивному зношуванні обумовлене процесом взаємодії абразивних часток і металу поверхневих шарів. Величина коефіцієнтів тертя перебуває в інтервалі $0,2...0,6$. Шорсткість поверхонь тертя може бути в межах $3...10$ класів чистоти. Бронзові підшипники, шаржовані абразивними частками, мають більш високий коефіцієнт тертя (на $20-30\%$ вище), більш тривалий період припрацювання (на $30 - 40\%$) і менше навантаження до заїдання (на $20-30\%$) у порівнянні з новими підшипниками.

Відносна зносостійкість чистих металів у ненаклепаному стані і сталей у відпаленому стані прямо пропорційна твердості матеріалу: $\varepsilon \sim HB$. Для термооброблених сталей характерна залежність

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + a(HB - HB_0), \quad (5.3)$$

де ε_0 – відносна зносостійкість сталі у відпаленому стані; a – коефіцієнт пропорційності; HB_0 – твердість сталі у відпаленому стані.

Процеси абразивного зношування залежать від форми й розмірів абразивних часток, можливості їх закріплення в матеріалі (шаржування поверхні), співвідношення твердості матеріалу H_m і абразиву H_a . При $K_m = H_m/H_a < 0,5$ можливо пряме пошкодження матеріалу; при $K_m > 0,7$

пряме одноактне пошкодження матеріалу малоімовірно і процес переходить у багаточисловий.

Стійкість абразивного зношування залежить також від состава і структури поверхневих шарів металів. Оптимальна зносостійкість структури досягається при високому опорі матеріалу стиску, зсуві, значній силі молекулярно – механічного зчеплення структурних складових, комбінації твердості і в'язкості при відсутності крихкості; високої теплопровідності; при невеликій відмінності температурних коефіцієнтів розширення фаз, високій насиченості й рівномірності мікророзподілу легуючих елементів, стійкості проти корозії. Отримання даного, часом суперечливого, комплексу властивостей неможливо в однофазовому матеріалі і здійснюється шляхом створення гетерогенних матеріалів.

Підвищенню зносостійкості сприяють: насичення поверхневих шарів елементами, що утворюють високотверді з'єднання карбідів, нітридів, боридів металів; здатність більш м'яких структур (наприклад, аустеніт) утримувати високотверді кристаліти в поверхневому шарі; здатність матеріалу зміцнюватися в процесі деформування при терті (наприклад, сталь *110Г13Л* аустенітного класу) та інші властивості матеріалів.

До числа найпоширеніших методів *підвищення стійкості до абразивного зношування металів і сплавів* відносяться: термічна обробка (гартування, як об'ємне, так і поверхневе; газополумєневим методом і за допомогою *СВЧ*); хімікотермічна обробка (цементация, азотування, нітроцементация, борування та ін.); пластичне деформування поверхневого шару (дробеструменева обробка, обкатування роликми, гідрополірування, використання енергії вибуху та ін.); наплавлення і напилювання зносостійких матеріалів на поверхню деталей; обробка поверхні променем лазера, потоком часток високої енергії (іонне легування, іонно – плазмове напилювання) та ін.

Потрапляння абразивних часток в область контакту деталей з мастильним матеріалом різко підвищує зношування. Зношування зростає зі збільшенням концентрації абразиву, його твердості, залежить від форми і розмірів часток. Матеріалознавські методи боротьби з таким зношуванням шляхом вибору й створення нових матеріалів, їх технологічного зміцнення помітно вичерпали себе. Суттєво більший ефект дають методи захисту від влучення абразиву в контакт: ущільнення, фільтри, відстійники та ін.

Через неоднозначний вплив твердості на інтенсивність зношування при різних видах силового впливу в якості критеріїв зносостійкості матеріалів застосовують комплексні показники, що враховують твердість, пластичність, втомні характеристики та енергоємність поверхневих шарів. Наприклад, з теорії втомного пошкодження поверхневого шару при зношуванні виходить:

$$I \sim \frac{1}{HB^\alpha \varepsilon_0^\beta}, \quad (5.4)$$

де HB – твердість; ε_0 – деформація при пошкодженні; α, β – показники, пов'язані з рельєфом і втомними властивостями матеріалів.

5.4. Гідроабразивне зношування

Залежно від властивостей матеріалів і кута атаки абразивними частками зношування може мати природу м'якого пошкодження, мікрорізання, пластичного відтискування, виникнення і зростання мікротріщин. *Інтенсивність зношування* залежить від кута атаки, швидкості потоку, концентрації, розміру, твердості абразивних часток, співвідношення твердості поверхні матеріалу та абразивних часток. Зі зменшенням кута атаки знижується величина ударного імпульсу, збільшується ймовірність проорювання й мікрорізання поверхні.

Підвищення твердості сталей в цілому сприятливо позначається на опорі зношуванню, однак одночасно підвищується небезпека м'якого пошкодження. Зносостійкість сталей збільшується при наявності карбідів у в'язкій структурі матриці матеріалу (сталь $X12$). Зносостійкість корозійно – стійких сталей $9X18H10T$, $40X13$, $12X18H10T$ підвищується зі збільшенням змісту вуглецю.

Гідроабразивна зносостійкість чавунів змінюється в широких межах. Найбільш зносостійкими є хромисті чавуни, карбідо – чавуни. При підвищенні твердості сплавів і наплавлених металів спостерігається збільшення зносостійкості з підвищенням твердості. Зношування твердих сплавів і мінеральних матеріалів залежить від кута атаки α , збільшуючись при $\alpha \rightarrow 90^\circ$. Полімерні матеріали слабо протистоять гідроабразивному зношуванню.

5.5. Кавітаційне зношування

Кавітаційне зношування відбувається в результаті багаторазової дії на поверхню гідравлічних ударів, що виникають при схлопуванні кавітаційних порожнин поблизу поверхні деталі. Кавітаційні порожнини (бульбашки) утворюються в гідродинамічному потоці внаслідок появи в ньому областей з тиском нижче тиску насиченого пару цієї рідини. Схлопування бульбашки відбувається при збільшенні зовнішнього тиску зі швидкістю звуку. Енергія, що вивільняється, акумулюється в поверхневих

шарах деталі та йде на деформування, зміну структури, появу й розвиток мікротріщин з наступним пошкодженням матеріалу. Високу зносостійкість при кавітаційному зношуванні мають сталі з аустенітної зміцнювальною структурою.

5.6. Зношування при схоплюванні

При насиченні контакту (збільшенні площі контакту) і повній адгезійній сумісності матеріалів адгезія досягає граничної величини. Під *адгезійною сумісністю для жорстко пластичного тіла* розуміють відношення міцності зрізу адгезійного з'єднання τ_k до константи пластичності матеріалу $k = \sigma_m/2$: $\eta_\tau = \tau_k/k$. При $\eta_\tau = 1$ настає повна адгезійна сумісність. По суті повна адгезійна сумісність, або схоплювання тертьових поверхонь, є твердофазним зварюванням.

При терті утворення міцного адгезійного зв'язку відбувається при певному навантаженні і температурі граничних шарів, що забезпечують пошкодження. Для такого утворення необхідно подолати деякий енергетичний бар'єр, тобто поверхні повинні мати достатню енергію активації. Адгезійне зношування наявне при відсутності мастильних плівок і поверхневих структур, що локалізують лінії пластичні течії в тонких поверхневих шарах. У цих випадках площини максимальних напружень поширюються в більш глибокі від поверхні контакту шари і суттєво збільшують об'єм деформованого матеріалу. Пошкодження матеріалу відбувається на значній глибині від поверхні, а частина матеріалу, що відділилася, налипає на поверхню сполученої деталі. Якщо зусилля зрушення досягає рівня сил, що рухаються, відносний рух деталей припиняється; відбувається задирка сполученої пари. Такий вид зношування є катастрофічним, що приводить до швидкого виходу з ладу вузла тертя.

Основним напрямком боротьби зі схоплюванням є локалізація пластичного деформування при терті в тонких прикордонних шарах. Це досягається застосуванням мастильних матеріалів з антизадирними присадками. Для зменшення ймовірності схоплювання пар тертя виконують наступне: добір матеріалів зі зниженою здатністю до схоплювання (антифрикційні сплави: бабіти, бронзи); використання легуючих елементів, що підвищують твердість матеріалів; хіміко – термічна обробка (цементація, азотування, сульфидування та ін.); нанесення плівок м'яких матеріалів (свинцю, олова); введення в сплави м'яких складових або матеріалів з шаруватою структурою (графіт, дисульфід молібдену); застосування антифрикційних полімерних покриттів;

насичення пористої металевої основи рідкими або пластичними мастильними матеріалами.

5.7. Зношування при втомному викрашуванні

Даний вид зношування характерний для вузлів тертя кочення з початковим точковим або лінійним контактом деталей: кулькових і роликів опор, пари колесо – рейка, зубчастих зачеплень, кулачкових механізмів. Зовні зношені поверхні мають вигляд кратерів з рваними краями і грубою поверхнею. Матеріал відшаровується по площі, що значно перевищує площу контакту. Втомне зношування (пітінг) зубчастих коліс, звичайно, виникає поблизу полюса зачеплення.

В опорах з локальним контактом напруження розподілені по площі контакту (еліпсу). Максимальні напруження розраховуються за формулою Герца

$$P_{\max} = 0,418 \sqrt{PE \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}, \quad (5.5)$$

де P – питоме навантаження; E – наведений модуль пружності; R_1, R_2 – радіуси кривизни дотичних тіл. Вони перебувають на глибині від поверхні $z < 0,8b$;

$$b = 1,52 \sqrt{\frac{P}{E} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}, \quad (5.6)$$

де b – півширина площі контакту.

Характер розподілу напружень у поверхневому шарі залежить від співвідношення дотичних T и нормальних P навантажень (рис. 5.4). У табл. 5.2 дані значення відносних максимальних тангенціальних напружень $\tau_{yz \max}/P_{\max}$ залежно від коефіцієнта тертя f_T на різній відстані від поверхні.

Таблиця 5.2

Залежність $\tau_{yz \max}/P_{\max}$ від коефіцієнта тертя f_T

z/b	$f = 0$	$f = 0,4$
0	0,2	0,4
0,2	0,21	0,38
0,5	0,25	0,41
0,7	0,24	0,38
1,0	0,2	0,33

При наявності дотичного навантаження T наприкінці площі контакту, з'являється зона розтягання, максимальні напруження в якій ростуть з ростом дотичного навантаження. Тому пошкодження пластичних і крихких тіл буде різним (рис. 5.4, б, в): для пластичних тіл – на глибині під поверхнею, для крихких – на поверхні. Висока контактна міцність крихких матеріалів під час відсутності дотичного навантаження різко знижується з її появою.

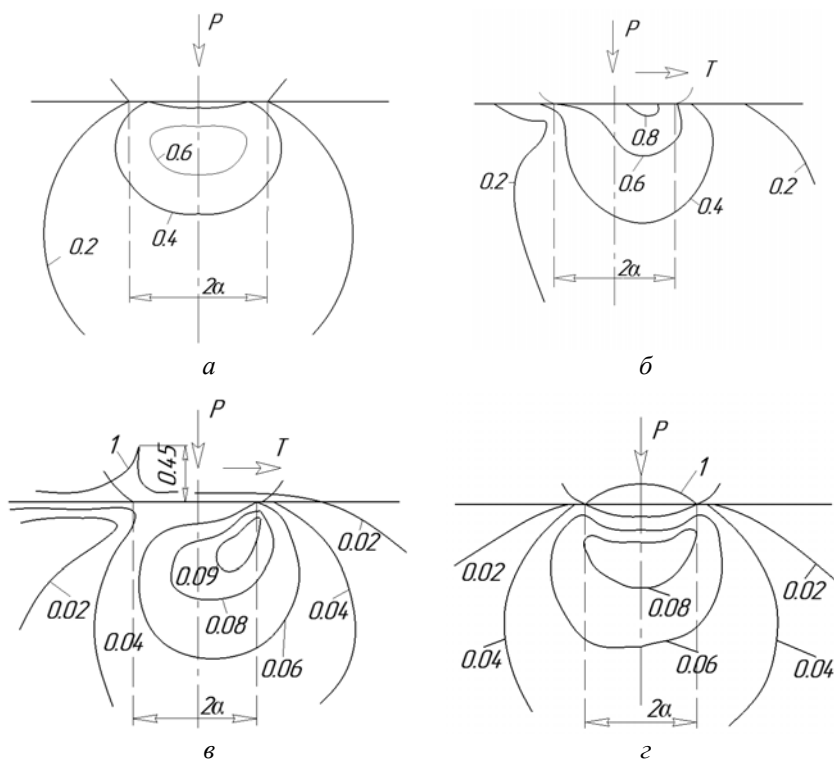


Рис. 5.4. Лінії рівних наведених напружень $\sigma_{нав.}/\sigma_{max}$ для пластичного (а, б) і крихкого (в, з) матеріалу:
 $a - f_T = 0$; $б - f_T = 0,4$; $в - f_T = 0,25$; $з - f_T = 0$; 1 – на поверхні

Критичне питоме навантаження при втомному багаторазовому деформуванні розраховується за формулою

$$P_{кр.} = 2,9 \frac{d_{нав.}}{E_{нав.}} \cdot \frac{\sigma_{-1}^2}{(\sigma_{нав.} / P_{max})} \xi^2, \quad (5.7)$$

де $d_{нав.}$ – наведений діаметр; σ_{-l} – межа втоми матеріалу; ξ – коефіцієнт зміцнення, пов'язаний з неоднорідністю напруженого стану; $\sigma_{нав.}$ – максимальне наведене напруження.

У табл. 5.3 наведені відносні максимальні значення напружень у випадку перекриття циліндрів, а в табл. 5.4 – основні фактори, що впливають на втомне зношування.

Таблиця 5.3

Залежності $\sigma_{нав}/P_{max}$ від коефіцієнта тертя f_T .

f	0	0,2	0,4
Напруження на поверхні	0,20	0,59	0,83
Глибинне напруження	0,54	0,57	0,61

Таблиця 5.4

Вплив різних факторів на зносостійкість матеріалів при втомному зношуванні

Фактор	Вид пошкодження		
	Втомне пошкодження при контакті		Мікрорізання
	пружному	пластичному	
1	2	3	4
Фізико–хімічний стан поверхні, температура	Впливає через пружно – міцнісні характеристики і коефіцієнт тертя	Впливає через пластичні та міцнісні характеристики і коефіцієнт тертя	Впливає через твердість
Коефіцієнт тертя	Впливає через температуру і величину діючих напружень $I \sim f^{t_y}$	Впливає через температуру і величину діючих деформацій $I \sim f^{t_n}$	Не впливає
Питоме навантаження	Впливає через температуру тертя, площу фактичного контакту і діючі напруження й деформації		$I \sim p$
	$I \sim p^{1+\beta t}$, де $\beta = (2\nu + 1)^{-1}$	$I \sim p^{1+\frac{t+1}{2\nu}}$	
Швидкість ковзання	Впливає через температуру і реологічні властивості матеріалів		
Модуль пружності і твердість	Впливає через площу фактичного контакту і діючі напруження		$I \sim (HB)^{-1}$
	$I \sim p^{-\beta t-1}$	$I \sim p(HB)^{-\frac{2\nu+1}{2\nu}}$	

Продовження табл. 5.4

1	2	3	4
Шорсткість поверхні	Впливає на величину площі фактичного контакту і вид пошкодження фрикційного зв'язку		
	$I \sim (h_{\max} / R)^{\frac{t(1-\beta)}{2}}$	$I \sim (h_{\max} / R)^{\frac{1+t}{2}}$	$I \sim tg\theta$
	R – радіус закруглення вершини мікроступу; β – кут нахилу мікроступу		
Коефіцієнт втоми	$I \sim (\sigma / \sigma_0)^{t_y}$, де $t_y \cong 3 \dots 14$	$I \sim (\varepsilon / \varepsilon_{kp})^{t_n}$, де $t_n \cong 1,5 \dots 3$	Не впливає

При втомному викрашуванні зміцнення повинен зазнати той шар матеріалу, у якому відбувається втомне пошкодження. Якщо зміцнюється шар тонший за глибину залягання максимальних напружень, то має місце пошкодження поверхні «панчохою», коли матеріал відшаровується на великій площі.

5.8. Корозійно – механічне зношування

При терті корозійні процеси прискорюються в тисячі разів. В умовах рухомих деформованих дискретних плям контакту сполучених поверхонь утворюються короткозамкнені гальванічні мікроелементи. Виступи мікронерівностей руйнують плівки, що пасивують, і тим самим прискорюють анодний процес. Механічне видалення крихких поверхневих плівок при терті приводить до регенерації хімічного потенціалу поверхні.

У ряді випадків частка матеріалу, що припадає на механічне пошкодження, суттєво зростає. Це відбувається у випадках міжкристалічної корозії й наступного викрашування кристалітів, вибіркового розчинення сплаву, зростання тріщин.

Методи боротьби з корозійно – механічним зношуванням у першу чергу спрямовані на призупинення електрохімічної корозії шляхом підвищення пасивувальності третьових матеріалів (застосуванням інгібіторів, використанням високолегованих сталей і сплавів, оптимізацією співвідношення площ поверхні контакту сполучених деталей).

Окислювальне зношування пов'язане з активацією окислювальних процесів поверхневих шарів третьових поверхонь за рахунок пластичної деформації, підвищеної температури, дії циклічних навантажень і наявності кисню в змащенні і навколишньому середовищі. При окислювальному зношуванні спочатку, коли плівки окислів тонкі (порядку часток

мікрометра) і еластичні, вони відіграють позитивну роль і охороняють поверхні від ушкоджень. Але при зростанні вони стають товстими, крихкими й руйнуються при навантаженнях, які спочатку легко витримували. Продукти зношування переміщуються з мастильним матеріалом. Тим часом окислювальний процес триває, плівки знову наростають і захищають від зношування основний матеріал. Таким чином, окислювальне зношування – це процес, при якому руйнується не матеріал деталі, що зношується, а його вторинні структури – оксиди, що утворюються в процесі тертя.

Самою агресивною формою окислювального зношування є фретінг – корозія (від англ. Fret – роз'їдати). Фретінг – корозія звичайно спостерігається в номінально нерухоливих з'єднаннях, на які діють вібрації. При фретінг – корозії циклічні мікропереміщення в контакт викликають локальні теплові флуктуації, багаторазове пластичне деформування, інтенсивне нагромадження дефектів структури, утворення мікро – і макротріщин, по яких у глибину від поверхонь дифундує кисень та інші активні компоненти середовища. Частки, що відділилися, абразивно впливають на поверхню. Характерні об'єкти подібного зношування – нарізні сполучення, посадки з запресовуванням кілець підшипників кочення, заклепувальні, болтові, клинові й штифтові з'єднання та інші деталі, що працюють у динамічно напружених умовах.

У розвитку фретінг – корозії виділяють три стадії. На першій стадії відбувається зміцнення сполучених поверхонь за рахунок пластичних деформацій у фрикційному контакті при коливальному русі і нагромадження втомних ушкоджень у матеріалі. На ряді ділянок пошкодження поверхневих захисних плівок приводить до місцевого схоплювання матеріалів. На другій стадії розвиваються окислювальні триботехнічні процеси, пошкодження і диспергування окислів. На третій стадії розвивається глибинне пошкодження матеріалу з різким зростанням швидкості зношування.

Інтенсивність зношування при фретінг – корозії збільшується з ростом навантаження, амплітуди коливань і частоти коливань, зі зростанням відносного проковзування. Об'ємна температура вузла тертя впливає суттєво.

Засіб боротьби із цим видом зношування містить у собі комплекс конструктивно – технологічних методів і методів, що пригнічують фізико – хімічні процеси, які протікають при фретінг – корозії. До перших відносяться: вибір раціональної конструкції, що забезпечує зниження місцевих концентрацій напружень і мікропереміщень у контакті, переніс відносного руху в проміжне середовище, застосування в якості проміжних шарів матеріалів, що демпфують. Друга група містить у собі засоби захисту

від контактної, електрохімічної корозії, запобігання схоплюванню шляхом застосування різноманітних матеріалів у сполученні, підвищення твердості контактуючих поверхонь.

5.9. Інші види зношування

Зношування внаслідок пластичної деформації. Цей вид зношування (зминання) полягає в зміні розмірів або форми деталі в результаті пластичної деформації її мікрооб'ємів. Зминання є характерним видом ушкодження шпонкових пазів і шпонок, шліцьових з'єднань, штифтів та упорів, нарізних сполучень і інших деталей. Воно викликається або надмірними напруженнями, що допускається, або випадковими значними перевантаженнями. Зминання характерне для деталей, що входять у контакт з ударом.

У тихохідних зубчастих передачах з колесами із сталей невисокої твердості виникають значні пластичні деформації з утворенням канавок по полюсній лінії у провідних зубів. У колесах конічних і гепоїдних передач пластична деформація в'язкого, а іноді твердого матеріалу, проявляється в результаті ударного додатка навантаження до зубів одного або обох сполучених коліс і має вигляд борозен, від яких метал тече через крайку зуба з утворенням хвилястого напливу – задирки.

Утворення вм'ятин і поглиблень на поверхнях тертя – один з видів ушкодження підшипників кочення, у тому числі на доріжках кочення внаслідок попадання й здавлювання сторонніх часток. Ударне, або особливо важке навантаження можуть викликати місцеву деформацію кільця в контакті з кулями або роликами – особливий вид пластичної деформації на доріжках кочення, який називають брінелюванням.

Розвиток макродеформації під навантаженням, звичайно динамічним, спостерігається у вкладишів і втулок з кольорових металів і проявляється в зсуві металу за межі поверхні зіткнення з нерухливою контрдеталлю в осьовому напрямку. Це приводить до ослаблення пресових посадок і збільшенню проміжків у рухливих сполученнях. В антифрикційних шарах з м'яких підшипникових сплавів іноді відбувається поступове переміщення поверхневих шарів у напрямку ковзання під дією сил тертя, що призводить до зміни розмірів підшипників, похибки форми робочої поверхні, утворення тріщин у бабітовому шарі в місцях розташування пазів для кріплення бабіту й закупурюванню мастильних канавок і отворів.

Електрокорозійне зношування відбувається при проходженні через контакт тертьових поверхонь електричного струму. Зношуванню піддаються ковзні електричні контакти. У радіоелектронній апаратурі,

засобах автоматики і зв'язку зношуються слабкострумові рухливі контакти реостатів, потенціометрів, кодових датчиків, реле та ін.

При навантаженні контакту струмом різко підсилюються окислювальні процеси. Електрохімічний характер окислювальних процесів найбільше проявляється на анодно – поляризованих поверхнях. Електричне поле в проміжку сприяє руху кисню в напрямку поверхні. Поява в зоні контакту окислених твердих часток зношування веде до інтенсифікації абразивного зношування. Проходження струму через контакт викликає тепловиділення та прискорення окислювальних процесів. Зношування вуглеграфітових композитів сильно залежить від зовнішнього середовища та його вологості. Тепловиділення приводить до зниження міцності поверхневих шарів, деструкції сполучного в композиційних матеріалах, термічним напруженням, дисоціації адсорбованих плівок на метали.

При іскро – і дугоутворенні крім перерахованих процесів має місце електроерозія. Наявність у зоні контакту композит – метал електричного поля сприяє переносу композита на метал або металізації композита.

До основних методів боротьби з електрокорозійним зношуванням відносяться: створення на поверхнях контакту матеріалів тонких перехідних шарів, що не впливають на процеси передачі струму через контакт, але різко знижують ймовірність схоплювання, зварювання й інтенсивного механічного зношування; створення композиційних матеріалів, що містять електропровідні змащення; створення струмо провідних мастильних матеріалів.

Зношування при вибіркового переносі. Вибірковий переніс (ВП) є результатом фрикційної взаємодії, що характеризується в основному молекулярною складовою сили тертя. При ВП на поверхні тертя протікають хімічні і фізико – хімічні процеси, що приводять до утворення систем автокомпенсації зношування і зниження тертя. Тут характерна система утворення захисної (сервовітної) плівки, у якій реалізується дифузійно – вакансійний механізм деформації, що протікає без нагромадження дефектів, викликаних втомним процесом. Утворення таких сервовітних плівок зв'язують із вибірковою розчиненням і осадженням окремих елементів сплавів, що містять мідь. Воно спостерігається в різних парах тертя при застосуванні мастильних матеріалів, до складу яких вводять порошки міді або бронзи.

З урахуванням складності й багатофакторності процесів, що протікають при терті, розглянуті вище види зношування не вичерпують усі можливі його види. Крім того, у вузлах тертя й тертьових деталях звичайно протікають процеси, характерні для декількох видів зношування. Однак, як правило, один з них є визначальним. Дослідження цих процесів і визначення виду зношування дозволяє виробити конкретні заходи щодо зниження цього небажаного явища.

6. ЗМАЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

6.1. Загальні відомості

Метою змащення поверхонь тертя є отримання переважно рідинного тертя, при якому втрати на тертя малі, а зношування деталей практично відсутнє. Мастильні матеріали повинні мати строго задані властивості, обумовлені величинами питомого і повного навантажень у зоні тертя, максимальної, середньої та об'ємної температурами в зоні контакту, кінематикою руху в зоні тертя (кочення, ковзання, змішане), видом матеріалів обох деталей, характеристикою хвилястості і шорсткості поверхонь у зоні тертя, властивостями навколишнього середовища та ін.

Найбільше поширення в техніці отримали рідкі мастильні (оливи) і пластичні матеріали (змащення). Мастильні матеріали є конструкційним елементом вузла тертя, які багато в чому визначають довговічність, надійність і втрати на тертя в трибосполученнях. Вони виконують наступні функції: 1) зменшують тертя між сполученими деталями; 2) знижують зношування і запобігають задирам поверхонь тертя; 3) відводять тепло від поверхонь тертя; 4) захищають поверхні від корозійного впливу навколишнього середовища; 5) ущільнюють проміжки між сполученими деталями; 6) видаляють із зони тертя продукти зношування, корозії та інші забруднення. Однак необхідність в оливах, здатних одночасно задовольняти всім вимогам, відсутня. Залежно від призначення та умов експлуатації використовується олива повинна надійно виконувати дві – три функції.

Мастила поділяють за способом отримання і призначення. За походженням виділяють нафтові, синтетичні і рослинні оливи. У найбільших масштабах використовуються оливи, отримані шляхом переробки нафтової сировини (нафтові оливи). Синтетичні оливи, отримані на основі вуглеводневої або інших видів сировини, і особливо рослинні олії застосовують обмежено. Поряд із чисто нафтовими або синтетичними оливами все частіше використовують їх суміші один з одним – так звані напівсинтетичні оливи (частково синтетичні). Нафтові оливи залежно від способу отримання поділяють на дистилятні (з нафтових дистилятів, виділених вакуумною перегонкою мазуту), залишкові (із залишку від вакуумної перегонки мазуту – гудрону), компаундуванні (суміш дистилятних і залишкових олив). Основою для готування товарних

нафтових олив є базові оливи, у які вводять присадки і їх композиції. Присадки призначені для поліпшення тих або інших властивостей основи. Для цих же цілей використовують і тверді порошкоподібні, антифрикційні добавки, що поліпшують насамперед мастильну здатність олив. За допомогою присадок можна підвищити стійкість олив до окислення, абсолютне значення їх в'язкості і зменшити залежність в'язкості від температури, знизити температуру застигання (змінити плинність), підвищити їхню мастильну здатність, зменшити корозію металевих поверхонь, знизити відкладання нагарів на деталях двигунів і т. д. Деякі товарні оливи не містять присадок. У самостійну групу виділяють загущені оливи, що приготовлені загущенням базових олив полімерними присадками.

За призначенням виділяють наступні групи мастил: моторні, індустриальні, трансмісійні, турбінні, компресорні, приладові й деякі інші оливи більш вузького спеціального призначення.

6.2. Мастильні матеріали

Індустриальні оливи. Призначені для змащування різних машин і механізмів промислового устаткування – металорізальних верстатів, пресів, прокатних станів, різноманітних текстильних і папероробних машин, приладів, насосів, гідросистем та ін. Асортимент індустриальних олив нараховує більше 100 найменувань, об'єм їх виробництва перевищує 30 % загального виробітку нафтових олив. За призначенням індустриальні оливи поділяють на чотири групи: 1) для гідравлічних систем; 2) для напрямних ковзання; 3) для зубчастих передач; 4) для шпинделів, підшипників і сполучених з ними з'єднань. Оливи для гідравлічних систем є робочими рідинами для гідравлічних систем металорізальних верстатів, автоматичних ліній, пресового та іншого устаткування. Маркування цих олив включає групу знаків, розділених між собою тире. Перший з них позначається незалежно від состава й властивостей олив буквою *И*. Друга буква позначає групу за призначенням (*Л* – легко навантажені вузли; *Г* – гідравлічні системи; *Н* – напрямні ковзання; *Т* – важко навантажені вузли). Третя буква позначає підгрупу за експлуатаційними властивостями. Четвертий знак – числовий – визначає клас кінематичної в'язкості. Приклади позначень: *ЛА-7*; *ГН-Е-68*; *Т-Д-680*.

Пластичні мастила. У багатьох вузлах тертя неможливо і недоцільно використовувати циркуляційну мастильну систему. Мастильний матеріал у зону тертя таких вузлів подається періодично. У деякі пристрої пластичне змащення в зону тертя вводять при монтажі, де воно працює протягом усього періоду існування пристрою. При періодичному змащенні або

змазуванні на весь нормативний строк експлуатації пристрою звичайна рідка олива застосовуватися не може через невелику в'язкість. При безперервному змазуванні олива, що видавлюється із зони тертя, поповнюється свіжими порціями, при періодичному змащуванні необхідне підвищення стійкості оливи до видавлювання із зони тертя при великих навантаженнях, високій температурі і дії відцентрової сили. Підвищення стійкості оливи домагаються її загущенням за допомогою різного роду загусників, до утворення пластичного змащення.

Властивості пластичних змащень залежать від властивостей їх складових компонентів, тобто від властивостей оливи, загусника та інших речовин, передбачених рецептурою, ступенем дисперсності та ін. Олива може бути мінеральною або синтетичною різної в'язкості. У якості загусників використовуються консистентні вуглеводні, а також мила різних металів і жирних кислот. Застосовують також різного роду органічні й неорганічні з'єднання, що утворюють із олівами колоїдні системи з необхідними властивостями. Введений в оливу загусник утворює з ним просторову зв'язку (кістяк). У комірках сітки цієї зв'язки закріплена олива (як мед у стільнику). Її рух під дією дотичних сил обмежений перегородками. Опір руху при внутрішньому терті є виміром структурної в'язкості пластичного змащення. Просторовий кістяк звичайно побудований із кристалічних агрегатів з волокнистою (ниткоподібною) або близькою до кулястої структурою. Волокна загусника можуть бути прямими, скрученими або спіральними. Для пластичних змащень в'язкість залежить не тільки від температури й тиску, але й від швидкості зрушення. З ростом швидкості зрушення в'язкість пластичного змащення знижується, тому що руйнується внутрішня структура змащення. Вплив температури на в'язкість пластичного змащення менше, ніж для оливи, тому що головну роль в опорі плинну відіграє пошкодження кістяка загусника, а його міцність порівняно мало залежить від температури.

За видом дисперсійної фази пластичні змащення класифікують на: 1) змащення, отримані загущенням мінеральних олив: з парафінової нафти або з безпарафінової нафти; 2) змащення, отримані загущенням синтетичних олив: силіконових, поліалкіленгліколевих, складноефірних, фторованих, поліфенілових.

За видом дисперсної фази (загусника) розрізняють: 1) мастила, загущені милами металів: конвекційними (*Ca*, *Na*, *Li*, *Al*, *Ba*, *Pb*), змішаними (*Ca-Na*, *Ca-Li*), комплексними (*C*, *Al*); 2) мастила, загущені іншими загусниками: твердими вуглеводнями (парафінами і церезинами), органічними (пігментні або карбамідні); неорганічними (кремнеземні або бентонітові).

За призначенням розрізняють пластичні мастила для підшипників кочення, підшипників ковзання, передач та ін.

Тверді мастильні матеріали і антифрикційні покриття. Тверді мастильні матеріали розділяють на дві групи: 1) неорганічні: шаруваті (діхалькогеніди металів – MoS_2 , WS_2 , TaS_2 , $MoSe_2$, WSe_2 , $NbSe_2$, $TaSe_2$, графіт, фторований графіт, нітрид бору та ін.); нешаруваті (хлориди, фториди і йодиди металів, оксиди та ін.); м'які метали (Pb , Sn , Cd , In , Ga , Ag , Au); 2) органічні полімерні матеріали (політетрафторетілен, поліаміди та ін.).

Тверді мастильні матеріали застосовують як покриття конструкційних матеріалів і антифрикційних наповнювачів у композиційних матеріалах. Тверді мастильні покриття наносять на поверхні тертя різними способами: механічними, термохімічними, фізичними – плазмовим і детонаційним напилюванням, вакуумним іонно – плазмовим напилюванням та ін., просоченням пористих шарів. Однак найбільше поширення мають покриття зі сполучним. Їх наносять із суспензії твердої речовини зі сполучними типу органічних, кремнійорганічних смол або деяких неорганічних речовин з наступним затвердінням термічною обробкою або на повітрі. Для цього застосовують занурення, нанесення кистю, розпилення суспензії, просочення пор робочих поверхонь.

6.3. Вибір мастильних матеріалів

Вибір мастильного матеріалу залежить від комплексу факторів: конструкції вузла тертя, робочого режиму (навантаження, швидкість, температура), зовнішнього середовища (температура повітря, його вологість, запиленість, наявність агресивних газів та ін.), кваліфікації обслуговуючого персоналу і зручності обслуговування механізму, вимог надійності, економічних факторів та ін. Насамперед оцінюють доцільність застосування оливи або пластичного змащення.

Мастила мають наступні переваги: більш високу стабільність і чистоту; більш низький коефіцієнт тертя; кращу працездатність при високих швидкостях ковзання, підвищених і низьких температурах; можливість фільтрації і контролю над станом оливи та його подачею; простоту додавання і зміни оливи; можливість збору відпрацьованої оливи і її регенерації; охолоджуюча дія на поверхні тертя. До їхніх недоліків відносяться: підвищені витрати через нещільності в корпусах і з'єднаннях мастилопроводів; необхідність застосування складних ущільнень; підвищена пожежонебезпека.

Пластичні мастила (ПМ) мають наступні переваги: гарну працездатність при малих швидкостях ковзання і високих тисках, дії

ударних і знакозмінних навантажень, частих зупинок, а в спеціальних ПМ – і при високих температурах; можливість роботи сполучень при великих проміжках; гарне втримання ПМ у корпусах; гарне заповнення проміжків у вузлах тертя і корпусах підшипників і відповідно захист поверхонь тертя від забруднення. Недоліками ПМ є: розшарування, розплавлювання і витікання при тривалій роботі при підвищених температурах; трудомісткість їх зміни, пов'язана з розбиранням і промиванням механізмів; обмежені конструктивні можливості по підведенню ПМ до поверхонь тертя; великі втрати на тертя при високих швидкостях ковзання і відповідне підвищення їх температури; відкидання ПМ від робочих поверхонь при високих частотах обертання; підвищення внутрішнього тертя при низьких температурах, що може викликати заклинювання і порушення нормального функціонування вузла; обмеженість застосування у приладах і механізмах керування через їхню недостатню чутливість; обмеженість застосування у вузлах, що не допускають розбирання й розрахованих на тривалу експлуатацію.

Пластичні мастила застосовують у парах ковзання тихохідних механізмів, у відкритих зубчастих передачах і підшипниках кочення, а також там, де можна уникнути ускладнення конструкції вузла, пов'язаного з використанням рідкого мастильного матеріалу (ММ).

При виборі мастил необхідно враховувати наступне: для механізмів, що працюють при нормальній температурі навколишнього середовища, застосовують оливи з порівняно високою температурою застигання; чим менше в'язкість оливи, тим менше внутрішнє тертя; при порівняно вузькому температурному інтервалі роботи механізму оливи можуть мати круту в'язкість – температурну характеристику, що має важливе значення, оскільки можливості отримання оливи з пологою характеристикою обмежені; малов'язкі оливи у випадку порушення щільності стиків і з'єднань дають великі витрати й легко розприскуються; навантажувальна здатність оливи підвищується зі збільшенням їх в'язкості. Для підвищення ККД механізмів і зниження температури нагрівання деталей, що іноді особливо важливо, наприклад, у верстатах для оздоблювальної обробки, застосовують малов'язкі мастильні матеріали. Так, підшипники ковзання шпинделів шліфувальних верстатів змазують сумішшю мінеральної оливи з гасом або навіть чистим гасом.

Якщо за умовами експлуатації неможливе застосування рідких або пластичних мастильних матеріалів, застосовують тверді мастильні матеріали. Це дозволяє підвищити несучу здатність контакту, але звичайно приводить до зниження терміну служби. Однак цей недолік може бути усунений при використанні перспективних способів магнітно – порошкової і ротарпінтного змащення.

При виборі мастильних матеріалів можна скористатися також рекомендаціями для типових вузлів тертя, наведеними в довідковій літературі. Так, для змащення підшипників кочення використовують рідкі (мінеральні і синтетичні) оливи і пластичні (консистентні) мастила, а іноді сухі. Мінеральні оливи (*И-5А, И-12А, И-20А, МС-6*) стабільніше пластичних змащень, вони з успіхом застосовуються для змащування підшипників, що працюють із високими частотами обертання (зокрема, у вигляді оливного туману), можуть тривалий час працювати при високих температурах (*ВТ-301*), не втрачаючи мастильних властивостей. Застосування циркуляційного змащення забезпечує інтенсивний відвід тепла і видалення продуктів зношування. Недоліком є необхідність ущільнень, що ускладнюють конструкцію і збільшують втрати на тертя. Вибір змащення залежить від частоти обертання і розмірів підшипника, величини навантаження, робочої температури підшипникового вузла та умов навколишнього середовища. Способи подачі рідкого змащення гаспуні: оливна ванна, за допомогою гонтів, розбризкуванням, розпиленням (у вигляді оливного туману); за допомогою гвинтових каналок, конічних насадок, дозуючих олійниць. Оливну ванну використовують у легко навантажених вузлах при горизонтальному розташуванні валу. Оливу заливають безпосередньо в корпус підшипника через отвори в кришці, що закриваються різьбовою пробкою. При цьому рівень оливи доходить до нижньої кульки або ролика. Оскільки олива в оливній ванні замінюється лише періодично, у ній слід застосовувати оливи високого ступеня очищення. Змащення за допомогою краплинних олійниць застосовують для періодично працюючих легко навантажених вузлів.

Гнотове змащення використовують у широкому діапазоні режимів експлуатації підшипників кочення. Однією з переваг цього змащення є те, що гніт, подаючи змащення до підшипника, забезпечує очищення оливи від сторонніх речовин і дозує її подачу. Змащення розбризкуванням (барботажем) застосовують у тих випадках, коли підшипник і системи шестерень змащуються від однієї загальної системи. Олива, що розприскується, створює навколо підшипника оливний туман. Циркуляційна система змащення з використанням дозуючих форсунок є досить надійною при експлуатації підшипників на високих частотах обертання і великих навантаженнях. Струминне змащення із застосуванням групи форсунок, розташованих по колу, є найбільш ефективним при роботі підшипників на форсованих режимах, забезпечує рівномірне охолодження підшипників по колу. Змащення оливним туманом застосовують для високошвидкісних легко навантажених підшипників. Повітряно – оливна суміш, що прокачується через підшипник, утворює на тертьових поверхнях постійну

тонку плівку оливи, забезпечує гарне охолодження підшипника, охороняє його від забруднення.

Пластичні змащення (*ЦИАТИМ–201, Литол–24, ВНИИНП–207*) менш схильні до витікання, завдяки чому спрощується ущільнення. Характеризуються підвищеним внутрішнім тертям у порівнянні з рідкими мастилами і більшою схильністю до температурних змін (надмірне розрідження або загущення). Вибір оливної основи змащення визначається умовами роботи: при температурі вище 20°C застосовують тільки синтетичні оливи; для низьких температур – малов'язкі нафтові й синтетичні; для змащень загального призначення – індустріальні оливи та їх суміші. Пластичні змащення використовують у підшипниках закритого типу (із двома ущільненнями або двома захисними шайбами) або закладають у корпуси підшипників у кількості від $1/3$ до $2/3$ внутрішнього вільного простору в підшипниковому вузлі.

6.4. Загальні принципи створення систем змащування

Система змащування забезпечує підведення мастильного матеріалу в зону тертя. У системах циркуляційного змащування мастильний матеріал циркулює в системі, притікаючи в зону тертя і відтікаючи з неї. У систему змащування входять: резервуар для мастильного матеріалу; пристрої, що подають мастильний матеріал у зону тертя; пристрої, що відводять мастильний матеріал із зони тертя; системи охолодження; системи очищення мастильного матеріалу; пристрої, що вирівнюють тиск і швидкість; арматура (вимірники, вказівники, органи управління та ін.). У простих системах змащування деякі елементи можуть бути відсутніми або мати дуже просту конструкцію. У системах змащування найчастіше застосовуються мінеральні оливи, рідше – синтетичні, водно – оливна емульсія, пластичні мастильні матеріали та ін. Розрізняють системи індивідуального й централізованого змащування. В останньому випадку змазується кілька пристроїв. За періодичністю подачі мастильного матеріалу виділяють системи безперервного і періодичного змащування. Деякі пристрої змащують один раз за весь час їх функціонування (холодильники, пральні машини та ін.). За способом підведення мастильного матеріалу розрізняють системи змащування без тиску і під тиском. У системах одноразового проточного змащування мастильний матеріал використовується один раз. У системах циркуляційного змащування він використовується багаторазово.

Індивідуальне періодичне проточне змащування без тиску є найпростішим ручним способом. У мастильний отвір або клапан за допомогою поршневої або мембранної олійниці вводиться олива.

Індивідуальне періодичне проточне змащування під тиском здійснюється за допомогою ручних олійниць, з яких олива в мастильний отвір видавлюється під тиском, створюваним рухом поршня. Подача оливи в зону тертя під тиском дозволяє покрити їм більшу поверхню, тому що вона попадає в різного роду тріщини й поглиблення.

Індивідуальне безперервне проточне змащування без тиску використовує різницю рівнів оливи в олійниці, змонтованої в пристрої, і в деталі, що змащується. Для цього застосовують гнотові, крапельні й голчасті олійниці і мастильні подушки. У гнотових олійницях використовуються капілярні властивості гноту. У крапельних і голчастих олійницях через регульований отвір по краплі витікає олива. Оливний бачок виконується з прозорого матеріалу, щоб був видний рівень оливи, який може регулюватися поплавцем. У деяких конструкціях голка пропускає оливу тільки під час роботи машини. Після зупинки машини голка закриває отвір, через який надходить олива. Мастильні подушки виготовляють із матеріалів, що мають капілярні властивості (фетр, повсть, вовняна пряжа) і розташовують у нижній або бічній частині підшипника. Окружна швидкість поверхонь, що змазуються, не повинна перевищувати 4 м/с (трансмисії, вагонні підшипники, верстати та ін.). Подушки просочуються оливою за допомогою спеціальних кишень, у які вона вливається, або постачається за допомогою гноту.

Індивідуальне безперервне циркуляційне змащування без тиску здійснюється за допомогою змащувальних поверхонь або зануренням. Перший вид змащування застосовується в основному для горизонтальних підшипників ковзання за допомогою кільця, що вільно висить, або закріпленого на валу. Обертове кільце поринає в оливу і переносить її на верхню частину валу. Олива розтікається по поверхні і стікає в бак, після чого цикл повторюється. За допомогою вільного кільця змащуються вали з окружною швидкістю не менш $0,5 \text{ м/с}$ і не більш 32 м/с . Для довгих підшипників застосовуються два кільця, а для валів з малою частотою обертання замість кільця використовуються дрібноланкові ланцюги. Змащування зануренням (в оливній ванні) застосовується найчастіше для зубчастих передач і деяких ДВЗ. При змащуванні передач одне з коліс частково занурене в оливну ванну і несе оливу на інше колесо. Цю роль може виконувати холоста шестерня, що наносить оливу на робочу шестерню. Окружна швидкість зубчастих коліс не повинна перевищувати 15 м/с , черв'ячних – 10 м/с . Олива розприскується у ванні й уся її внутрішність заповнюється оливним туманом.

Змащування за допомогою самозасмоктування застосовується для цапф підшипників ковзання з малим проміжком між цапфою і підшипником (не більш 10 мкм) і при окружній швидкості не менш 3 м/с .

При русі цапфи виникає розрідження, у результаті чого засмоктуються олива з бака. Тут не можна застосовувати оливу з великою в'язкістю.

Змащування за допомогою роликів застосовується в основному для змащування напрямних і столів фрезерних і стругальних верстатів. Ролики, частково занурені в мастило, забирають його й несуть на поверхні, що рухаються над ними.

Змащування спіральними канавками застосовується у вертикальних підшипниках верстатів. Обертовий вал з великою частотою (3500...15000 об/хв) накачує оливу в канавки і потім розносить її по поверхні підшипника.

Індивідуальне безперервне змащування під тиском засноване на подачі оливи під тиском, створюваним малими поршневими, лопатевими або шестерними насосами.

Система центрального змащування характеризується підведенням мастильного матеріалу до значної кількості пристроїв або точок змащування. Усі пристрої змащуються тією самою оливою або пластичним матеріалом. Конструктивно системи центрального змащування близькі до систем індивідуального змащування, але обслуговують велику кількість точок одночасно. Системи змащування містять у собі: пристрої, що створюють різницю тиску змащувальної речовини в системі змащування (оливні насоси, насоси пластичного змащення, процеси гідродинамічного змащування); систему транспортування мастильної рідини; пристрої виміру тиску, температури та об'єму рідини; теплообмінники, призначені для відводу теплоти від охолоджуваної мастильної рідини; пристрої для очищення (фільтрації) мастильної рідини. Однак у конкретну систему змащування можуть входити не всі з перерахованих технічних систем. Наприклад, у системах змащення зубчастих передач звичайно немає оливних насосів і трубопроводів, а роль теплообмінника виконує корпус передачі.

Для нагнітання мастильної рідини застосовуються шестеренні, плунжерні й роторні насоси. Майже всі пристрої для виміру тиску, температури та об'єму мастильної рідини складаються з датчика й індикатора. Вимірники тиску можуть бути механічними або електричними. Для виміру температури мастильної рідини використовуються манометричні та електричні термометри. Принцип роботи перших заснований на деформації датчику, яка викликається тиском парів рідини, що заповнює датчик. Дія індикатору рівня оливи заснована на тому, що металевий поплавець, упираючись у контакт, замикає електричне коло, і спрацьовує сигналізатор. Відвід теплоти в навколишній простір здійснюється від ребер стінок корпусів працюючих агрегатів або від радіатора системи охолодження. Оливні радіатори виготовляються з трубок

які також мають ребра. Олива примусово прокачується через систему охолодження, тому що велика в'язкість мастильної рідини ускладнює її протікання через трубки радіатора, що мають невеликий внутрішній діаметр.

Періодичне центральне змащування без тиску здійснюється при подачі оливи під дією сили ваги, усі пристрої системи повинні перебувати вище точок змащування. Багатоточкова олійниця забезпечена баком, який наповнюється вручну, з якого після відкриття вихідних отворів олива може стікати до точок змащування. Застосовують також пневматичні багатоточкові олійниці.

Періодичне центральне змащування під тиском. Олива до точок змащування подається під тиском за допомогою спеціальних насосів з ручним або механічним приводом. Привод насосів може здійснюватися електромагнітом, що періодично включається, або від валу машини, що змащується. Мастильні отвори відкриваються періодично відповідно до програми змащування й у точки змащування подаються певні порції оливи.

Безперервне центральне змащування без тиску. Це конструкції, що поєднують індивідуальні системи змащування. Використовуються багатоканальні крапельні й гнотові оливи. Часто застосовується змащування розбризкуванням, коли оливу підводять до всіх поверхонь, що вимагають змащування. Роль розприскувача можуть відіграти шестерня, колінчастий вал та ін. Розбризкування оливи можливо отримати, поливаючи оливами обертові деталі. Просте поливання оливами деталей також є змащування без тиску.

Безперервне центральне змащування під тиском. Застосовується для будь-якої кількості точок змащування. Для змащування декількох десятків точок застосовують мастильні преси, так звані лубрікатори. Вони включають всмоктувальну – нагнітаючу та розподільно – подаючу деталі. Ними можна подавати оливу на великі відстані й під великим тиском (до декількох десятків магистралей). Привод здійснюється від валу машини, що змащується, за допомогою ремінної, ланцюгової або зубчастої передачі, іноді від власного двигуна. Місткість баку лубрікатора – кілька літрів. У великих системах змащування використовуються баки, з яких олива подається насосами через фільтри до точок змащування. Після виконання завдання олива стікає в оливну ванну і звідти в бак. Великі системи змащування обладнуються центрифугами, що очищають оливу, холодильниками, манометрами, витратомірами та іншими пристроями, необхідними для функціонування такої системи. Центральне змащування може здійснюватися за допомогою оливного туману, який створюється спеціальними пристроями. Найчастіше оливний туман створюється за допомогою стисненого повітря. Отримання аерозолю засновано на

змішуванні двох струменів: повітря й оливи. Струмінь повітря розширюється в соплі і всмоктує оливу, що підводиться з бака під невеликим тиском. Розпилена олива вдаряється у відбивач, розташований за соплом, і тільки найдрібніші краплі обгинають його і по трубопроводу подаються в зону змащення. Розмір крапель повинен бути кілька мікрометрів, швидкість потоку близько 2 м/с . Після доставки дрібних крапель у зону змащення вони за допомогою сопла, що згущає, збираються в більші краплі.

При використанні твердих змащень застосовують магнітний і ротапринтний способи змащування.

Магнітний спосіб змащування подачі твердих змащень досить універсальний і може бути застосований у вузлах тертя різних видів механізмів – зубчастих передачах, підшипниках ковзання, кулачкових механізмах та ін. Різноманітні також способи його конструктивного розв'язання. Так, зубчасті колеса можуть бути намагнічені зовнішнім магнітом, розташованим поза картером зі змащенням, або магнітами, розташованими на обертових шестернях. В обох випадках шестерні повинні розташовуватися в замкненому контурі з немагнітного матеріалу, у якому розміщається магнітноактивне змащення. Оскільки тверді змащення, як правило, діаманітні в практично не реагують на магнітне поле, до їхнього складу вводять феромагнітні речовини. Так, застосовують суміш в об'ємному співвідношенні 80% дисульфиду молібдену і 20% нікелю. Даний спосіб дозволяє підвищити ресурс роботи механізмів за рахунок збільшення об'єму змащення, що циркулює у вузлі тертя в процесі його роботи, кращого втримання змащення на поверхні тертя під дією магнітного поля, можливістю багаторазової подачі тих самих часток змащення при їхньому відриві від поверхні тертя.

Ротапринтний спосіб змащення полягає в поступовій подачі в малих дозах твердого змащення в зону тертя шляхом переносу з елементів, що змащують, при досить малих навантаженнях. Зношування мастильних елементів може без шкоди для механізму в багато разів перевищувати припустиме зношування основних деталей, що сприймають і передають навантаження. У підшипниках ковзання використовують брикети (олівці), що притискаються до робочій поверхні валу або вкладишу підшипника за допомогою відцентрових сил інерції, пружин або іншого пристрою. Застосовують також опори ковзання з нерухомими вставками їх твердомастильного матеріалу. У зубчастих передачах роль змащувального елемента виконує спеціальна шестерня, що перебуває в зачепленні з робочою.

Залежно від конструкції вузла тертя та умов його роботи застосовують ту систему підведення мастильного матеріалу до поверхні тертя, яка

може бути одноразовою (уведення мастильного матеріалу у вузол тертя до початку його роботи на весь строк експлуатації), безперервною або періодичною. Це визначає конструкцію мастильної системи. При періодичному підведенні мастильного матеріалу звичайно застосовують проточну мастильну систему, у якій мастильний матеріал підводиться до поверхні тертя і не вертається в систему змащування після його одноразового застосування.

У деяких випадках здійснюється гнотове змащування, коли рідкий мастильний матеріал підводиться від бачка до поверхні тертя за допомогою гніту за рахунок капілярних сил. Відкриті з боку оливної ванни підшипники кочення редукторів змащуються тією же оливою, що й зубчаста передача, шляхом розбризкування або оливного туману.

6.5. Підведення і розподіл мастильного матеріалу

Для організації надійного змащування важливе значення має місце підведення ММ до поверхонь тертя і способи його розподілу по поверхні. Мастильні канавки служать для розподілу ММ, що підводиться, по поверхонь тертя, підвищення інтенсивності охолодження за рахунок великого прокачування ММ через підшипник, зменшення витoku ММ, видалення твердих сторонніх часток і продуктів зношування з ММ із поверхонь тертя, акумулювання ММ і відновлення граничної мастильної плівки в місцях її пошкодження. Мастильні канавки в опорних підшипниках залежно від розташування бувають поздовжніми, похилими, X – образними, кільцевими, напівкільцевими, гвинтовими та ін. Рідше зустрічаються канавки V – образної форми поздовжнього розташування. Різновидами поздовжніх канавок є фаски й кишені.

В опорах ковзання застосовують різні способи подачі мастильного матеріалу: через мастильний отвір, розташований проти напрямку навантаження або під кутом 90° ; через два мастильні отвори, розташовані співвісно під кутом 90° до напрямку навантаження; по мастильній (окружній) канавці; через мастильну кишеню, розташовану напроти або під кутом 90° до напрямку навантаження; через дві мастильні кишені, розташовані під кутом 90° до напрямку навантаження, та ін. При подачі ММ самопливом кращим місцем його підведення є зона розширення клинового проміжку, де при рідинному змащенні утворюється розрідження. Можливо навіть засмоктування ММ із ванни, розташованої нижче підшипника. Підведення ММ до підшипника доцільне з боку, діаметрально протилежного його найбільшому зношуванню.

Підведення ММ до оливного клину при змащуванні під тиском має ту перевагу, що в робочу зону попадає холодний мастильний матеріал. Таке

підведення найбільш прийнятне при малих й помірних навантаженнях підшипника. Якщо немає впевненості, що верхня частина проміжку заповнюється ММ і забезпечується достатнє охолодження валу, ММ підводять з боку виходу валу з оливного клину. Для поліпшення подачі у верхній половині вкладиша роблять кільцеву канавку.

При обертанні вектору навантаження разом з валом у працюючому підшипнику відсутня зона, постійно вільна від навантаження, куди можна було б підвести ММ. Тоді підведення здійснюють через кільцеву канавку, розташовану в середині підшипника або поблизу його торця, а також через вал. Останній спосіб використовують також при обертовому корпусі і нерухливому валі з навантаженням постійного напрямку по відношенню до нього. При внутрішньому підведенні через вал для виходу ММ у підшипнику роблять радіальне або похиле свердління.

6.6. Системи змащування верстатів

Сукупність пристроїв, що забезпечують очищення, подачу мастильного матеріалу, його повернення в мастильний бак, контроль вступу й діагностування утворює систему змащування технологічного обладнання. Від ефективності системи змащування залежать точність переміщення вузлів верстата, плавність і безшумність роботи передач, їх ККД, надійність роботи механізмів та їх точність, час його простоїв, обслуговування і ремонтів. Система змащування повинна забезпечувати подачу і розподіл мастильного матеріалу між вузлами верстату, контроль і сигналізацію про несправність в системі змащування, можливість регулювання об'ємів змащення, що подається до точок змащення, ефективне очищення і зберігання мастильного матеріалу, зручність і економічність експлуатації.

У сучасних верстатах розширюється застосування автоматичних систем з подачею мастильного матеріалу до декількох точок одночасно і централізованим контролем, у тому числі зі зворотним зв'язком від пар тертя, що підтримує необхідний режим змащування залежно від режиму роботи і стану пари тертя. Так, наприклад, при роботі підшипника існує зв'язок між його температурою і витратою оливи. Недостатня витрата приводить до більших втрат на тертя, втратам потужності і нагріванню підшипника. При збільшенні витрати понад оптимальне значення втрати потужності і температура зростають за рахунок втрат на перемішування оливи. Точне дозування мастильного матеріалу у високошвидкісних опорах приводить до 6–8-кратного зниження втрат потужності.

Системи змащування підрозділяють на системи з насосним і дросельним розподілом, двомагістральні, імпульсні, аерозольні і

комбіновані – відповідно до конструкції і принципу дії розподільних пристроїв.

Системи з насосним і дросельним розподілом знаходять переважне застосування при безперервній подачі мастильного матеріалу. У системах з насосним розподілом мастильного матеріалу об'єм подаваного змащення визначається продуктивністю насоса (об'ємний принцип дозування). У цих системах кожна магістраль багатовідвідного або багатопотокового насосу з'єднана безпосередньо із точками, що змащуються. Найбільше поширення, у якості нагнітаючих пристроїв систем насосного розподілу, отримали поршневі і шестеренні насоси.

У дросельних системах розподілу, застосовуваних в основному для рідкого мастильного матеріалу, регулюють подачу оливи до точок змащування за рахунок зміни гідравлічних опорів мастильних ліній.

Дросельні системи стабільно функціонують при відносно великих витратах (більш $100...200 \text{ см}^3/\text{хв}$), тому їх звичайно застосовують у системах безперервної подачі оливи. Перевага дросельних систем полягає в простоті конструкції, недоліки – залежність витрати від тиску й температури оливи, схильність до засмічення.

При змащуванні оливним туманом використовують оливу, розпилену в струмені стисненого повітря на дрібні частки (тиск $0,2...0,6 \text{ МПа}$). Оливоповітряна суміш надходить до пари тертя, змащує її і одночасно відводить тепло. Цей спосіб змащення звичайно використовується в підшипниках кочення і ковзання, напрямних різних типів, пневматичному устаткуванні. До складу будь – якої системи змащування оливним туманом входять пристрої підготовки повітря: фільтр, вологовідділювач, регулятор тиску, генератор – оливоорозприскувач, сопла. Через незначну витрату мастильного матеріалу система збору й очищення оливи не потрібна.

Системи змащування із циклічною подачею мастильного матеріалу дозволяють оптимальним образом дозувати подачу мастильного матеріалу і мають більш високу надійність. Вони можуть бути складовою частиною циркуляційних систем і підключатися до напірних магістралей через відповідні розподільники.

Зазвичай застосовуються змішані системи змащування. Один або кілька агрегатів змащуються централізовано, інші – індивідуально. Наприклад, в універсальних токарських верстатах ручне змащування застосовують для шпіндельних підшипників, що направляють станини, ходового гвинта та його підшипників, задньої бабки. Змащування зануренням застосовують для коробки подач. Гітара змащується вручну пластичним графітовим мастильним матеріалом. Для змащування шпінделю використовується також циркуляційне змащування під тиском.

7. ОСНОВНІ ЗАЛЕЖНОСТІ НАДІЙНОСТІ МАШИН

7.1. Оцінка надійності машин

7.1.1. Безвідмовність

Безвідмовність – властивість об'єкта безупинно зберігати свою працездатність протягом деякого часу (або часу напрацювання). У цьому випадку розглядається такий період роботи машини, коли не здійснюються заходи для підтримки її працездатності (ремонт, змашування, перевірка стану, регулювання і т.п.)

Показниками безвідмовності є:

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що в межах заданого часу напрацювання відмова об'єкта не виникне. Є основним показником безвідмовності.

Гамма – відсоткове напрацювання до відмови – напрацювання, протягом якого відмова об'єкта не виникне з імовірністю γ , вираженої у відсотках.

Середнє напрацювання до відмови – математичне очікування напрацювання об'єкта до першої відмови.

Середнє напрацювання на відмови (напрацювання на відмову) – відношення сумарного напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного очікування числа його відмов протягом цього напрацювання.

Інтенсивність відмов – умовна щільність імовірності виникнення відмови об'єкта, визначена за умови, що до розглянутого моменту часу відмова не виникла.

Параметр потоку відмов – відношення математичного очікування числа відмов відновлюваного об'єкта за досить малий його наробок до значення цього наробку.

Осереднений параметр потоку відмов – відношення математичного очікування числа відмов відновлюваного об'єкта за кінцеве напрацювання до значення цього напрацювання.

Показники безвідмовності вводяться або стосовно всіх можливих відмов об'єкта, або стосовно якого – небудь одного типу (типів) відмови із вказівкою на критерії відмови (відмов).

Під напрацювання розуміють тривалість або об'єм виконаної роботи об'єкта.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ пов'язана з функцією розподілу $F(t)$ і щільністю розподілу $f(t)$ напрацювання до відмови (рис. 7.1):

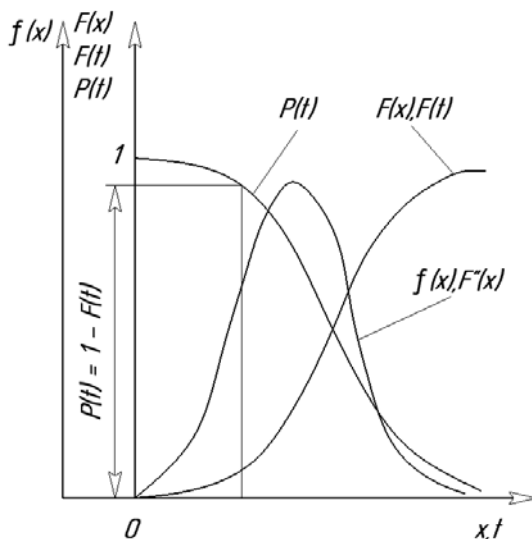


Рис. 7.1. Криві функцій розподілу $F(x)$, $F(t)$, надійності $P(t)$ і щільності розподілу $f(x)$, $f(t)$

Оскільки безвідмовна робота і відмова — взаємно протилежні події, то сума їх імовірностей дорівнює 1:

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (7.1)$$

Ймовірність настання хоча б однієї відмови на відріжку $[0, t]$ дорівнює:

$$Q(t) = 1 - P(t) \equiv F(t). \quad (7.2)$$

У статистичному трактуванні $f(t)$ дорівнює:

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N \Delta t} = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t}. \quad (7.3)$$

В імовірнісному трактуванні $f(t)$ дорівнює:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt}. \quad (7.4)$$

В наведених вище рівняннях Δn і $\Delta Q(t)$ – збільшення числа об'єктів, що відмовили, і відповідно ймовірності відмов за час Δt .

Імовірності відмов і безвідмовної роботи у функції щільності $f(t)$ виражаються:

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad (7.5)$$

при $t = \infty$

$$Q(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt = 1; \quad (7.6)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_0^{\infty} f(t)dt. \quad (7.7)$$

Точкові статистичні оцінки для ймовірності безвідмовної роботи $\hat{P}(t)$ від 0 до t і для функції розподілу наробку до відмови $\hat{F}(t)$ визначаються формулами:

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}; \quad (7.8)$$

$$\hat{F}(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (7.9)$$

де N – число об'єктів, працездатних у початковий момент часу; $n(t)$ – число об'єктів, що відмовили на відрізку від 0 до t .

Для високонадійних об'єктів ймовірність безвідмовної роботи по відношенню до критичних (тим більше – катастрофічних) відмов повинна бути досить близька до одиниці. Ймовірність настання хоча б однієї критичної відмови на заданому відрізку часу звичайно називають показником ризику або просто ризиком.

Гамма – відсоткові показники надійності визначають як корінь t_γ рівняння

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (7.10)$$

де $F(t)$ – функція розподілу напрацювання до відмови (ресурсу, термін служби).

Для показників безвідмовності звичайно задають значення 90; 95; 99; 99,5 % і т. д. Тоді ймовірність виникнення відмови на відрізку $[0; t]$ буде становити 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 і т. д. Значення, що задаються γ для критичних відмов повинні бути досить близькі до 100 %, щоб зробити критичні відмови практично неможливими подіями. Для прогнозування потреби в запасних частинах, ремонтних потужностях, а також для розрахунків поповнення і відновлення парків машин, приладів і установок можуть знадобитися гамма – процентні показники при більш низьких значеннях γ , наприклад при $\gamma = 50$ %, що приблизно відповідає середнім значенням.

Напрацювання до відмови вводиться як для неремонтованих (невідновлюваних), так і для ремонтваних (відновлюваних) об'єктів. Напрацювання між відмовами визначається об'ємом роботи об'єкта від k -ої до $(k + 1)$ -ої відмови, де $k = 1, 2, \dots$. Таке напрацювання відноситься тільки до відновлюваних об'єктів.

Технічний ресурс представляє запас можливого напрацювання об'єкту. Для неремонтованих об'єктів він збігається із тривалістю перебування в працездатному стані в режимі застосування за призначенням, якщо перехід у граничний стан обумовлений тільки виникненням відмови.

Оскільки середній і капітальний ремонт дозволяють частково або повністю відновлювати ресурс, то відлік напрацювання при врахуванні ресурсу відновлюють по закінченню такого ремонту, розрізняючи у зв'язку із цим доремонтний, міжремонтний, післяремонтний і повний (до списання) ресурс.

Доремонтний ресурс обчислюють до першого середнього (капітального) ремонту. Число можливих видів міжремонтного ресурсу залежить від чергування капітальних і середніх ремонтів. Післяремонтний ресурс відраховують від останнього середнього (капітального) ремонту.

Повний ресурс відраховують від початку експлуатації об'єкта до його переходу в граничний стан, відповідно до остаточного припинення експлуатації.

Аналогічним чином виділяють види терміну служби і терміну зберігання. Повний термін служби, як правило, включає тривалості всіх видів ремонту.

Гамма – відсоткове напрацювання до відмови t_γ визначають із рівняння:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}, \quad (7.11)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи.

Середнє напрацювання до відмови обчислюють за формулами:

$$T_1 = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty [1 - F(t)] dt, \quad (7.12)$$

або

$$T_1 = \int_0^\infty P(t) dt, \quad (7.13.)$$

де $F(t)$ – функція розподілу напрацювання до відмови, $f(t)$ – щільність розподілу напрацювання до відмови.

Статистична оцінка для середнього напрацювання до відмови визначається:

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j. \quad (7.14)$$

В цьому рівнянні N – число працездатних об'єктів при $t = 0$, τ_j – напрацювання до першої відмови кожного з об'єктів.

Середнє напрацювання на відмову (стосовно до відновлюваних об'єктів) дорівнює:

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}}. \quad (7.15)$$

В цьому рівнянні t – сумарне напрацювання, $r(t)$ – число відмов, що сталися протягом цього напрацювання, $M\{\}$ – математичне очікування випадкової величини, що стоїть в дужках. У загальному випадку середнє напрацювання на відмову – функція t . Для стаціонарних потоків відмов середнє напрацювання на відмову від t не залежить.

Статистична оцінка середнього напрацювання на відмову дорівнює:

$$\hat{T} = \frac{t}{r(t)}. \quad (7.16)$$

На відміну від формули (7.15), в формулі (7.16) $r(t)$ – число відмов, що фактично відбулися за сумарне напрацювання t .

Формула (7.16) дозволяє узагальнення на випадок, коли поєднуються дані, що відносяться до групи однотипних об'єктів, які експлуатуються в статистично однорідних умовах. Якщо потік відмов – стаціонарний, то у формулі (7.16) досить замінити t на суму напрацювань усіх спостережуваних об'єктів і замінити $r(t)$ на сумарне число відмов цих об'єктів.

Інтенсивність відмов – показник надійності невідновлюваних виробів, дорівнює відношенню середнього числа об'єктів, що відмовили в одиницю часу (або напрацювання в інших одиницях) до об'єктів, що залишилися працездатними. Цей показник більш чутливий, ніж ймовірність безвідмовної роботи, особливо для виробів високої надійності. Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ виражають через функції $P(t)$, $F(t)$ і $f(t)$ у такий спосіб:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (7.17)$$

Для високонадійних систем ($P(t) \approx 1$) інтенсивність відмов приблизно дорівнює щільності розподілу $f(t)$ напрацювання до відмови.

Статистична оцінка для інтенсивності відмов дорівнює:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \Delta t}, \quad (7.18)$$

де N – число об'єктів, працездатних у початковий момент часу; $n(t)$ – число об'єктів, що відмовили на відрізок від 0 до t .

Зв'язок між показниками безвідмовності представлений в табл. 7.1.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ на відміну від щільності розподілу належить до об'єктів N_p , що залишилися працездатними, а не до загального числа об'єктів

$$\lambda(t) = \Delta n / N_p \Delta t, \quad (7.19)$$

і в імовірнісному трактуванні, враховуючи, що

$$N_p / N = P(t), \quad (7.20)$$

$$\lambda(t) = f(t) / P(t). \quad (7.21)$$

Т а б л и ц я 7.1

Зв'язок між показниками безвідмовності

Показники	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	–	$1 - Q(t)$	$1 - \int_0^t f(\tau) d\tau$	$\exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right]$
$Q(t)$	$1 - P(t)$	–	$\int_0^t f(\tau) d\tau$	$1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right]$
$F(t)$	$-P'(t)$	$Q'(t)$	–	$\lambda(t) \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right]$
$\lambda(t)$	$-\frac{P'(t)}{P(t)}$	$\frac{Q'(t)}{1 - Q(t)}$	$\frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(\tau) d\tau}$	–

Параметр потоку відмов – показник надійності відновлюваних виробів, дорівнює відношенню середнього числа відмов відновлюваного об'єкта за довільне мале напрацювання його наробок до значення цього напрацювання (відповідає інтенсивності відмов для неремонтованих виробів, але включає повторні відмови). Дорівнює відношенню математичного очікування числа відмов за досить мале напрацювання об'єкта до значення цього напрацювання:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{r(t)\Delta t - r(t)\}}{\Delta t}. \quad (7.22)$$

В цій формулі Δt – малий відрізок часу (напрацювання), $r(t)$ – число відмов, що настали від початкового моменту до досягнення напрацювання t . Різниця $r(t + \Delta t) - r(t)$ дорівнює числу відмов на відрізку $[t, t + \Delta t]$.

Середній параметр потоку відмов – відношення математичного очікування числа відмов відновлюваного об'єкта за кінцеве напрацювання до значення цього напрацювання. Статистичну оцінку для параметра потоку відмов $\mu(t)$ визначають за формулою

$$\hat{\mu}(t) = \frac{r(t_2) - r(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (7.23)$$

Для стаціонарних потоків можна застосовувати формулу:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{\hat{T}}, \quad (7.24)$$

де $\hat{T}$ – оцінка для середнього напрацювання на відмову.

7.1.2. Довговічність

Довговічність – властивість об'єкта зберігати свою працездатність протягом усього періоду експлуатації (до граничного стану) при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. При оцінці довговічності враховуються ті перерви в роботі машини, які здійснюються відповідно до системи планово – запобіжного ремонту (ПЗР) або при здійсненні ремонту за станом (ремонт на основі діагностування фактичного стану машини). Об'єкт може перейти в граничний стан, залишаючись працездатним, якщо, наприклад, його подальше застосування за призначенням стане неприпустимим за вимогами безпеки, економічності та ефективності.

Показниками довговічності є:

Гамма – відсотковий ресурс – сумарне напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , виражений у відсотках.

Середній ресурс – математичне очікування ресурсу.

Гамма – відсотковий термін служби – календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , вираженої у відсотках.

Середній термін служби – математичне очікування терміну служби.

При використанні показників довговічності слід указувати початок відліку і вид дій після настання граничного стану (наприклад, гамма – відсотковий ресурс від другого капітального ремонту до списання). Показники довговічності, відлічувані від введення об'єкта в експлуатацію до остаточного зняття з експлуатації, називаються гамма – відсотковим повним ресурсом (термін служби), середнім повним ресурсом (термін служби).

Більшість показників довговічності аналогічна показникам безвідмовності невідновлюваних об'єктів, якщо у визначеннях момент настання першої відмови замінити на момент досягнення граничного стану.

Технічний ресурс (скорочено ресурс) – напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або поновлення експлуатації після ремонту до граничного стану. Ресурс виражається в одиницях часу роботи (зазвичай в годинах), довжини шляху (у кілометрах) і в одиницях випуску продукції. Для невідновлюваних виробів поняття технічного ресурсу і напрацювання до відмови збігаються.

Термін служби – календарне напрацювання до граничного стану. Зазвичай виражають у роках.

Гамма – відсотковий ресурс визначають як сумарне напрацювання, протягом якого в заданих режимах і умовах застосування об'єкт не досягає граничного стану з імовірністю γ , вираженою у відсотках. При статичних оцінках:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}; TP_{\gamma\%} \cdot \frac{N(t)}{N} = \frac{\gamma}{100}. \quad (7.25)$$

Для імовірнісної оцінки:

$$\int_t^\infty f(t)dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (7.26)$$

Гамма – відсотковий ресурс є, зокрема, основним розрахунковим показником підшипників кочення, що поширюється на інші деталі. До суттєвих переваг цього показника відносяться можливість його визначення до завершення випробування всіх зразків, а також позитивну кількісну характеристику випадків ранніх пошкоджень та ін. Для виробів серійного і масового виробництва, зокрема для підшипників кочення, найчастіше використовують 90 %-ий ресурс. Для підшипників досить відповідальних виробів γ – ресурс вибирають у розмірі 95 % і вище. Якщо відмова небезпечна для життя людей, γ – ресурс наближають до 100 %.

Середній ресурс являє собою середнє напрацювання об'єкта від початку експлуатації або його поновлення після попереджувального ремонту до настання граничного стану. В експлуатації досить важливо так підібрати параметри об'єкта за потужністю, стратегією технічного обслуговування і ремонту, режимами роботи, щоб термін служби і строк спрацьовування ресурсу збігалися. Напрацювання на відмову, так і напрацювання між відмовами мають значний статистичний розкид. Аналогічний розкид мають також ресурс і термін служби.

Оскільки середній і капітальний ремонт дозволяють частково або повністю відновити ресурс, то відлік н напрацювання при рахуванні

ресурсу відновляють по закінченню такого ремонту, розрізняючи у зв'язку із цим доремонтний, міжремонтний, післяремонтний і повний (до списання) ресурс. Термін, що зустрічається досить часто, «технічний ресурс» являє собою запас можливого напрацювання об'єкту. Повний ресурс відраховують від початку експлуатації об'єкта до його переходу в граничний стан, відповідно до остаточного припинення експлуатації.

Аналогічно вводять *гамма* – *відсотковий термін служби* – календарну тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягає граничного стану з вираженої у відсотках імовірністю γ . Стосовно крупносерійних об'єктів і масових комплектуючих виробів зазвичай використовують поняття *середнього ресурсу* і *середнього терміну служби*. У термінах імовірнісних моделей ці показники дорівнюють математичним очікуванням сумарного напрацювання і календарної тривалості до досягнення граничного стану. При застосуванні показників довговічності вказують початок відліку і вид дій після настання граничного стану (наприклад, *гамма* – *відсотковий ресурс* від другого капітального ремонту до списання). Показники довговічності, відлічувані від уведення об'єкта в експлуатацію до остаточного зняття з експлуатації, називають *гамма* – *відсотковим повним ресурсом*, *середнім повним ресурсом* і т. п.

Призначений термін служби і призначений ресурс є техніко – експлуатаційними характеристиками і не відносяться до показників надійності (показникам довговічності). Однак при встановленні призначеного терміну служби й призначеного ресурсу беруть до уваги прогнозовані (або досягнуті) значення показників надійності. Якщо встановлена вимога безпеки, то призначений термін служби (ресурс) повинен відповідати значенням імовірності безвідмовної роботи по відношенню до критичних відмов, близьких до одиниці. З міркувань безпеки може бути також уведений коефіцієнт запасу за часом.

Ціль встановлення призначеного терміну служби і призначеного ресурсу – забезпечити примусове завчасне припинення застосування об'єкта за призначенням, виходячи з вимог безпеки або техніко – економічних міркувань. Для об'єктів, що підлягають тривалому зберіганню, може бути встановлений призначений строк зберігання, після закінчення якого подальше зберігання неприпустиме, наприклад, з вимог безпеки.

При досягненні об'єктом призначеного ресурсу (призначеного терміну служби, призначеного строку зберігання), залежно від призначення об'єкту, особливостей експлуатації, технічного стану та інших факторів об'єкт може бути списаний, спрямований у середній або капітальний ремонт, переданий для застосування не за призначенням, переконсервованій (при зберіганні) або може бути ухвалене рішення про продовження експлуатації.

7.1.3. Ремонтопридатність

Ремонтопридатність – властивість об'єкту, що полягає в пристосованості до підтримки і відновленню працездатного стану шляхом технічного обслуговування та ремонту.

Технічне обслуговування включає регламентовані в конструкторській (проектній) і (або) експлуатаційній документації операції по підтримці працездатного і справного стану. У технічне обслуговування входять контроль технічного стану, очищення, змазування й та ін.

Відновлення містить у собі ідентифікацію відмови (визначення її місця і характеру), налагодження або заміну елемента, що відмовив, регулювання і контроль технічного стану елементів об'єкту та заключну операцію контролю працездатності об'єкта в цілому.

Перевід об'єкту із граничного стану в працездатний стан здійснюється за допомогою ремонту, при якому відбувається відновлення ресурсу об'єкта в цілому. У ремонт можуть входити розбирання, дефектовка, заміна або відновлення окремих блоків, деталей і складальних одиниць, складання і т. д. Зміст окремих операцій ремонту може збігатися зі змістом операцій технічного обслуговування.

При кількісному описі цієї властивості, яка властива тільки відновлюваному об'єкту, час відновлення є випадковою величиною, що залежить від цілого ряду факторів: характеру відмови; пристосованості об'єкта (пристрою, установки та ін.) до швидкого виявлення відмови; кваліфікації обслуговуючого персоналу; наявності технічних засобів; швидкості заміни елемента, що відмовив, в об'єкті та ін. Час відновлення – це час, витрачений на виявлення, пошук причини відмови та усунення наслідків відмови.

Показниками ремонтпридатності є:

Ймовірність відновлення – ймовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкту не перевищить задане значення.

Гамма – відсотковий час відновлення – час, протягом якого відновлення працездатності об'єкту буде здійснено з імовірністю γ , вираженої у відсотках.

Середній час відновлення – математичне очікування часу відновлення працездатного стану об'єкту після відмови.

Інтенсивність відновлення – умовна щільність імовірності відновлення працездатного стану об'єкту, певна для розглянутого моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не було завершено.

Середня трудомісткість відновлення – математичне очікування трудомісткості відновлення об'єкту після відмови.

7.1.4. Збереженість

Збереженість – властивість об'єкту зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатності об'єкту виконувати необхідні функції, протягом і після зберігання і (або) транспортування.

Вимоги до показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності для об'єкту, що зазнає тривалого зберігання, повинні вказуватися в технічному завданні і в окремих випадках можуть бути знижені відносно рівня вимог на новий об'єкт, що не перебував на зберіганні.

Слід розрізняти збереженість об'єкту до введення в експлуатацію і збереженість об'єкта в період експлуатації (при перервах у роботі). У другому випадку термін зберігання входить складовою частиною в термін служби.

Залежно від особливостей і призначення об'єктів термін зберігання до введення об'єкту в експлуатацію може містити в собі термін зберігання в упакованому і (або) законсервованому виді, строк монтажу і (або) строк зберігання на іншому впакованому та (або) законсервованому більш складному об'єкті.

Показниками збереженості є:

Гамма – відсотковий термін зберігання (Gamma – percentile storage time) – термін зберігання, що досягається об'єктом із заданою ймовірністю γ , вираженої у відсотках.

Середній термін зберігання – математичне очікування терміну зберігання.

Гамма – відсотковий термін зберігання визначають як строк зберігання, протягом якого параметри об'єкту, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції, будуть залишатися в межах, що задаються з умов збереженості, з вираженою у відсотках імовірністю γ .

7.1.5. Комплексні показники надійності

На відміну від одиничного показника надійності комплексний показник надійності кількісно характеризує не менш двох властивостей, що складають надійність, наприклад безвідмовність і ремонтпридатність. Комплексні показники застосовують в основному для автоматичних комплексів і складних систем і є кількісною характеристикою готовності об'єкту до виконання необхідних функцій. До комплексних показників надійності відносяться:

Коефіцієнт готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкту за призначенням не передбачається:

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B}, \quad (7.27)$$

де T – середнє напрацювання на відмову; T_B – середній час відновлення.

Коефіцієнт готовності характеризує готовність об'єкту до застосування за призначенням тільки відносно його працездатності в довільний момент часу. Це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкту за призначенням не передбачається. Коефіцієнт визначають як відношення математичних очікувань часу знаходження в працездатному стані до математичних очікувань суми цього часу і часу позапланових ремонтів.

Статистично визначається також з рівняння:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{NT_{\text{прац.}}}, \quad (7.28)$$

де τ_i – сумарний час перебування i -го об'єкту в працездатному стані; $T_{\text{прац.}}$ – тривалість експлуатації об'єкту, що складається із суми інтервалів, що чергуються, часу роботи і відновлення; N – число об'єктів, що перебувають на випробуванні.

Коефіцієнт оперативної готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається, і, починаючи із цього моменту, буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу

$$K_{o.z.}(t, \tau) = K_{\Gamma}(t)P(\tau), \quad (7.29)$$

де $K_{\Gamma}(t)$ – коефіцієнт готовності; $P(\tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи об'єкту в момент часу τ .

Коефіцієнт оперативної готовності характеризує надійність об'єктів, необхідність застосування яких виникає в довільний момент часу, після якого потрібна певна безвідмовна робота. До цього моменту такі об'єкти можуть перебувати як у режимі чергування, так і в режимі застосування –

для виконання інших робочих функцій. В обох режимах можливе виникнення відмов і відновлення працездатності об'єкту.

Коефіцієнт технічного використання – відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкту в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкту в працездатному стані і простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той же період.

Цей показник характеризує ті ж властивості, що й коефіцієнт готовності, але враховує додатково попереджувальні ремонти і являє собою відношення математичного очікування часу перебування об'єкту в працездатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних очікувань часу перебування об'єкту в працездатному стані, часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і часу ремонтів за той же період експлуатації. Статистично визначається з рівняння:

$$K_{m.v.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^m t_{mj} + \sum_{k=1}^r t_{rk}}, \quad (7.30)$$

де t_{pi} – тривалість i -го інтервалу перебування об'єкту в працездатному стані; t_{mj} – тривалість j -го простою об'єкта на технічному обслуговуванні; t_{rk} – тривалість k -го простою об'єкта на ремонті; n – число інтервалів перебування об'єкту в працездатному стані; m і r – відповідно числа простоїв об'єкту на технічному обслуговуванні й ремонті.

Коефіцієнт збереження ефективності – відношення значення показника ефективності використання об'єкту за призначенням за певну тривалість експлуатації до номінального значення цього показника, обчисленому за умови, що відмови об'єкту протягом того ж періоду не виникають.

Деякі комплексні показники надійності відносяться до примежової області, що поєднує фактори надійності, технологічної й економічної ефективності. Останнім часом починають використовувати комплексні показники, що включають чисто економічні фактори. Наприклад, у деяких програмах підвищення надійності поряд зі стандартними показниками надійності введений показник – «сумарна вартість життєвого циклу». Цей техніко – економічний показник містить у собі витрати на забезпечення і підтримку надійності об'єкту на всіх етапах життєвого циклу, починаючи із проектування і закінчаючи демонтажем або ліквідацією.

7.2. Основні залежності надійності

7.2.1. Надійність у період нормальної експлуатації

У більшості випадків інтенсивність відмов змінюється в часі немонотонно (рис. 7.2). Після періоду припрацювання $0 < t < T_{np}$ настає відносно тривалий етап, коли інтенсивність відмов зберігає приблизно постійне значення (крива 1). Починаючи з моменту $t = T_{cm}$, внаслідок зношування, старіння, нагромадження ушкоджень та ін. інтенсивність відмов зростає. Зустрічаються випадки, коли на початковій стадії припрацювання інтенсивність відмов зростає (крива 2). Такі залежності можуть бути описані за допомогою функції:

$$P(t) = \sum_k p_k P_k(t), \quad \sum p_k = 1. \quad (7.31)$$

Ця модель описує суміш k елементів з ймовірностями безвідмовної роботи $P_k(t)$ й відносними частками p_k . Група дефектних елементів має малий середнє напрацювання до відмови і швидке «старіння». Внеску цієї групи відповідає початкова ділянка кривої 2 на рис. 7.2.

У період нормальної експлуатації поступові відмови ще не проявляються і надійність характеризується раптовими відмовами. Причина виникнення раптових відмов залежить від рівня зовнішніх дій.

Розглянемо деякий період часу роботи виробу $t = T$, (рис. 7.3, а), після якого на ділянці Δt будемо оцінювати ймовірність виникнення відмови. Позначимо через події A і B безвідмовну роботу виробу на відрізках часу t і Δt . Ймовірність виникнення кожної із цих подій, тобто ймовірності безвідмовної роботи за час t і час Δt будуть відповідно $P(t)$ і $P(\Delta t)$.

Складна подія – безвідмовна робота виробу за час $(t + \Delta t)$ буде добутком зазначених подій $A \cdot B$, тому що для цього повинно бути спільне виконання двох подій: виріб повинний працювати безвідмовно і на відрізок t і на відрізок Δt . Ймовірність цієї події буде $P(t + \Delta t)$.

Ймовірність події B за умови виконання події A , тобто $P(B/A) = P(\Delta t/t)$ означає умовну ймовірність безвідмовної роботи виробу за період часу Δt . Застосовуючи теорему множення для розглянутого випадку, отримаємо

$$P(t + \Delta t) = P(t)P(\Delta t/t). \quad (7.32)$$

За визначенням інтенсивності відмов λ буде рівна

$$\lambda = \frac{F(\Delta t/t)}{\Delta t} = \frac{1 - P(\Delta t/t)}{\Delta t}. \quad (7.33)$$

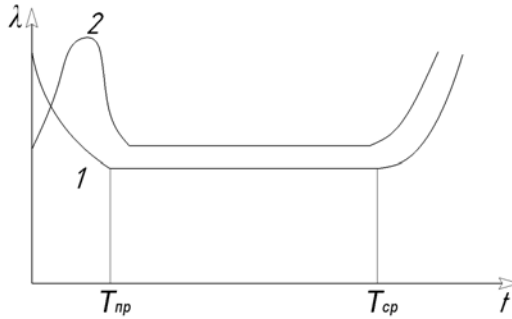


Рис. 7.2. Інтенсивність відмов як функція напрацювання:
 1 – типовий випадок;
 2 – при наявності групи швидко «старіючих» елементів

Підстановкою в (7.33) значення $P(\Delta t / t)$ з (7.32) при $\Delta t \rightarrow 0$ отримаємо

$$\lambda = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} [\ln P(t)]. \quad (7.34)$$

Звідси виходить

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (7.35)$$

Ця формула виражає залежність між ймовірністю безвідмовної роботи виробу й λ – характеристикою, яка в загальному випадку може бути функцією часу $\lambda(t)$. Інтенсивність відмов не є самостійною характеристикою, тому що пов'язана з $P(t)$ і щільністю ймовірності $f(t)$. Як відомо

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (7.36)$$

Тому з (7.34) виходить

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (7.37)$$

Отже, із трьох функцій λ , f і P досить знати одну, щоб, користуючись рівняннями (7.36) і (7.37), знайти інші дві.

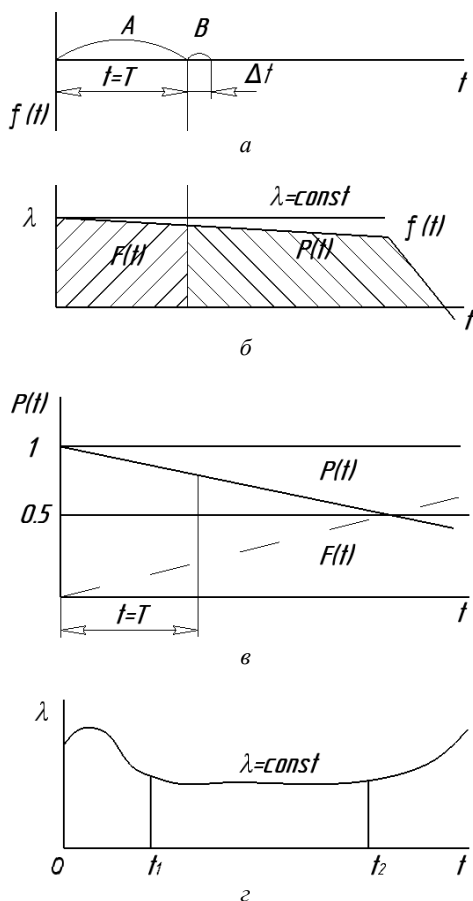


Рис. 7.3. Експонентний закон надійності при раптових відмовах:
 а – схема виникнення відмови; б – щільність ймовірності;
 в – ймовірність безвідмовної роботи; г – крива інтенсивності відмов

Раптові відмови викликаються несприятливим збігом багатьох обставин і тому мають постійну інтенсивність, яка не залежить від віку виробу: $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, де $\lambda = 1/mt$; mt – середнє напрацювання до відмови (зазвичай в годинах). Тоді λ виражається числом відмов у годину і, як правило, становить малу дріб.

Ймовірність безвідмовної роботи підкоряється експонентному закону розподілу часу безвідмовної роботи та однакова за будь – який однаковий проміжок часу в період нормальної експлуатації

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t} . \quad (7.38)$$

Експонентним законом розподілу можна апроксимувати час безвідмовної роботи широкого кола об'єктів (виробів): особливо відповідальних машин, експлуатованих у період після закінчення припрацювання й до істотного прояву поступових відмов; елементів апаратури; машин з послідовною зміною деталей, що відмовили; машин разом з електро – і гідроустаткуванням і системами управління та ін.; складних об'єктів, що складаються з багатьох елементів (при цьому час безвідмовної роботи кожного може не бути розподілений за експонентним законом, потрібно тільки, щоб відмови одного елемента, що не підкоряється цьому закону, не домінували над іншими).

Розглянемо приклади несприятливої комбінації умов роботи деталей машин, що викликає їхню раптову відмову (поломку).

1. Для зубчастої передачі дія максимального пікового навантаження на найбільш слабкий зуб при його зачепленні у вершині і при взаємодії із зубом сполученого колеса, при якій похибки кроків зводять до мінімуму або виключають участь у роботі другої пари зубів. Такий випадок може зустрітись тільки через багато років експлуатації або не зустрітись зовсім.

2. Дія максимального пікового навантаження при положенні найбільш ослаблених граничних волокон валу в площині навантаження, що викликає поломку валу.

Істотна перевага експонентного розподілу – його простота: він має тільки один параметр. Якщо, зазвичай, $\lambda t \leq 0,1$, то формула для ймовірності безвідмовної роботи спрощується в результаті розкладання в ряд і відкидання малих членів:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t . \quad (7.39)$$

Щільність розподілу (у загальному випадку) дорівнює:

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} . \quad (7.40)$$

Функція розподілу:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = 1 - \exp(-\lambda t) . \quad (7.41)$$

Ймовірність відмови:

$$Q(t) = \int f(t) dt = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (7.42)$$

Середній наробок до відмови:

$$T_0 = M(t) = \int_0^{\infty} P(t) dt = 1 / \lambda. \quad (7.43)$$

Дисперсія наробку до відмови:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt = 1 / \lambda^2. \quad (7.44)$$

Середньоквадратичне відхилення наробку до відмови:

$$\sigma(t) = T_0. \quad (7.45)$$

Функції $P(t)$ і $F(t)$ та крива інтенсивності відмов зображені на рис. 7.3. Значення ймовірності безвідмовної роботи залежно від $\lambda(t)t \approx t/m_t$; наведено в таблиці 7.2.:

Т а б л и ц я 7.2

Значення ймовірності безвідмовної роботи залежно від $\lambda(t)t \approx t/m_t$

$\lambda(t)t$	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999

Для забезпечення необхідної ймовірності безвідмовної роботи 0,9 або 0,99 можна використовувати тільки малу частку середнього терміну служби (відповідно 0,1 і 0,01).

При застосуванні експонентного закону звичайно вказують, що умова $\lambda = \text{const}$ зберігається лише протягом деякого періоду часу. Типова крива $\lambda(t)$ показана на рис. 7.3, з, де початковий період $(0; t)$ характеризується підвищенням інтенсивності відмов. Це зв'язують із припрацюванням виробу, коли проявляються технологічні дефекти. Другий період (t_1, t_2) , коли $\lambda = \text{const}$, називають періодом нормальної експлуатації, після чого (при $t > t_2$) починає проявлятися зношування (старіння) виробу.

Якщо робота виробу відбувається при різних режимах, а, отже, і інтенсивності відмов λ_1 (за час t_1) і λ_2 (за час t_2), в такому разі $P(t)$:

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}. \quad (7.46)$$

Ця залежність виходить з теореми множення ймовірностей.

Для визначення на підставі дослідів інтенсивності відмов оцінюють середній наробок до відмови:

$$m_i \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum t_i, \quad (7.47)$$

де N — загальне число спостережень. В такому разі

$$\lambda = 1 / \bar{t}. \quad (7.48)$$

Для системи $P_c(t) = e^{-\sum \lambda_i t}$. Якщо $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$, то

$$P_{ct}(t) = e^{-n \lambda_1 t}. \quad (7.49)$$

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи системи, що складається з елементів з ймовірністю безвідмовної роботи за експонентним законом, також підкоряється експонентному закону, причому інтенсивності відмов окремих елементів складаються.

Використовуючи експонентний закон розподілу, нескладно визначити середнє число виробів n , які вийдуть із ладу до заданого моменту часу, і середнє число виробів N_p , які залишаться працездатними. При $\lambda t < 0,1$,

$$n \approx N \lambda t; \quad N_p = N(1 - \lambda t). \quad (7.50)$$

Приклад. Оцінити ймовірність $P(t)$ відсутності раптових відмов механізму протягом $t = 10\,000$ год, якщо інтенсивність відмов становить $\lambda = 1/m_i = 10^{-8} 1/\text{ч}$.

Рішення. Оскільки $\lambda t = 10^{-8} \cdot 10^4 = 10^{-4} < 0,1$, то користуємося наближеною залежністю $P(t) = 1 - \lambda t = 1 - 10^{-4} = 0,9999$.

Розрахунок за точною залежністю $P(t) = e^{-\lambda t}$ у межах чотирьох знаків після коми дає точний збіг.

7.2.2. Надійність у період поступових відмов

Модель формування поступових відмов. На рис. 7.4 показана схема зміни вихідного параметру X у часі і формування закону надійності $f(t)$. Відмова виникне при досягненні гранично припустимого значення X_{max} через випадковий проміжок часу роботи виробу $t = T$.

При застосуванні експонентного закону звичайно вказують, що умова $\lambda = \text{const}$ зберігається лише протягом деякого періоду часу. Типова крива $\lambda(t)$ показана на рис. 7.3, *з*, де початковий період $(0; t)$ характеризується підвищенням інтенсивності відмов. Це зв'язують із припрацюванням виробу, коли проявляються технологічні дефекти. Другий період (t_1, t_2) , коли $\lambda = \text{const}$, називають періодом нормальної експлуатації, після чого (при $t > t_2$) починає проявлятися зношування (старіння) виробу.

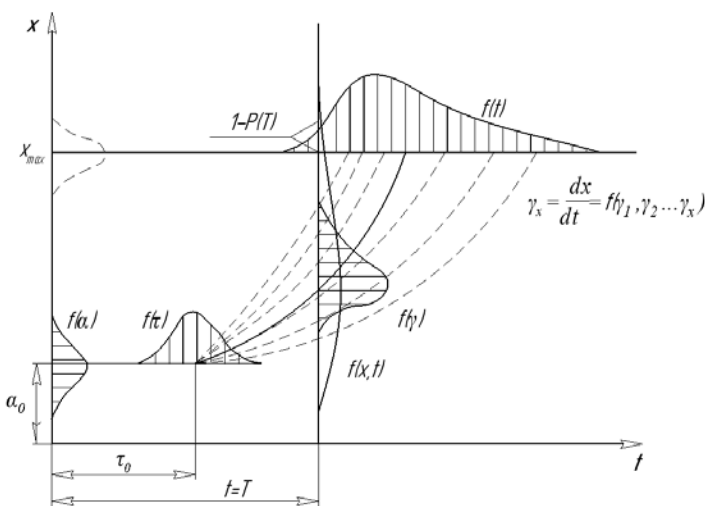


Рис. 7.4. Загальна схема формування відмови

При $t = 0$ має місце розсіювання параметрів виробу $f(a)$ щодо свого математичного очікування a_0 . Це пов'язано з розсіюванням початкових показників нової машини, з можливістю її роботи при різних режимах і із протіканням таких процесів, як вібрація, деформація та ін., які проявляються відразу ж при роботі машини. Потім на погіршення параметрів виробу в процесі експлуатації позначаються процеси, що повільно протікають, наприклад, зношування. У загальному випадку процес зміни параметра може початися через деякий проміжок часу τ_0 .

який так само є випадковою величиною і пов'язаний з нагромадженням ушкоджень (наприклад, втомних) або з дією зовнішніх причин.

Процес зміни параметра X зі швидкістю γ_x також є випадковим і залежить від зміни ушкоджень окремих елементів виробу (їх зношування зі швидкістю $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$).

У результаті всіх цих явищ відбувається формування закону розподілу $f(t)$, який визначає ймовірність виходу параметру X за межу X_{max} , тобто ймовірність відмови дорівнює:

$$F(t) = 1 - P(t). \quad (7.51)$$

У загальному випадку значення X_{max} також може мати розсіювання.

Якщо процес зміни параметру починається відразу ($\tau_0 = 0$), то отримуємо типову схему виникнення поступової параметричної відмови. Якщо при досягненні X_{max} буде різке зростання $X(t)$, то, як правило, виникне відмова функціонування. Якщо в процесі формування відмови основну роль відіграє виникнення (зародження) процесу, тобто функція $f(\tau)$, а потім процес протікає з великою інтенсивністю $X(t) \rightarrow \infty$, то отримуємо модель раптової відмови.

Для поступових відмов потрібні закони розподілу часу безвідмовної роботи, які дають спочатку низьку щільність розподілу, потім максимум і далі падіння, пов'язане зі зменшенням числа працездатних елементів.

Нормальний розподіл є найбільш універсальним, зручним і широко застосовуваним для практичних розрахунків (рис. 7.5). Нормальний розподіл підкоряється напрацювання до відмови багатьох відновлюваних і невідновлюваних виробів, розміри і помилки вимірів деталей і т. д. Щільність розподілу:

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S^2}}. \quad (7.52)$$

Розподіл має два незалежні параметри: математичне очікування m_t і середнє квадратичне відхилення S . Значення параметрів m_t і S оцінюють за результатами випробувань за формулами:

$$m_t \approx \bar{t} = \sum t_i / N; \quad (7.53)$$

$$S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (t_i - \bar{t})^2}, \quad (7.54)$$

де $\bar{t}$ і s – оцінки математичного очікування і середнього квадратичного відхилення. Зближення параметрів і їх оцінок збільшується зі збільшенням числа випробувань. Іноді зручніше оперувати з дисперсією $D = S^2$.

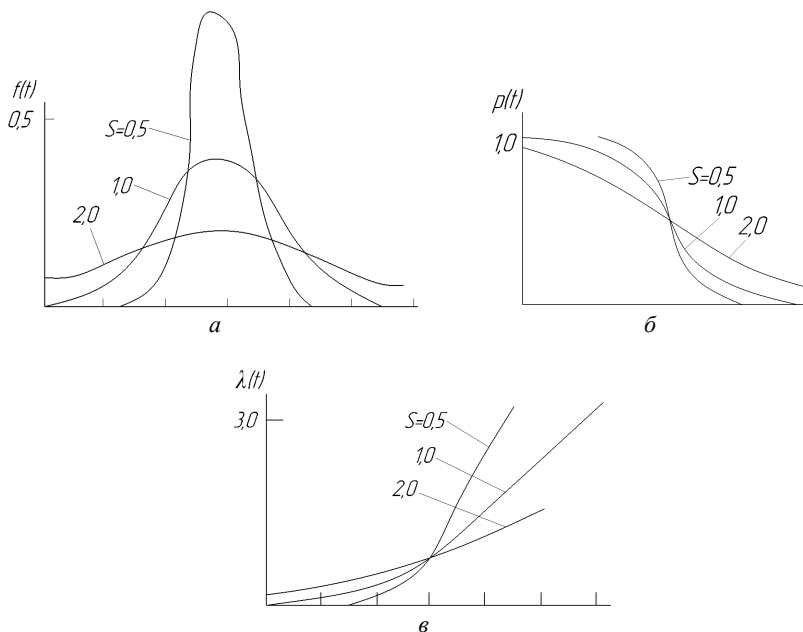


Рис. 7.5. Основні характеристики нормального розподілу при різних значеннях середнього квадратичного відхилення:
 а – щільність ймовірності $f(t)$; б – ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$;
 в – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Крива щільності розподілу тим гостріше і вище, чим менше S . Вона починається від $t = -\infty$ і поширюється до $t = +\infty$. Це не є істотним недоліком, особливо якщо $m_t \geq 3S$, тому що площа, окреслена гілками кривої щільності, що йдуть у нескінченність, яка виражає відповідну ймовірність відмов, дуже мала. Так, ймовірність відмови за період часу до $m_t - 3S$ становить усього 0,135 % і звичайно не враховується в розрахунках. Ймовірність відмови до $m_t - 2S$ дорівнює 2,175 %. Найбільша ордината кривої щільності розподілу дорівнює $0,399 / S$.

Обчислення інтегралів функції розподілу можна замінити використанням таблиць. Таблиці для нормального розподілу у функції $(t - m_t)$ і S були б громіздкими, тому що мали б два незалежні параметри.

Можна обійтися невеликими таблицями для нормального розподілу, у якого $m_x = 0$ і $S_x = 1$. Для цього розподілу функція щільності

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (7.55)$$

має одну змінну x . Величина x є центрованою, тому що $m_x = 0$, і нормованою, тому що $S_x = 1$. Функція щільності розподілу записується у відносних координатах з початком на осі симетрії петлі.

Функція розподілу – інтеграл від щільності розподілу:

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x f_0(x) dx. \quad (7.56)$$

Із цього рівняння виходить, що

$$F_0(x) + F_0(-x) = 1, \quad (7.57)$$

звідси

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x). \quad (7.58)$$

Для використання таблиць слід застосовувати підстановку $x = (t - m_t)/S$; при цьому x називається *квантилем нормованого нормального розподілу* і зазвичай позначається u_p . Щільність розподілу та ймовірність безвідмовної роботи відповідно

$$f(t) = f_0(x)/S; \quad (7.59)$$

$$Q(t) = F_0(x); \quad (7.60)$$

$$P(t) = 1 - F_0(x), \quad (7.61)$$

де $f_0(x)$ і $F_0(x)$ беруть за таблицями. Приклад наведено в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

Таблиця для нормального розподілу функції

x	0	1	2	3	4
$f_0(x)$	0,3989	0,2420	0,0540	0,0044	0,0001
$F_0(x)$	0,5	0,8413	0,9772	0,9986	0,9999

У таблицях наведені безпосередньо значення $P(t)$ залежно від $x = u_p = (t - m_t)/S$ у вживаному діапазоні. У літературі по надійності часто замість інтегральної функції розподілу $F_0(x)$ користуються функцією Лапласа:

$$\Phi(x) = \int_0^x f_0(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (7.62)$$

Вочевидь, що

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^0 f_0(x)dx + \int_0^x f_0(x)dx = 0,5 + \Phi(x). \quad (7.63)$$

Ймовірність відмови та ймовірність безвідмовної роботи, виражені через функції Лапласа, що відрізняються межами інтегрування, мають вигляд:

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right); \quad (7.64)$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right). \quad (7.65)$$

Порівнюючи вироби з однаковим середнім напрацюванням до відмови і різним середнім квадратичним відхиленням S , потрібно підкреслити, що хоча при більших S і є екземпляри з великою довговічністю, але чим менше S , тим багато краще вироби.

Крім завдання оцінки ймовірності безвідмовної роботи за даний час або за дане напрацювання зустрічається зворотне завдання – визначення часу або напрацювання, відповідно до заданої ймовірності безвідмовної роботи. Значення цього напрацювання (часу) визначають за допомогою квантилей нормованого нормального розподілу:

$$t = m_t + u_p S. \quad (7.66)$$

Значення квантилей даються в таблицях залежно від необхідної ймовірності, зокрема від ймовірності безвідмовної роботи. Приклад наведено в таблиці 7.4.

Операції з нормальним розподілом простіше, ніж з іншими, тому ним часто замінюють інші розподіли. При малих коефіцієнтах варіації S/m_t ,

нормальний розподіл добре замінює біноміальний, пуассоновий й логарифмічно нормальний.

Таблиця 7.4

Значення квантилей залежно від необхідної ймовірності

$P(t)$	0,5	0,90	0,95	0,99	0,999	0,9999
u_p	0	-1,282	-1,645	-2,326	-3,090	-3,719

Розподіл суми незалежних випадкових величин $U = X + Y + Z$, називаний *композицією розподілів*, при нормальному розподілі доданків також є нормальним розподілом. Математичне очікування й дисперсія композиції відповідно дорівнюють:

$$m_u = m_x + m_y + m_z; \quad (7.67)$$

$$S_u^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2, \quad (7.68)$$

де m_x, m_y, m_z – математичні очікування випадкових величин X, Y, Z , S_x^2, S_y^2, S_z^2 – дисперсія тих же величин.

Приклад 1. Оцінити ймовірність $P(t)$ безвідмовної роботи протягом $t = 1,5 \cdot 10^4$ год. рухливого сполучення, що зношується, якщо ресурс по зношуванню підкоряється нормальному розподілу з параметрами $m_t = 4 \cdot 10^4$ год., $S = 10^4$ год.

Рішення.

Знаходимо квантиль $u_p = \frac{1,5 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4}{10^4} = -2,5$; за таблицями визначаємо,

що $P(t) = 0,9938$.

Приклад 2. Оцінити 80%-ний ресурс $t_{0,8}$ деталі, якщо відомо, що її довговічність обмежена за зношуванням, ресурс підкоряється нормальному розподілу з параметрами $m_t = 10^4$ год, $S = 6 \cdot 10^3$ год.

Рішення.

Якщо $P(t) = 0,8$; $u_p = -0,84$:

$$t_{0,8} = m_t + u_p S = 10^4 - 0,84 \cdot 6 \cdot 10^3 \approx 5 \cdot 10^3 \text{ год.}$$

Усічений нормальний розподіл виходить із нормального при обмеженні інтервалу зміни випадкової величини. Він, зокрема, вносить уточнення в розрахунки надійності в порівнянні з нормальним розподілом при великих значеннях коефіцієнта варіації:

$$v = S / m_t. \quad (7.69)$$

Функція щільності розподілу записується так само, як щільність нормального розподілу, але з коефіцієнтом пропорційності c :

$$f(t) = \frac{c}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2S^2}}, \quad (7.70)$$

де t_0 – значення випадкової величини, відповідне до максимуму $f(t)$ і називане модою.

Коефіцієнт c для розподілу, обмеженого межами зміни t від a до b , визначається за умови

$$\int_a^b f(t)dt = 1 = c[F(b) - F(a)], \quad (7.71)$$

де $F(b)$ і $F(a)$ – значення функції нормального розподілу для граничних значень t . Звідси

$$c = \frac{1}{F(b) - F(a)}. \quad (7.72)$$

Користуючись функцією F_0 нормального розподілу нормованої і центрованої випадкової величини, отримаємо:

$$c = \frac{1}{F_0\left(\frac{b-t_0}{S}\right) - F_0\left(\frac{a-t_0}{S}\right)} \quad (7.73)$$

Основне застосування усічених нормальний розподіл має з параметрами $a = 0$ і $b = \infty$, що відображає в задачах надійності неможливість відмов при негативних значеннях часу. В такому разі:

$$c = \frac{1}{F_0(t_0/S)}. \quad (7.74)$$

Значення c можна вибрати залежно від t_0/S (таблиця 7.5):

Таблиця 7.5

Значення c залежно від t_0/S

t_0/S	1	2	3
c	1,189	1,023	1,001

Таким чином, при $t_0 > 2S$ коефіцієнт c дуже близький до одиниці. Ймовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P(t) = c \cdot F_0 \left(\frac{t_0 - t}{S} \right). \quad (7.75)$$

Середній ресурс

$$m_t = t_0 + S f^* (t_0 / S), \quad (7.76)$$

де f^* – функція, яка визначається за таблицею в роботі.

Прикладом усічених розподілів може бути розподіл параметру якості виробів після відбраковування частини виробів за цим параметром.

У **логарифмічно нормальному розподілі** логарифм випадкової величини розподіляється за нормальним законом. Як розподіл доданих величин, він трохи точніше, ніж нормальний, описує напрацювання до відмови деталей, зокрема, за втомою. Його успішно застосовують для опису напрацювання підшипників кочення і інших виробів. Логарифмічно нормальний розподіл зручний для випадкових величин, що представляють собою добуток значного числа випадкових вихідних величин, подібно тому, як нормальний розподіл зручний для суми випадкових величин.

Щільність розподілу (рис. 7.6) описується залежністю:

$$f(t) = \frac{1}{St\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2S^2}}, \quad (7.77)$$

де μ і S – параметри, оцінювані за результатами випробувань. Так, при випробуваннях N виробів до відмови

$$\mu \approx \mu^* = \frac{\sum \ln t_i}{N}; \quad (7.78)$$

$$S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\ln t_i - \mu^*)^2}, \quad (7.79)$$

де μ^* і S — оцінка параметрів μ і S .

Ймовірність безвідмовної роботи можна визначити за таблицями для нормального розподілу залежно від значення квантилю:

$$u_p = (\ln t - m) / S \quad (7.80)$$

Математичне очікування наробку до відмови

$$m_t = e^{\mu + S^2/2}, \quad (7.81)$$

середнє квадратичне відхилення

$$S_t = \sqrt{e^{2\mu + S^2} (e^{S^2} - 1)}, \quad (7.82)$$

коефіцієнт варіації

$$v_t = S_t / m_t = \sqrt{e^{S^2} - 1}. \quad (7.83)$$

При $v_t \leq 0,3$ вважають $v_t \approx S$, при цьому помилка $\leq 1\%$.

Часто застосовують запис залежностей для логарифмічно нормального розподілу в десяткових логарифмах. Відповідно щільність розподілу дорівнює:

$$f(t) = \frac{0,4343}{S t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \lg t_0)^2}{2S^2}}. \quad (7.84)$$

Оцінки параметрів $\lg t_0$ і S визначають за результатами випробувань

$$\lg t_0 \approx \lg t_0^* = \frac{\sum \lg t_i}{N}; \quad (7.85)$$

$$S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\lg t_i - \lg t_0^*)^2}. \quad (7.86)$$

Математичне очікування m_t , середнє квадратичне відхилення S_t і коефіцієнт варіації v_t наробку до відмови відповідно дорівнюють:

$$m_t = t_0 \cdot e^{2,651S^2}; \quad (7.87)$$

$$S_t = m_t \sqrt{\left(\frac{m_t}{t_0}\right)^2 - 1}; \quad (7.88)$$

$$\nu_t = \sqrt{(m_t / t_0)^2 - 1} . \quad (7.89)$$

При $\nu_t \leq 0,3$, $\nu_t \approx 2,3S$. Для ймовірностей безвідмовної роботи $P(t) \leq 0,99$ і при $\nu_t \leq 0,3$ логарифмічно нормальний закон можна замінити нормальним законом з параметрами m_t і S_t і щільністю

$$f(t) = \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S_t^2}} . \quad (7.90)$$

Ймовірність безвідмовної роботи можна знаходити за допомогою спеціальних таблиць для цього розподілу або таблиць для нормального розподілу.

Приклад. Оцінити ймовірність $P(t)$ відсутності втомних ушкоджень валу протягом $t = 10^4$ год., якщо ресурс розподілений логарифмічно нормально з параметрами $\lg t_0 = 4,5$; $S = 0,25$.

Рішення.

$$P(t) = F_0 \left(\frac{\lg t - \lg t_0}{S} \right) = F_0 \left(\frac{\lg 10^4 - 4,5}{0,25} \right) = 0,9772 .$$

Розподіл Вейбула досить універсальний, охоплює шляхом варіювання параметрів широкий діапазон випадків зміни ймовірностей. Поряд з логарифмічно нормальним розподілом він задовільно описує напрацювання деталей по втомним пошкодженням, напрацювання до відмови підшипників. Застосовується також для оцінки надійності за припрацювальними відмовам. Розподіл характеризується наступною функцією ймовірності безвідмовної роботи (рис. 6.7):

$$P(t) = e^{-t^m / t_0} . \quad (7.91)$$

Інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} . \quad (7.92)$$

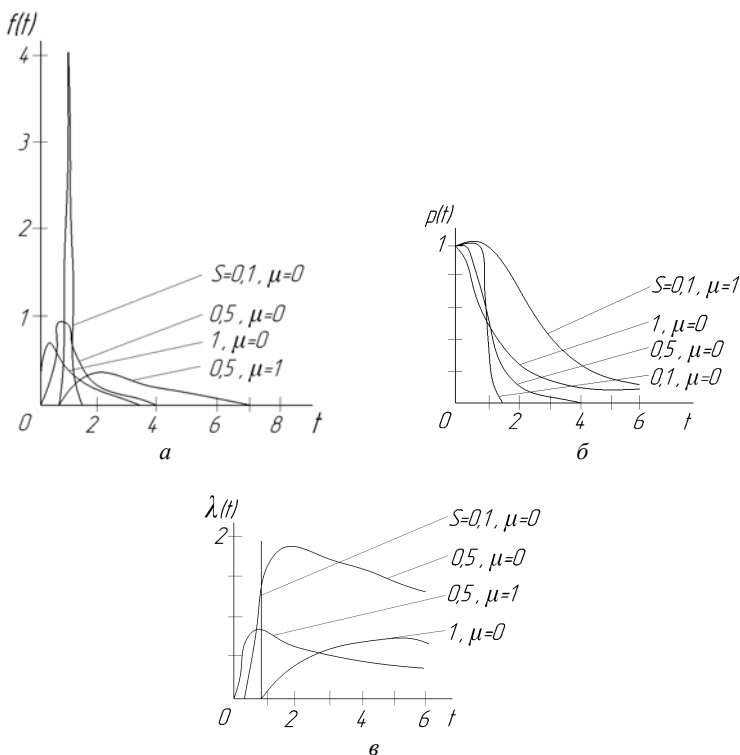


Рис. 7.6. Основні характеристики логарифмічно нормального розподілу при різних параметрах: *a* – щільність імовірності $f(t)$; *b* – ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$; *в* – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Щільність розподілу:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-t_m/t_0}. \quad (7.93)$$

Розподіл Вейбула має також два параметри: параметр форми $m > 0$ і параметр масштабу $t_0 > 0$. Іноді характеристики розподілу записуються в інших позначеннях. Ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-(t/a)^b}, \quad (7.94)$$

де $b = m$ і $a = t_0^{1/m}$.

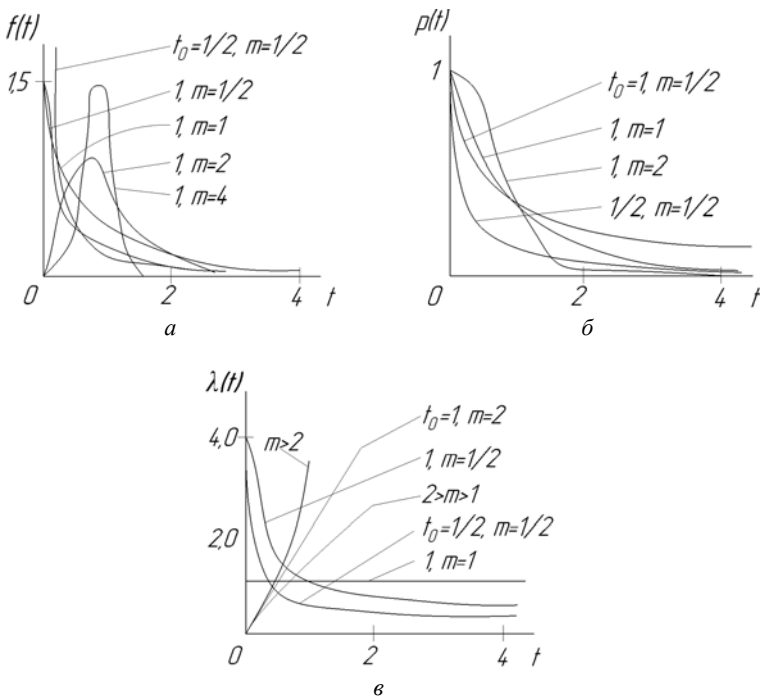


Рис. 7.7. Основні характеристики розподілу Вейбула при різних параметрах t_0 і m : а – щільність імовірності $f(t)$; б – ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$; в – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Математичне очікування й середнє квадратичне відхилення відповідно:

$$m_t = b_m t_0^{1/m}; \quad (7.95)$$

$$S_t = c_m t_0^{1/m}, \quad (7.96)$$

де b_m і c_m – табличні коефіцієнти.

Якщо протягом часу t^* відмови не наступають, то формули для характеристик надійності трохи модифікуються. Так, ймовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P(t) = e^{-\frac{(t-t^*)^m}{t_0}}. \quad (7.97)$$

Можливості та універсальність розподілу Вейбула зрозумілі з наступних пояснень.

При $m < 1$ функції $\lambda(t)$ і $f(t)$ від напрацювання до відмови спадні.

При $m = 1$ розподіл перетворюється в експонентний $\lambda(t) = \text{const}$ і $f(t)$ – спадна функція.

При $m > 1$ функція $f(t)$ – одновершинна, функція $\lambda(t)$ безупинно зростаюча при $1 < m < 2$ з опуклістю нагору, а при $m > 2$ – з опуклістю в нижній частині.

При $m = 2$ функція $\lambda(t)$ є лінійною і розподіл Вейбула перетворюється в так званий розподіл Релея.

При $m = 3,3$ розподіл Вейбула близький до нормального.

Приклад. Оцінити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ роликопідшипників протягом $t = 104 \text{ год}$, якщо ресурс підшипників описується розподілом Вейбула з параметрами $t_0 = 107 \text{ год}$, $m = 1,5$.

Рішення.

$$P(t) = e^{-t_m/t_0} = e^{-10^{41,5}/10^7} = 0,905.$$

7.2.3. Спільна дія раптових і поступових відмов

Іноді можливе виникнення як поступових, так і раптових відмов. Якщо вони проявляються як незалежні події та ймовірність безвідмовної роботи для поступових і раптових відмов відомі, то ймовірність безвідмовної роботи виробу за період t , якщо до цього він проробив час T , за теоремою множення ймовірностей дорівнює:

$$P(t) = P_e(t) P_n(t), \quad (7.98)$$

де $P_e(t) = e^{-\lambda t}$ та $P_n(t) = P_n(T+t) / P_n(T)$ – ймовірності відсутності раптових і відповідно поступових відмов.

Для системи з послідовно з'єднаних елементів ймовірність безвідмовної роботи за період t дорівнює:

$$P_{cm.}(t) = e^{-t \sum \lambda_i} \prod \frac{P_{ni}(T+t)}{P_{ni}(T)}, \quad (7.99)$$

де знаки $\sum$ і $\prod$ означають суму і добуток. Для нових виробів $T = 0$ і $P_{ni}(T) = 1$.

У початковий період роботи виробу основний вплив на $P(t)$ виявляють раптові відмови, а потім усе більше значення набувають поступові відмови.

Можливі випадки, коли має місце така схема взаємодії поступових і раптових відмов, коли старіння знижує опірність виробу раптовим відмовам. Тоді протягом деякого періоду часу T_0 , коли екстремальні пікові навантаження менше припустимих для виробу, небезпеки виникнення раптових відмов немає. При падінні припустимих значень навантаження через старіння виробу з'являється ймовірність виникнення раптової відмови.

7.3. Оцінка надійності верстатів

Показник надійності верстатів вибирають одним з наступних способів.

1. При високих вимогах до надійності виробу (верстата або його елементів і механізмів) задають припустиме значення $P(t) = \gamma, \%$, і визначають час роботи виробу $t = T_\gamma$, що відповідає даній регламентованій ймовірності безвідмовної роботи (гамма – відсотковий ресурс).

2. При звичайних вимогах до надійності (коли відмова не приводить до важких наслідків) задають ресурс виробу $t = T_p$, наприклад, за умови необхідності проведення планового ремонту верстата. У цьому випадку про надійність виробу судять безпосередньо за значенням $P(t)$, яке за відповідний період його функціонування $t = T$ є основним показником надійності.

Однак за певних умов цей показник не виконує своїх функцій, і потрібне залучення наступних додаткових показників надійності.

3. Якщо протягом даного періоду часу відмови, як правило, виникають (наприклад, легко переборні відмови, пов'язані із застряганням заготовки в транспортному лотку автоматичної лінії), тобто $P(t) \rightarrow 0$, то характеристикою безвідмовності буде служити середнє число відмов у даному інтервалі часу від 0 до T (так звана провідна функція) або *параметр потоку відмов*.

4. Якщо за розглянутий проміжок часу відмови неприпустимі, тобто $P(t) \rightarrow 1$, то для оцінки безвідмовності слід прийняти показник запасу надійності K_n по відношенню до заданого вихідного параметру верстата X . Для визначення запасу надійності об'єкта в цей момент часу $t = T_l$ необхідно встановити найбільше (екстремальне) значення $X_{ек}$ вихідного параметра X , яке він може набувати при роботі верстата у всьому діапазоні припустимих умов і режимів експлуатації. Якщо гранично припустиме значення параметра $X_{max} > X_{ек}$, то запас надійності за даним параметром X дорівнює

$$K_n = X_{max} / X_{ек} > 1. \quad (7.100)$$

Запас надійності можна підрахувати так само, як відношення X_{max} до такого значення параметра X_g , при якому з ймовірністю γ параметр не вийде за дані межі, тобто

$$K_n = X_{max} / X_g . \quad (7.101)$$

Запас надійності за вихідним параметром точності є одним з основних показників при оцінці надійності прецизійних верстатів. Показники безвідмовності зведені в табл. 7.6.

Показники довговічності пов'язані з оцінкою ресурсу верстата за показником точності з урахуванням витрат часу на відновлення працездатності, що втрачається при експлуатації. Для характеристики цих витрат застосовують коефіцієнт технічного використання $K_{m.в.}$.

Таблиця 7.6

Показники безвідмовності роботи об'єкту

Наявність відмов за розглянутий проміжок часу	Значення $P(t)$	Показник безвідмовності
Як, правило, мають місце	$P(t) \rightarrow 0$	ω – параметр потоку відмов
Можуть бути чи ні (рідка подія)	$P(t)$	$P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи
Неприпустимі	$P(t) \rightarrow 1$	K_n – запас надійності

Якщо відомі терміни служби (напрацювання) до ремонту або технічного обслуговування всіх основних вузлів верстату $T_1, T_2, \dots, T_n$, год, і відповідні до трудомісткості їх ремонту $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, год, тоді

$$K_{m.в.} = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{\tau_i} \quad (7.102)$$

Значення трудомісткості τ_i беруть із нормативів з ремонту й технічного обслуговування верстатів, а терміни служби T_i розраховують залежно від причин відмови (зношування, втомної міцності та ін.).

Для оцінки надійності верстатів можна застосовувати будь – які з розглянутих показників, однак найбільш доцільно застосовувати показники, зазначені в табл. 7.7.

Ресурс за точністю T_p визначають: а) на стадії проектування розрахунком верстата на надійність; б) для дослідного зразка верстата на основі випробування й прогнозування; в) для верстатів, що перебувають в

експлуатації, оцінюють фактичне значення T_p із використанням засобів контролю, діагностики і статистичних методів.

Запас надійності K_H спочатку встановлюють або визначають для нового верстата за вихідними параметрами точності; він показує, наскільки фактичні параметри, що визначають точність верстата, відрізняються від заданих граничних значень, при яких настане відмова за точністю. При роботі верстата запас надійності зменшується й при $K_H = 1$ наступає відмова за точністю. Чим більше K_H , тим вище потенційні можливості верстата по збереженню своєї працездатності.

Т а б л и ц я 7.7

Номенклатура показників для оцінки надійності верстатів

Показник, позначення	Примітка
Ймовірність безвідмовної роботи, $P(t)$	При встановленому значенні $P(t) = \gamma$, %, тривалість роботи $t = T_\gamma$ – гамма – відсотковий ресурс
Ресурс (встановлений), T_p	Визначається періодом роботи до капітального (середнього) ремонту або призначається
Запас надійності за вихідним параметром, K_H	Оцінює потенційні можливості верстату по збереженню працездатності
Коефіцієнт технічного використання	Припустимі значення $K_{т.в.}$ і визначені нормативами системи ремонту і технічного обслуговування
Напрацювання на відмову (середнє), T_o	Значення T_o визначає параметр потоку відмов ω
Коефіцієнт готовності, K_g	Оцінюють на основі експлуатаційних даних

Запас надійності K_H визначається при програмному методі випробування верстатів і його оцінка не пов'язана із тривалістю роботи верстата, як це має місце для всіх інших показників надійності.

Коефіцієнт технічного використання може бути визначений на стадії проектування на підставі розрахунків на довговічність вузлів і елементів верстата, а трудомісткість ремонту й технічного обслуговування призначають відповідно до нормативів системи ППР. При експлуатації верстату $K_{т.в.}$ визначають за фактичними витратами часу на ремонт і технічне обслуговування.

Нормативи *напрацювання на відмову T_o* встановлює виробник верстату для різних категорій відмов залежно від складності відновлення й наслідків відмови (відповідно прийнятої підприємством або галуззю класифікації) і

роздільно для механічної частини верстату, його електричних і електронних пристроїв і системи управління. Фактичні значення напрацювання на відмову визначають за статистичними даними, що отримані при експлуатації верстату.

Показники надійності нормують із урахуванням досягнутого рівня виявлених тенденцій підвищення надійності вітчизняних і закордонних аналогів, результатів досліджень і досвідно – конструкторських розробок, а також техніко – економічних можливостей промисловості. Нормування показників надійності пов'язане, у першу чергу, з аналізом відмов верстату й з оцінкою тих наслідків, до яких вони приводять.

При нормуванні показників надійності в першу чергу призначають припустиму ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ як для верстата в цілому, так і для основних його вузлів і механізмів. Прийняте значення $P(t)$ залежить від наслідків відмови, від оцінки того економічного (а в ряді випадків і соціального) збитку, який буде мати місце при виході верстату з ладу. При цьому для одного виробу (верстата або його вузла) усі елементи, що визначають його надійність, повинні бути розбиті на категорії за наслідками відмов. Наприклад, для прецизійного верстата, призначеного для обробки відповідальних деталей, до формотворних вузлів висувають високі вимоги безвідмовності, у той час як до елементів, не зв'язаних безпосередньо з точністю обробки, таких вимог немає.

Т а б л и ц я 7.8

Класи надійності

Клас надійності	Припустиме значення $P(t)$	Наслідок відмови	Приклад
0	$< 0,9$	Без значних наслідків	Елементи верстату, що не впливають на якість і продуктивність
1	$\geq 0,9$	Економічні втрати	Верстати нормальної й підвищеної точності
2	$\geq 0,99$	Значний економічний збиток	Прецизійні верстати для фінішної обробки.
3	$\geq 0,999$		Верстати або верстатні модулі в автоматичних верстатних системах.
4	$\geq 0,9999$	Катастрофічні (виготовлення відповідальної деталі з дефектом)	Верстати або верстатні модулі в автоматичних верстатних системах для виготовлення прецизійних деталей
5	1		

У табл. 7.8. наведена градація виробів за класами (категоріями) надійності залежно від наслідків відмов. Для верстата в цілому ці значення відносяться до його параметричної надійності за показником точності, тобто коли відмова означає обробку на верстаті деталі з неприпустимим значенням кожного із заданих показників якості (точності розміру й форми, хвилястості, шорсткості або дефектності обробленої поверхні).

Ресурс за точністю T_p , який визначає тривалість роботи верстату до середнього або капітального ремонту, коли потрібне відновлення координат верстату і первісних траєкторій переміщення формотворних вузлів, коливається в досить широких межах і залежить від конструкції і якості виготовлення верстата. У табл. 7.9 наведені норми надійності, розроблені у верстатобудуванні (керівний технічний матеріал РТМ2 Н00 – 14 – 80. Норми надійності) для значень ресурсу за точністю T_p і напрацюванням на відмову T_o . Призначувані показники повинні бути не нижче зазначених.

Таблиця 7.9

Норми надійності універсальних верстатів

Верстати	Клас точності	Маса верстату, т	T_p , тис. год.	T_o , тис. год.
Токарські, револьверні, фрезерні, свердлильні, розточувальні	<i>H, П</i>	≤ 10 > 10	46 50	1,0 1,1
	<i>B, A, З</i>	≤ 10 > 10	46 50	1,1 1,2
Шліфувальні	<i>П, B, A</i>	≤ 10 > 10	43 46	0,9

Для верстатів з ЧПК $K_{m.с} = 0,8 \dots 0,9$, особливо для верстатів, що працюють в автоматизованих верстатних системах. Типовим режимом для ГПС є 20 години роботи в автоматизованому режимі й 4 години на технічне обслуговування ($K_{m.с} = 0,83$).

Значення $K_{m.с}$ для універсальних верстатів з ЧПК, не включених в автоматичні системи, рекомендується мати не нижче зазначених (при двозмінній роботі) для універсальних верстатів $K_{m.с} = 0,96$, для одношпиндельних автоматів $K_{m.с} = 0,97$, для багатошпиндельних автоматів $K_{m.с} = 0,87$.

8. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

При конструюванні вузлів тертя різних класів і призначення вирішують задачу забезпечення надійності та економічності конструкції, яка не повинна допускати зайвих енергетичних витрат, бути екологічно безпечною і за довговічністю не викликати передчасних ремонтів. Вона повинна бути також технологічною у виготовленні й при експлуатації.

Необхідно використовувати попередній досвід конструювання та експлуатації вузлів тертя, а також виконувати докладний силовий аналіз конкретної конструкції для достовірного визначення не тільки сил і точок їх докладання, але і значення додаткових моментів, які мають місце, наприклад, у підшипникових вузлах через віддалення останніх від точки докладання радіальної сили, що навантажує вал. Доцільно, щоб сили, що навантажують, були прикладені на ділянці валу між підшипниками. При цьому досягаються висока твердість валу, малі кути його прогину в області встановлення підшипників і зберігається висока частота власних коливань валу.

8.1. Розвантаження поверхонь тертя

Поверхні тертя в деяких випадках можна розвантажити, додавши в конструкцію машини зміни, спрямовані на зниження діючих зусиль, або зменшивши частку навантаження, сприйманого безпосередньо контактуючими ділянками деталей. Найпростішим прикладом такого розвантаження може служити шевронна передача, коли при незафіксованому в осьовому напрямку одному з коліс осьові зусилля з напівшевронів не передаються на вали та їх опори.

У важких верстатах – карусельних та інших – розвантаження кругових напрямних столів і планшайб доцільне для підвищення надійності і довговічності опорних поверхонь та для зменшення моменту від сил тертя в періоди несталоного руху. Зменшення моменту тертя на опорній поверхні стола знижує також колювання і сприятливо відбивається на рівномірності його обертання, що досить важливо, особливо при нарізанні коліс на зубофрезерних верстатах.

Одним з методів розвантаження пар тертя є перенос частини зусиль із відповідальних тертьових поверхонь на менш відповідальні. Так,

навантаження на напрямні можливо зменшити за допомогою роликів опор на підпружинній основі (рис. 8.1) або іншими шляхами.

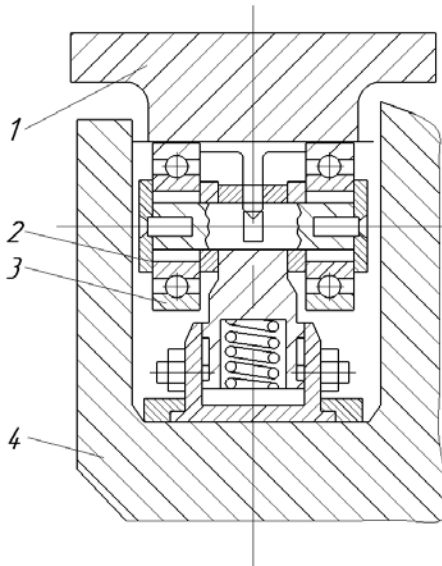


Рис. 8.1. Роликова опора для розвантаження напрямних:
1 – стіл; 2 – основа; 3 – ролик; 4 – станина верстату

У верстатах, в яких кругові напрямні зв'язані зі шпинделем, що опирається на під'ятник, можна зробити центральне розвантаження напрямних під'ятником кочення, що досягається регулюванням положення центру планшайби. У практиці експлуатації карусельних верстатів з діаметром планшайби 3000 мм при використанні цього способу обмежуються підйомом центру на 0,05 – 0,06 мм. При цій величині розвантаження значно зменшується температура напрямних і споживана потужність. При більшому підйомі планшайби під'ятником зменшується гідродинамічна підйомна сила оливних клинів.

Більш зручні і гнучкі в експлуатації гідравлічні під'ятники (домкрати). Такий під'ятник, встановлений при модернізації карусельного верстату, показаний на рис. 8.2. У склянці 2 з осьовим регулюванням посаджений поршень 4 з манжетами 5 і 7. Тиск від поршня через сферичне кільце 3 і упорний шарикопідшипник 8 передається на шпindel планшайби. Тиск оливи в системі регулюється до 6 МПа за допомогою редуційного клапана. У системі є гідроаккумулятор. Через малу витрату

оливи встановлений насос працює тільки в період зарядки акумулятора. Редукційний клапан встановлюють на певний тиск відповідно до ваги оброблюваної деталі.

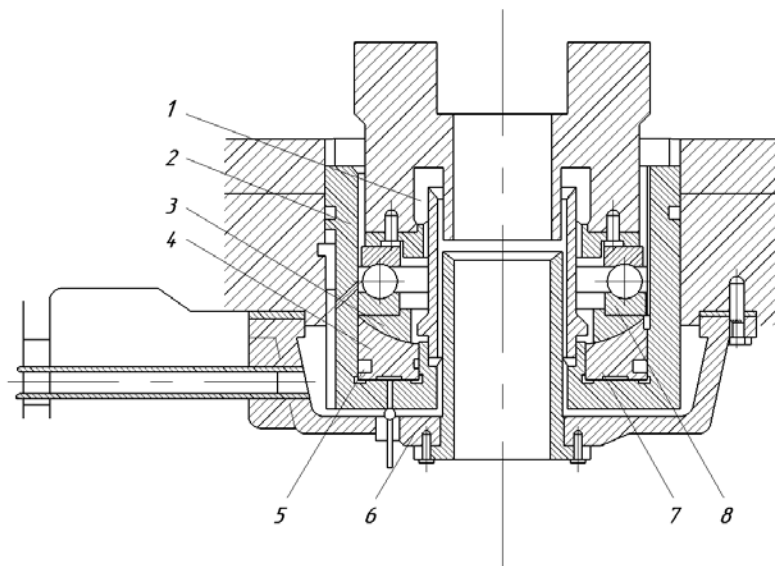


Рис. 8.2. Гідравлічний під'ятник карусельного верстату:
 1 – втулка; 2 – склянка; 3 – сферичне кільце; 4 – поршень; 5 і 7 – манжети;
 6 – канал підведення змащення; 8 – упорний підшипник

Поряд з механічним розвантаженням застосовується гідравлічна система розвантаження шляхом подачі мастильного матеріалу під надлишковим тиском на опорні поверхні. На відміну від гідростатичних підшипників, розвантаження столу з установленою заготовкою проводиться не повністю, а частково, щоб стіл при обертанні рухався плавно і не гойдався через надмірно великі проміжки в напрямних. Наприклад, при нарізанні зубчастого колеса масою понад 20 т розвантажують напрямну приблизно на $2/3$ ваги колеса.

Принцип гідростатичного розвантаження застосовується також і в поступальних парах. Так, підведення мастильного матеріалу до гідростатичних кишень опорних поверхонь стійок важких розточувальних верстатів дозволив значно зменшити тягове зусилля.

Для підвищення довговічності точних вузлів у конструкціях машин передбачають механізми для настановних рухів або для провадження робіт, які можуть бути виконані без використання точного механізму, що

відключається на цей час. Як відомо, в універсальних токарських верстатах рух супорту передається за допомогою ходового валика, а ходовий гвинт використовують тільки при нарізанні різьби.

Іноді, як, наприклад, у шпіндельних блоках багатощпіндельних токарських автоматів, встановлюють додаткові опори, на яких роблять поворот автомата в піднятому зі своїх постійних опор положенні.

8.2. Раціональне навантаження елементів пари тертя

Вирівнювання тиску на контакті сприяє стабілізації фрикційно – зносних характеристик пари тертя. Тому конструювання вузлів тертя пов'язане з рішенням наступних задач: оцінки доцільності використання точкового, лінійного або контакту по площі; вибору форми (макрогеометрія) і виду обробки (мікрогеометрія) поверхонь тертя; можливості компенсації нерівномірності навантаження за рахунок піддатливості деталей; обліку зміни навантаження внаслідок температурних деформацій. Розрахункові напруження за теорією контактних напружень Беляєва – Герца не повинні перевищувати границь текучості щоб уникнути прискореного втомного пошкодження.

Збільшення піддатливості однієї з деталей сполученого вузла або, навпаки, підвищення твердості деталі або вузла в цілому може сприятливо впливати на його довговічність. В інших випадках позитивний вплив може надати корекція форми робочих поверхонь деталей.

Конфігурація деталі. Зміною звичайної конфігурації робочих поверхонь деталей вдається в ряді випадків поліпшити роботу пар тертя. Для попередження концентрації навантаження у кінцях прямих зубів циліндричних і конічних коліс зубам надають (шляхом додаткової обробки їх бічної поверхні на спеціальних верстатах) діжкоподібну форму, при якій товщина зуба зменшується від середини шестірні до торців. Найбільша різниця товщин становить $0,02...0,04$ мм. Діжкоподібна форма зуба не тільки сприяє збільшенню довговічності передачі, але й зменшує також шум під час її роботи.

Фланкування зубів (відхилення профілю зуба біля вершини його «у тіло» від евольвенти) зменшує силу ударів при вході і виході зубів із зачеплення, обумовлених погрішностями основного кроку й деформаціями зубів. Фланкування при достатньому коефіцієнті перекриття збільшує також опір заїданню.

При встановленні підшипника кочення в корпусі з обтисненням у зоні навантаження довжиною в $130...150^\circ$ мінімальний строк їх служби підвищився в 2,7 рази зі зниженням на 22 % розсіювання довговічності й на 10 % енергетичних втрат.

На поверхнях контакту передбачають формування спеціального рельєфу, що виконує одночасно дві функції: 1) подача мастильного матеріалу в зону контакту; 2) розвиток контактної поверхні, по якій навантаження розподіляється рівномірно і яка сприяє тепловідводу.

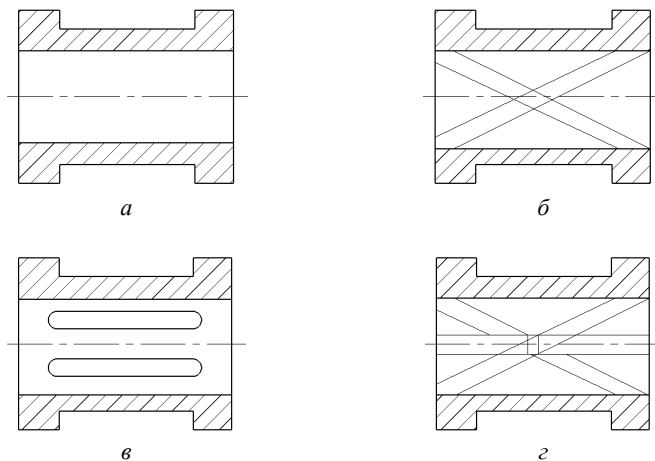


Рис. 8.3. Втулка підшипника ковзання: *а* – без мастильної канавки; *б, в, г* – з різними мастильними канавками

Так, мастильні канавки необхідно розташовувати таким чином, щоб вони не приводили до зменшення тиску в мастильному шарі в порівнянні з розрахунковим при відсутності канавки. При розташуванні поздовжньої мастильної канавки в зоні мінімального проміжку може бути порушена форма оливного клину, розрив в епюрі тиску в мастильному шарі приводить до зниження несучої здатності підшипника ковзання. При двох поздовжніх або хрестоподібних канавках (рис. 8.3, *б – г*) зниження тиску буде ще більше. Хрестоподібні або діагональні мастильні канавки з'єднують зони високого й низького тиску в мастильному шарі й сприяють витоку оливи, знижуючи несучу здатність підшипника.

Для створення оптимального мікрорельєфу поверхні тертя використовують різні технологічні методи, наприклад, електроіскрову обробку або вібронакочення. Такі методи дозволяють одержувати на контактуючих поверхнях регулярний або частково регулярний мікрорельєф у вигляді виступів і западин, що чергуються, з необхідною глибиною канавки h . Різні види мікрорельєфу, одержувані вібронакоченням, що відрізняються взаємним розташуванням регулярних нерівностей (хвилі, канавки), сприяють підвищенню зносостійкості, опору схоплюванню,

поліпшенню припрацьовуваності й інших триботехнічних властивостей, підвищенню герметичності сполучень, використовуваних, зокрема, у гумометалевих ущільненнях.

Динамічний режим навантаження помітно скорочує ресурс, збільшуючи швидкість зношування майже на 20 % у порівнянні зі статичним. Циклічний режим навантаження збільшує швидкість зношування на 40 %.

Залежно від матеріалів використовуваної фрикційної пари, амплітуди і тривалості впливу вібрацій коефіцієнт тертя в динамічному режимі в порівнянні зі статичним може змінитися в 1,5...2 рази. Зміна контактних деформацій при динамічному навантаженні веде до збільшення об'єму поверхневого шару, активізованого пружнопластичним деформуванням. Розширення активаційного об'єму поширення пружнопластичної деформації викликає, у свою чергу, підвищення інтенсивності окисного зношування і схоплювання, величина яких може зростати на порядок у порівнянні зі статичними умовами.

Для зменшення питомого навантаження збільшують кількість ділянок поверхні, по яких реалізується контакт, а для цього застосовують податливу конструкцію елемента пари тертя. Наприклад, у фрикційному диску виконують велику кількість секторів 1, а іноді прорізів 2 (рис. 8.4), які дають можливість кожний сектор розглядати як елемент, що самостійно контактує з деталлю трибосполучення.

Піддатливість деталі, загальна або місцева, дозволяє її робочій поверхні слідувати за деформацією сполученої деталі і пристосовуватися до неточності її геометричної форми. Підвищення піддатливості деталей приводить до збільшення їх зносостійкості. Самоустановлювальний опорний підшипник є найпростішим прикладом конструкції, що має деталь вільної піддатливості у вигляді вкладки, що володіє кутовою рухливістю.

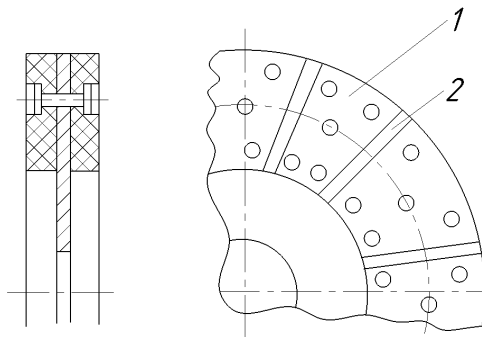


Рис. 8.4. Фрагмент диска фрикційного гальма.
Елемент, який контактує з деталлю трибосполучення: 1 - сектор; 2 – проріз

Твердість деталей. Задача підвищення зносостійкості деталей висуває свої вимоги, що ставляться не тільки до загальної, але й до місцевої твердості конструкції. Наприклад, навантажувальна здатність циліндричних і конічних зубчастих коліс тим вище, чим рівномірніше розподілене навантаження по довжині зуба. Причинами нерівномірності, крім неточності виготовлення деталей передачі і складання їх, є вигин і крутіння валів, крутіння зубчастих коліс, деформація опор і корпусів. Найбільш істотним є вплив вигину валів. На рис. 8.5 а, б наведена схема перекосу зубів шестірні і колеса, що виникає внаслідок пружної піддатливості деталей передачі під навантаженням. Якби зуби були абсолютно твердими, то перекус спричинив би за собою точкове торкання зубів у одного з торців (рис. 8.5 в). Насправді ж зуби податливі, і якщо перекус невеликий, то він повністю компенсується деформацією зубів. Сумарна деформація (рис. 8.5 г) зубів буде неоднакова по довжині, і відбудеться концентрація навантаження по ширині зубчастого колеса (рис. 8.5 д). Збільшення твердості валів, опор і корпусів є сприятливим чинником.

Однак не тільки збільшенням твердості елементів передачі можна добитися більшої рівномірності тиску уздовж зубів. Деформація зубів під навантаженням сприяє вирівнюванню тиску, тому велика піддатливість зуба є позитивною якістю. Підвищити піддатливість зуба можна, збільшивши його висоту. При даному діаметрі шестірні це досягається збільшенням модуля. Якщо ж такий захід небажаний через зменшення коефіцієнту перекриття, то можливо збільшити висоту зуба понад стандартну. Відомо застосування зубів висотою 3,042 модуля.

Наявність продуктів зношування на контакті приводить до помітного росту локальних навантажень, шаржуванню абразиву в поверхні тертя, а, отже, до зменшення зносостійкості. Канавки, показані на рис. 8.5, в, г, сприяють видаленню продуктів зношування, тому що їх розташування враховує траєкторію руху часток.

Вібрація впливає не тільки на зношування. Під дією вібрації виникають фретінг, брінелювання, відбувається хімічна активація матеріалів у зоні фрикційного контакту. Остання сприяє пошкодженню мастильних матеріалів і випаданню різних добавок в осад, який перешкоджає, наприклад, нормальній роботі редукторів. Крім того, помітно погіршуються службові характеристики мастильного матеріалу.

Шорсткість поверхні і напрямок слідів обробки (паралельних при точінні, перехрещених при фрезеруванні і грубому шліфуванні) сильно впливають, наприклад, на герметичність стику; герметичність підвищується, якщо сліди обробки перпендикулярні потоку витoku й зменшуються при збігу їх напрямків.

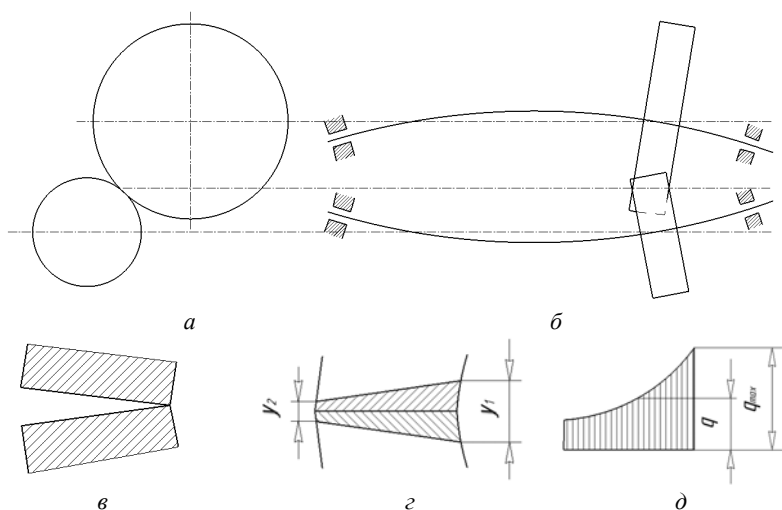


Рис. 8.5. Схема перекосу зубчастих коліс і утворення концентрації навантаження q по ширині:

$a, б$ – схема перекосу зубів шестірні і колеса, що виникає внаслідок пружної піддатливості деталей передачі під навантаженням; $в$ – схема перекосу при абсолютно твердих зубах – точкове торкання зубів у одного з торців; $г$ – сумарна деформація зубів; $д$ – концентрація навантаження по ширині зубчастого колеса

Геометрична оптимізація трибосистем. При нормальному процесі зношування більшість із рухливих сполучень і робочих органів машин направлено змінюють свою вихідну геометричну форму. Якщо час і інтенсивність зношування досить великі, то вдається досягти стійкого, стаціонарного стану, коли геометрична форма деталей починає конформно відтворюється. Узагальнюючи досвід спостережень за зношуванням зубчастих передач, Д.Н. Решетов рекомендував надавати їм «форму природнього зношування, яка в мінімальному ступені спотворюється в процесі зношування».

8.3. Вибір матеріалів пари тертя

Матеріали пари тертя повинні бути сумісні. У робочому діапазоні температур і навантажень фрікційно – зносні характеристики не повинні мати критичних точок (рис. 8.6). Найближча критична точка з деяким запасом (20...30 %) за контрольним параметром (навантаженням, швидкістю й температурою) повинна обмежувати застосування матеріалів

для елементів пари тертя. Критичні точки звичайно виявляються в результаті серійних випробувань на лабораторних машинах тертя (температурна стійкість оливи, фрикційна теплостійкість матеріалів пари тертя та ін.).

При гарній сумісності матеріалів елементи в трибосистемі (ТС) досить швидко припрацьовуються, елементи антифрикційних вузлів мають невисокі рівні тертя, зношування і достатньо тривалу роботу без ушкоджень. Кожному режиму тертя властиві свої особливості сумісності ТС. Багато в чому вони визначаються умовами роботи – навантаженням P , швидкістю v і температурою ν (табл. 8.1).

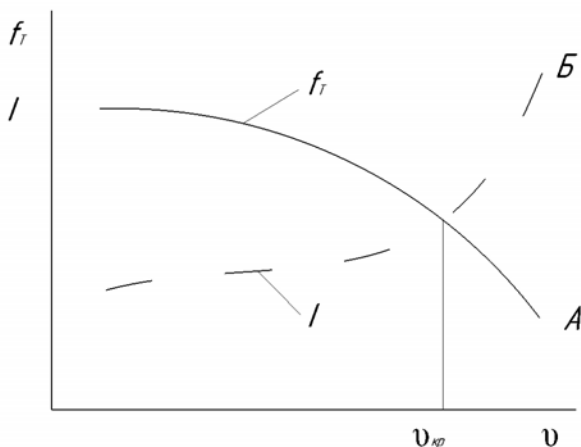


Рис. 8.6. Критичні точки для фрикційних (А) і зносних (Б) характеристик матеріалів:

ν – температура поверхні тертя; ν_{kp} – температура в критичній точці

Залежно від призначення й умов роботи ТС визначається її бажаний оптимальний стан. Так, для підшипників ковзання – це або тривала робота без втомних ушкоджень і високого рівня зношування, або достатня стійкість до утворення задирки, або при аварійній ситуації, максимальна живучість трибосистеми без серйозних ушкоджень. В окремих специфічних умовах роботи оптимізацію ведуть за ознакою певної величини зношування тертьових деталей (контактному ущільненню, напрямним верстатів та ін.), іноді необхідною умовою є плавність переміщення (золотникові пари та ін.).

Процес сумісності визначається насамперед реакцією на зміну режиму тертя, що виникає в результаті нестабільних умов роботи сполучених

поверхонь. Сприятлива реакція на жорсткість тертя повинна супроводжуватися утворенням на ділянках контактування або тонких легко рухливих плівок, або оксидних плівок, що важко схоплюються, або визначатися захисними властивостями штучно створених м'яких покриттів (сплави на основі свинцю, полімерні композиції та ін.), або твердих поверхневих шарів (твердих хіміко – термічних покриттів, термічної обробки та ін.).

Т а б л и ц я 8.1

Найбільш характерні види ушкоджень при різних режимах тертя

Рідинний режим тертя	Змішаний або граничний режими тертя	Без подачі мастильного матеріалу
Втомні ушкодження (тріщини, викрашування, пошкодження). Зношування за рахунок абразивної дії часток, що попадають з оливами. Кавітаційні ушкодження вкладишів (місцеві і загальні по всій і більшій частині поверхні) Корозійні ушкодження загальних або окремих структурних складових	Втомні ушкодження (тріщини, викрашування, пошкодження). Зношування за рахунок абразивної дії часток і схоплювання на окремих ділянках тертьових поверхонь. Утворення глибоких і широких борозн, що приводять до задирки тертьових поверхонь.	Зношування за рахунок схоплювання, супроводжуване відривами і переносом металу з однієї поверхні на іншу. Утворення глибоких і широких борозн, що приводять до задирки тертьових поверхонь. Зношування за рахунок зминання (пластичної деформації) тертьових поверхонь

Числові критерії працездатності матеріалів у парах тертя.
Найбільш простий спосіб перевірки правильності вибору матеріалів пар тертя ковзання – розрахунки за середнім тиском p . Спосіб придатний для пар тертя, що працюють із малими швидкостями ковзання при невисоких температурах навколишнього середовища і має на меті забезпечити зчленування від можливого заїдання. Для шарнірно – болтових з'єднань граничні значення питомих навантажень (у МПа) приблизно можуть бути прийняті: для загартованої сталі по сталі – до 15, загартованої сталі по бабіту – 9, загартованої сталі по бронзі – 8, загартованої сталі по чавуну – 6, незагартованої сталі по бабіту – 6, незагартованої сталі по бронзі – 5.

Якщо режим тертя пари визначається не тільки тиском, але й швидкістю ковзання v , то застосовують прийнятий у конструкторській

практиці розрахунків за величиною pv . Якщо f – коефіцієнт тертя ковзання, то f_{pv} є питомою потужністю тертя. Оскільки надійна робота підшипника, гальма або іншого вузла можлива лише при тепло напруженості, що не перевищує певну величину для даної конструкції і умов її експлуатації, то умову надійності підшипника по тепло напруженості можна записати як $f_{pv} \leq A$. Приймавши f постійним, отримаємо цю умову у вигляді $pv = const$, де A – гранична кількість теплоти в механічних одиницях, яка може відводитися з одиниці площі діаметральної проекції підшипника в одиницю часу.

Деякі правила комбінації матеріалів:

1. Поєднувати твердий матеріал з м'яким, що має температуру рекристалізації нижче середньої температури поверхні тертя при роботі. Така комбінація матеріалів добре протистоїть заїданню і характеризується високою надійністю (наприклад, пара хром – гума при змащенні мінеральною оливою і водою, і хром – бронза при використанні пластичних мастильних матеріалів).

2. Поєднувати твердий метал по твердому (наприклад, пара з азотованих, хромованих і загартованих сталей). Такі пари тертя мають високу зносостійкість внаслідок малого взаємного проникнення їх поверхонь. Нанесення припрацьованих покриттів підвищує надійність пар у найнебезпечніший період роботи – під час припрацювання. Застосування цих пар обмежується швидкостями ковзання. Висока точність виготовлення і складання, значна твердість конструкції, ретельне припрацювання, поліпшення умов змащення значно розширюють область застосування пар тертя з твердих матеріалів.

3. Уникати комбінацій м'яких матеріалів по м'яким, а також пар з однойменних матеріалів (незагартована сталь по незагартованій сталі, алюмінієві сплави друг по другові, мідний сплав по алюмінієвому, хром по хрому, хром по алюмінію, нікель по нікелю, пластмаса по пластмасі), за винятком політетрафторетилена і поліетилена. Подібні пари мають низьку зносостійкість і ненадійні в роботі. При незначних перевантаженнях у парах утворюються осередки схоплювання і відбувається глибинне виривання матеріалів із взаємним їхнім налипанням на поверхні тертя.

4. Застосовувати у важкодоступних для змащування конструкціях пористі металокерамічні матеріали і антифрикційні сплави.

5. Застосовувати в якості фрикційних і антифрикційних матеріалів пластичні маси. Іноді вони підвищують надійність і термін служби вузла тертя, знижують масу конструкції і витрату дефіцитних кольорових металів, зменшують вібрації та поліпшують акустичні властивості машин.

6. Шляхом вибору матеріалів пари тертя, мастильних матеріалів і присадок до них, прагнути створювати умови реалізації режиму вибіркового переносу.

7. Застосовувати матеріали, що важко піддаються наводороженню при експлуатації.

8. Дотримання правила позитивного градієнта механічних властивостей дозволяє уникнути в процесі експлуатації вузла тертя таких негативних явищ при терті, як схоплювання, задирки, заїдання та ін. Для отримання таких властивостей матеріалів піддавати їх обробці методами інженерії поверхні.

9. Поверхні тертя піддавати остаточному доведенню, в тому числі. Фінішній антифрикційній безабразивній обробці (ФАБО).

10. Застосовувати пористі матеріали. Пористість матеріалу в об'ємі та у поверхневому шарі тертьових деталей може служити конструктивним або технологічним фактором підвищення надійності їх роботи внаслідок поліпшення режиму змащення або протизадирної стійкості пари. Пори служать резервуаром для мастильного матеріалу і сприяють більш швидкому відновленню зруйнованої граничної плівки. Підшипники ковзання просочують мастильним матеріалом. У процесі роботи, якщо цього матеріалу виявляється недостатньо, він при розігріві додатково видавлюється із втулки, тому що коефіцієнт теплового розширення матеріалу втулки перевищує коефіцієнт теплового розширення мастильного матеріалу.

Газотермічне покриття, отримане напилюванням, має пористість до 10 % об'єму. Анодування й фосфатування створюють поверхнєву пористість. Мікро – або макропористість утворюються в результаті регульованого процесу. Пористість таких матеріалів може досягати 60 %. Пори бувають: а) закриті і рідко розташовані; б) розсіяні по всьому об'єму, або тільки по поверхні, ізольовані і сполучені між собою; в) каналні – довгі, з'єднані каналами; г) регулярно розташовані, строго геометричної форми. До пор відносять і поглиблення, що нанесені накаткою на поверхні тертя.

Для плоских прямолінійних чавунних напрямних ковзання металорізальних верстатів, у контакті яких необхідно підтримувати режим тертя із граничним змащенням, ефективна поверхня, що складається з виступів, оточених безперервною сіткою каналів, наприклад, поверхня гексагональної структури (рис. 8.7, а). Мастильний матеріал, що накопичується в таких каналах, запобігає розривам змащувального шару, а при нерівномірному русі супорта канали забезпечують дренажування надлишкового гідродинамічного тиску, що виникає в проміжку і стабілізує сили тертя і швидкість при повільних переміщеннях супорта. Для стабілізації сил тертя при рідинному змащенні в підшипнику ковзання дренажна дія системи западин неприпустима, у зв'язку із чим западини не повинні сполучатися між собою (рис. 8.7, б).

Застосовують спосіб зміцнення станин металорізальних верстатів нанесенням твердих сплавів на напрямні електроіскровим способом, приблизно $50 - 60$ точок на 1 см^2 поверхні, з наступним притиранням чавунним притиром або шліфувальними брусками. Поверхнева пористість для забезпечення кращого припрацювання сталевих і чавунних деталей може бути створена шляхом травлення поверхні $10 - 25\%$ -ним розчином HNO_3 . Рекомендується після травлення просочити деталі в гарячій оливі протягом $15 - 20 \text{ хв.}$

Після накочування чавунних напрямних важкого розточувального верстата мод. $KY - 160$ за схемою, яка представлена на рис. 8.7, *а*, повністю припинилися схоплювання поверхонь, а інтенсивність їх зношування, як встановлено спостереженнями протягом двох років, знизилася в 10 разів. Оптимальними по зносостійкості виявилися площадки довжиною 4 мм і канали при ширині і глибині $0,3 - 0,4 \text{ мм}$. Аналогічні результати були отримані і для напрямних координатно – розточувальних верстатів мод. 2455 з модифікованого чавуну $СЧ 21$.

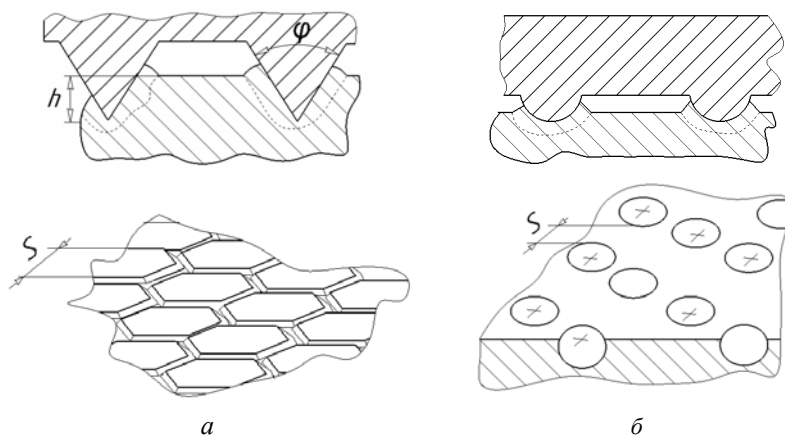


Рис. 8.7. Різновиди рельєфу торованих поверхонь:
а – з безперервною системою каналів гексагональної форми;
б – з системою дискретних западин
 (угорі – схеми утворення рельєфу накатним роликом)

У верстатобудуванні доцільно проводити накочування поверхонь повзунів, ползків або кареток, що підвищує зносостійкість вузлів напрямних ковзання як без термообробки, так і при загартуванні. У нерухливих з'єднаннях деталей, підданих фретінг – корозії, накочування доцільно поєднувати з нанесенням металевих або твердих мастильних покриттів, з фінішною антифрикційною обробкою.

Вибір розташування матеріалів пар тертя за твердістю. У парі, утвореної ковзними поверхнями, що мають різні твердість і розміри поверхонь тертя, можна розрізнити два випадки:

$H_1 > H_2$; $S_1 < S_2$ – пряма пара тертя;

$H_1 < H_2$; $S_1 < S_2$ – зворотна пара тертя,

де H_1 , H_2 – твердості однієї та іншої тертьових поверхонь; S_1 , S_2 – відповідні величини поверхонь тертя.

У випадку прямої пари тертя по більшій поверхні ковзає більш тверде тіло, а у випадку зворотної пари – більш м'яке тіло (рис. 8.8). Прикладами прямої пари може служити ковзання загартованого супорта по чавунній термічно неопрацьованій станині. Вал і підшипник з бабітовим шаром при навантаженні постійного напрямку, прикладеному до обертового валу, являють собою зворотну пару. Якщо відволіктися від фактору гідродинаміки мастильного шару, то такий поділ пар буде справедливим як для повного, так і для часткового підшипника, тому що умови контактування будуть при цьому однаковими; бігунок візка із запресованою бронзовою втулкою, що працює по необертовій сталевій осі, є елементом прямої пари.

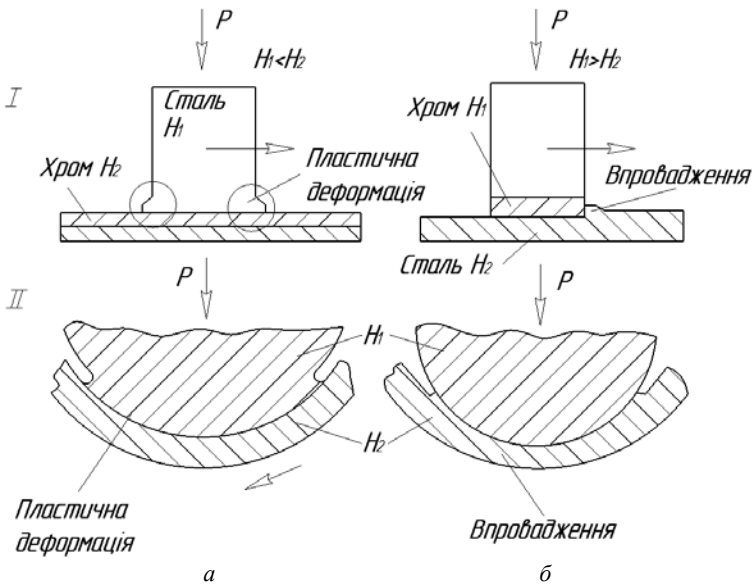


Рис. 8.8. Зворотні (а) і прямі (б) пари: I – з поступальним рухом; II – з обертовим рухом; H_1 , H_2 – твердості

У прямій парі при перевантаженні пластична деформація її елемента (зразка) з меншою твердістю перешкоджає нормальній роботі пари, у результаті чого зростають сили тертя (особливо небезпечно це для механізмів агрегатів управління), підсилюється ушкодження поверхні, і пара швидко виходить із ладу. У зворотній парі при перевантаженні пластична деформація зразка з меншою твердістю не перешкоджає роботі пари.

Для кращої зносостійкості пари раціонально таке розташування матеріалів, якому відповідає менше сумарне лінійне зношування деталей пари.

Переваги загартування напрямних станини наступні: 1) зменшення ймовірності механічних ушкоджень (подряпин і забоїн); 2) знижене лінійне зношування; 3) прискорення припрацювання полозків, що мають меншу поверхню тертя; 4) полегшення пригонки шабруванням полозків до станини при виготовленні і ремонті.

При недостатньому захисті станини від дії абразивних часток доцільніше загартування напрямних полозків. Напрямні полозків зношуються нерівномірно і з більшою інтенсивністю біля кінців, де утворюється своєрідний клин, куди попадають абразивні частки.

При рідинному змащенні обертальної пари в режимі роботи, що встановився, розташування матеріалів повинно бути таким, щоб зношування як валу, так і підшипника в меншій мірі впливало на утворення оливного клину. Так звані «звернені пари» (антифрикційний матеріал переноситься з підшипника на вал) мають іноді переваги при постійному напрямку вектору навантаження та валу що обертається. Антифрикційний шар вкладиша зазнає тут однобічного місцевого зношування (рис. 8.9), що із часом знижує несучу здатність підшипника. У такій парі зношування антифрикційного матеріалу, нанесеного на вал, рівномірне у кожному поперечному перерізі, тим часом як місцеве зношування твердого вкладиша менше, ніж м'якого вкладиша в першому випадку.

Звернена пара у випадку обертового валу і постійного напрямку навантаження представляє пряму пару. Як приклад конструктивного виконання підшипника зі зверненою парою тертя можна привести підшипник шпинделя токарського верстата (рис. 8.10).

Якщо шестерня і колесо виконуються зі сталі однієї і тієї ж марки із твердістю робочих поверхонь $HV < 350$, то щоб уникнути задирок необхідно робити термообробку заготовок на різну твердість. Для зубчастих передач із некорегованими зубами коліс потрібно матеріал шестірни призначати більшої твердості, ніж матеріал колеса, оскільки:

а) зуби шестерні за той самий час зазнають більшого числа навантажень, ніж зуби колеса, і для забезпечення приблизно однакової

зносоустійкості матеріал шестерні повинен мати кращі механічні властивості;

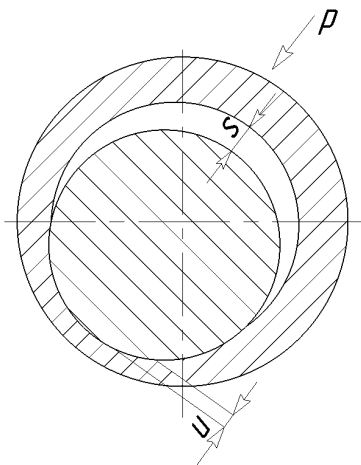


Рис. 8.9. Місцеве зношування підшипника, що знижує його несучу здатність

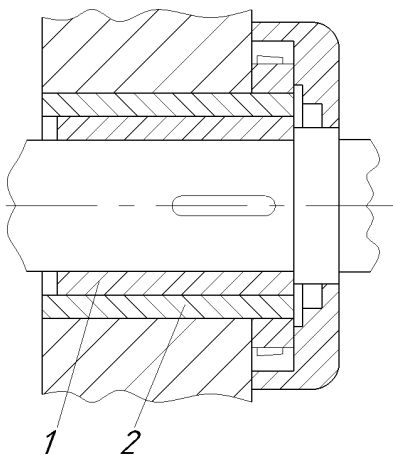


Рис. 8.10. Підшипник зі зверненою парою: 1 – бронза; 2 – сталь

б) у відкритих зубчатих передачах і передачах з високою твердістю робочих поверхонь, у яких габаритні розміри визначаються виходячи з загальної міцності, остання є чинником, що лімітує навантажувальну

здатність. Матеріал і термообробка повинні бути обрані так, щоб межа витривалості матеріалу шестерні на вигин була більше;

в) у косих зубчастих передачах збільшення твердості зубів шестірни, парної з колесом деякої постійної твердості, поліпшує ККД передачі і підвищує контактну витривалість зубів колеса.

Чим більше різниця твердості матеріалів шестерні і колеса, тим з більшою точністю та меншою шорсткістю поверхні повинні бути оброблені зуби шестерень для поліпшення припрацювання і зниження зношування при припрацюванні.

8.4. Взаємне доповнення якості деталей

Часто деталі виконують неоднорідними по перетину шляхом застосування різнорідних матеріалів, що взаємно доповнюють один одного за своїми властивостями. Принцип взаємного доповнення якості використовується також при отриманні комбінованих (композитних) матеріалів з декількох компонентів, що зберігають свої особливості, але в сукупності утворюючи нові матеріали, відмінні за властивостями від вихідних компонентів. Способи реалізації цільової макроскопічної неоднорідності деталей наступні: 1) термохімічна обробка; 2) облицювання поверхонь; 3) застосування накладок і вставок; 4) біметалізація; 5) тонкошарові неметалеві покриття.

Застосування накладок і вставок. Для підвищення зносостійкості і запобігання від задирок напрямних металорізальних (головним чином важких і великих) верстатів доцільно замість загартування та інших способів зміцнення встановлювати на напрямні пластмасові накладки, використовуючи карбінольний клей *БФ-2*, *БФ-4* або клей на основі епоксидних смол, або закріплення гвинтами при великій товщині пластин. Застосування накладних напрямних великих токарських, розточувальних, поздовжньо – фрезерувальних, поздовжньо –стругальних та інших верстатів підвищує працездатність напрямних, знижує вартість верстатів і скорочує їхні простой в ремонті. Для накладок використовують текстоліт, графітований кордоволокніт, гетинакс, вініпласт та ін.

Капрон, через низьку теплопровідність, не придатний для накладок напрямних вже при швидкостях переміщення 3 м/с . Область його застосування обмежується середньою швидкістю переміщення по напрямних порядку 15 м/хв і тиском 1 МПа при рясному змащенні. Внаслідок високої адгезії до металу стиракрил забезпечує швидке утворення накладок шляхом заливання змішаного з рідиною порошку на поверхню напрямних і швидкого затвердіння на повітрі. Він забезпечує більшу плавність переміщення, ніж капрон, при повільних переміщеннях,

але менш теплостійкий. Недостатній опір абразивному зношуванню пластмасових напрямних перешкоджає їхньому впровадженню у верстати середніх розмірів.

З гарними показниками зносостійкості експлуатуються накладки із цинкового сплаву ЦАМ10–5 на напрямних столів поздовжньо – стругальних і фрезерних верстатів, на полозках стоек копіювально – фрезерних і розточувальних верстатів і супортів важких токарських верстатів. Товщина накладок 12–15 мм, ширина – до 400 мм, довжина – до 1200 мм, кріплення – за допомогою гвинтів з потайною головкою, що заливається сплавом або бабітом.

На одній з моделей радіально – свердлильних верстатів по рукаву переміщується на чотирьох роликах каретка зі свердлильною головкою. Для зниження швидкості зношування напрямних чавунного хобота під роликами натягнута легко змінювана тонка загартована сталева стрічка (рис. 8.11).

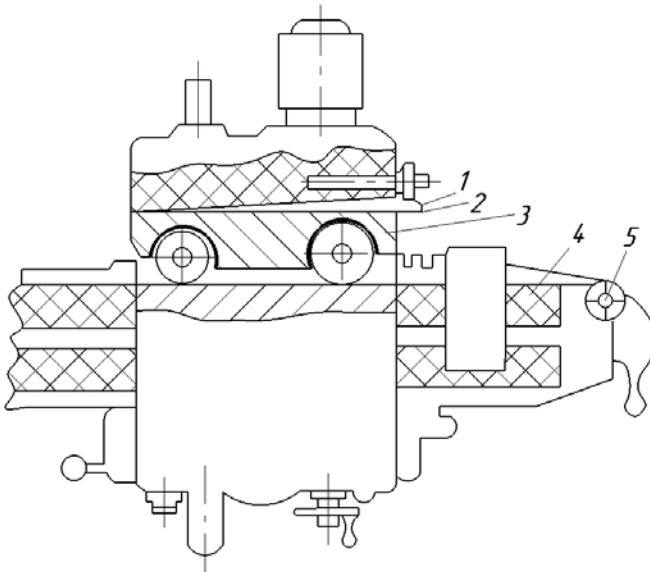


Рис. 8.11. Схема каретки радіально – свердлильного верстату:

- 1 – клин, що регулює проміжок в осях роликів; 2 – фіксуючий гвинт;
3 – ролики; 4 – сталева стрічка; 5 – натяжний ролик

Облагородження поверхонь тертя деталей з чорних металів вставками з антифрикційного матеріалу дозволяє в ряді випадків

підвищити антифрикційні властивості деталей при незначній витраті дефіцитних кольорових металів. Бабітові вставки загальною площею 2,5...3,0 % від номінальної поверхні тертя рухливої напрямної дозволили подовжити термін служби напрямних різноманітного металорізального устаткування в 2...4 рази.

Біметалізація підшипників ковзання дозволяє не тільки значно заощаджувати дефіцитний метал (до 10 разів у сталевонікельових втулках у порівнянні із ціліснонікельовими), але й різко підвищити стійкість деталей у зв'язку з поліпшенням якості антифрикційного металу та можливістю зменшення товщини залитого шару. У біметалічних підшипниках товщина такого шару 0,5 мм і більше, у прецизійних буває і 0,05 мм.

У якості біметалічних деталей пар тертя застосовують гайки гвинтових передач і черв'ячні колеса. У багатьох випадках сталевий корпус гайки замінюють чавунним. Більш технологічною, ніж звичайна збірна конструкція, є двошарова конструкція черв'ячного колеса, що має чавунну або сталеву маточину в якості сердечника і відлитий у піщану форму або в кокіль бронзовий вінець.

Широко поширені триметалічні вкладиші зі сталевій стрічки із шаром свинцевої бронзи, на яку, для підвищення її корозійної стійкості в мастилах, осаджують електролітичний шар свинцевого сплаву товщиною 20 мкм з 5 – 10% Sn або 3,5–4,5% In.

Срібло має високу теплопровідність, велику пластичність, твердість, що мало змінюється з підвищенням температури, і найбільш високий з підшипникових матеріалів опір втомі, але погано змащується. Тому на сталевий вкладиш наносять срібло, яке покривають тонким (0,01 – 0,02 мм) шаром свинцевого сплаву, насиченого індієм. Присутність індію в сплаві охороняє його від корозії. Для гарного зчеплення срібла з основою на сталь осаджують мідь або нікель. Підшипники із проміжним срібним шаром здатні з успіхом служити при високих навантаженнях (до 70 МПа) і швидкостях, і при великих температурних перепадах.

Рекомендується також застосовувати змінні елементи і резервування зносостійкості. При досягненні граничного зношування замінюють не всі деталі вузла тертя, а ті, що тільки досягли граничного зношування. Доцільно за допомогою осьового або кругового зсуву деталі в деяких випадках вводити в контакт резервну поверхню. Зокрема, при конструюванні осей і валів для цього передбачається ділянка опорних шийок. Позитивним фактором є можливість виготовлення змінного елемента з більш зносостійкого матеріалу, ніж вся деталь, що дозволяє заощаджувати дефіцитні і дорогі матеріали.

8.5. Вузли більш досконалого тертя

По можливості слід уникати сухого тертя, використовуючи змащення, тобто застосовуючи рідинне або змішане тертя, коли зменшуються втрати на тертя і зношування. При цьому змінюються критерії граничного стану, зростає тривалість ресурсу, що лімітується старінням, релаксацією та втомою. Використання гідростатичного змащення практично виключає зношування. Заміна тертя ковзання тертям кочення, крім зниження зношування, багаторазово зменшує силу тертя. Тертя кочення усе більш широко використовується в підшипникових вузлах, у напрямних кочення, у передачах гвинт – гайка кочення та ін.

Підшипникові вузли. Підшипники кочення мають наступні переваги:

1. Зменшення втрат на тертя. Статичний момент підшипника лише на 30 – 50 % перевищує момент тертя при усталеному русі, у той час коли у підшипниках ковзання це перевищення досягає 15 і більше разів.
2. Економія кольорових металів, що витрачаються на виготовлення вкладишів підшипників ковзання.
3. Зменшення витрати мастильних матеріалів.
4. Відпадає потреба в примусовому охолодженні.
5. Спрощення відходу.
6. При правильно призначених посадках відсутнє зношування шийок валів.
7. Стандартизація кулько – і роликотпідшипників.
8. Зменшення вартості верстатів.

При безперервній роботі підшипників у діапазоні $10^4 < P_n < 10^7 \text{ Н}\cdot\text{с}^{-1}$ можуть бути використані як підшипники кочення, так і гідродинамічні підшипники ковзання. Враховуючи відносно невелику вартість серійних підшипників кочення та кращі їхні характеристики при змінних умовах роботи, підшипники ковзання в цих умовах роботи застосовують тільки тоді, коли неможливо використовувати підшипники кочення (через їхню нероз'ємність, радіальний розмір або з інших причин).

Недоліками підшипників кочення є:

1. Недостатня довговічність і надійність при високих окружних швидкостях і динамічних навантаженнях.
2. Більші діаметральні розміри при меншій довжині, ніж у підшипників ковзання.
3. Незадовільна робота в умовах вібраційного навантаження, а також при гойдальному русі з малими кутами повороту.
4. Більший шум при роботі.
5. Більш висока чутливість до умов запиленості абразивами і забрудненню мастила, ніж у підшипників ковзання.

6. Недостатня корозійна і теплова стійкість.

Напрявні кочення мають наступні переваги перед напрямними ковзання:

1. Зменшення опору руху, що особливо важливо у випадках ручних переміщень (наприклад, у заточувальних верстатів) і має вирішальне значення для величини потужності подачі у верстатах із програмним керуванням, де часто буває простіше і навіть необхідно мати окремі приводні механізми для кожного руху.

2. Відсутність ефекту взаємного прилипання поверхонь при терті ковзання, що спостерігається при досить малих подачах, що і приводять до переривчастого руху та ускладненням у реалізації точних настановних переміщень.

3. Виключення впливу різниці товщин оливного шару на биття кареток і супортів при високих швидкостях переміщення.

4. Спрощення відходу.

5. Полегшення заміни зношених деталей при одночасному підвищенні їх довговічності.

Напрявні кочення виконують у вигляді плоских елементів, циліндричними та у вигляді роликів на осях. У першому випадку застосовують кульки, ролики або голки із цього ж асортименту, що й у підшипниках кочення. Перевагою кулькових напрямних є їхня менша чутливість до похибок виготовлення по ширині і по куту призм. Однак внаслідок меншої вантажопідйомності кульок у порівнянні з роликами того ж діаметра застосування чавунних напрямних на кульках обмежується областю досить малих навантажень – для легких верстатів і приладів.

Передачі гвинт – гайка кочення. Для полегшення точних робочих і настановних переміщень передачею гвинт – гайка, а також для зменшення сил тертя в механізмах з ручним приводом застосовують передачі з тертям кочення (замість тертя ковзання) у парі. У передачі гвинт – гайка, гайка складається з трьох загартованих роликів, розташованих у загальному корпусі симетрично щодо осі гвинта. Кожний ролик є циліндричною рейкою, що сполучається з гвинтом. Осьова сила, передана на ролики, сприймається упорними шарикопідшипниками, а радіальна – голчастими підшипниками.

У високошвидкісних сумішених опорах робочі елементи підшипників перебувають безпосередньо на валу або на осі опори. Відсутність внутрішніх кілець виключає негативну дію їх різностінності, крім того, створюється можливість збільшити межу частоту обертання, зменшити габарити вузла і навантаження від відцентрових сил за рахунок зменшення діаметра по центрах тіл кочення. Крім того, виключаються торцеві биття заплічок корпусу, неперпендикулярність торців зовнішніх

кілець до утворюючої зовнішньої поверхні кільця. Існують опори кочення, у яких елементи сполучені як з валом, так і з корпусом або деталями виробу, що замінюють внутрішні і зовнішні кільця.

Комбіновані сполучені кульки – роликові опори поєднують кращі якості обох видів тіл кочення: більшу радіальну вантажопідйомність роликового підшипника і можливість витримувати двосторонні осьові навантаження радіального роликопідшипника із глибоким жолобом. Застосування сполучених опор дозволяє в $10...12$ разів підвищити точність підшипникових вузлів у виробі. Точність опор підвищується в результаті зменшення числа перехідних елементів, а також за рахунок більш високої технологічності і твердості деталей, що сполучаються. Неминучі перекося доріжок кочення, що виникають при виготовленні і монтажі сполученої опори, в $2...6$ разів менше перекося звичайного підшипникового вузла. Це знижує момент тертя і поліпшує температурний режим роботи сполученої опори. Температура зовнішніх кілець сполученої опори в $1,3...1,6$ разів менше температури кілець звичайного підшипникового вузла. Сполучена опора може працювати з частотою обертання більшою в середньому на 15% , ніж у звичайних кулькових підшипників. При належній експлуатації сполучені опори служать у виробі в $2 - 4$ рази більше, ніж звичайні підшипники кочення.

8.6. Оптимізація тепловиділення в парах тертя

При спільній дії навантаження і швидкості в тонкому поверхневому шарі за рахунок інтенсивних пружно – пластичних деформацій формується фрикційне теплове джерело з питомою потужністю $q \approx f_{pv}$. Тепловиділення характеризується потужністю Q (Bm) і щільністю теплового потоку (Bm/m^2). Потужність тепловиділення в механізмах розраховується із припущення, що вся робота тертя перетворюється в теплоту. Нижче наведені формули для розрахунків потужності тепловиділення в характерних елементах.

- Підшипники кочення.

$$Q = 1,047 \times 10^{-4} M_m n, \quad (8.1)$$

де M_m – момент тертя, $H \cdot mm$; $M_m = M_0 + M_1$, де M_0 – момент тертя, що залежить від типу підшипника, M_1 – тип навантаження на підшипник; n – частота обертання, xc^{-1} . При $m > 2000$ момент тертя дорівнює:

$$M_0 = 10^{-7} f_0 (vn)^{2/3} d_{сер}^3; \quad (8.2)$$

при $m \leq 2000$ відповідно:

$$M_0 = 160 \times 10^{-7} f_0 d_{\text{сер.}}^3, \quad (8.3)$$

де ν – кінематична в'язкість мастильного матеріалу при робочій температурі підшипника, $\text{мм}^2/\text{с}$, при пластичному мастильному матеріалі – в'язкість базової оливи (середнє значення $\nu = 15 \text{ мм}^2/\text{с}$); f_0 – коефіцієнт, що залежить від умов змащення (табл. 8.2); $d_{\text{сер}}$ – середній діаметр підшипнику, мм ; M_I – враховується при великому навантаженні.

Таблиця 8.2

Значення коефіцієнта f_0

Тип підшипника	Змащування		
	Оливним туманом	Пластичним матеріалом	В оливній ванні
Кульковий радіальний однорядний	0,7...1	1,5...2	3...4
Кульковий радіальний упорний однорядний	1	2	4
Роликовий радіальний із циліндричними роликами	1...1,5	2...3	4...6
Роликовий радіально – упорний конічний	1,5...2	3...4	6...8
Кульковий упорний	0,7...1	1,5...2	3.4
Роликовий упорний з циліндричними роликами	–	2	4

Примітка. Менші значення f_0 дані для підшипників більш легких серій.

- Передача гвинт – гайка кочення.

Потужність тепловиділення розраховується аналогічно потужності тепловиділення в підшипниках кочення. Середні значення моменту тертя M_0 при натягу 25 % від припустимого статичного навантаження наведені нижче в таблиці 8.3., де d – діаметр гвинта, мм ; t – крок, мм .

Таблиця 8.3

**Середні значення моменту тертя M_0 при натягу 25 %
від припустимого статичного навантаження**

$d \times t$	25×5	32×10	40×10	50×10	63×10
$M_0, \text{Н} \cdot \text{мм}$	260	410	630	1140	1950

Для комбінованих упорно – радіальних роликів підшипників типу 504700, 504900 (широко застосовуваних у приводах подач верстатів з ЧПК) орієнтовні значення моменту сили тертя холостого ходу наведені нижче в таблиці :

Таблиця 8.4

Значення моменту сили тертя холостого ходу для комбінованих упорно – радіальних роликів підшипників типу 504700, 504900

Розміри підшипнику	25 × 57	25 × 72	30 × 62	30 × 80	40 × 75	40 × 90	50 × 110
$M_0, Н \cdot мм$	650	2000	850	2950	1500	3900	7000

- Напрявні ковзання.

$$Q = PSvf, \quad (8.4)$$

де P – тиск у напрямних, $Па$; S – площа робочої поверхні, $мм^2$; v – швидкість ковзання, $м/с$; f – коефіцієнт тертя ковзання (для пари чавун – чавун, чавун – бронза $f = 0,15 \dots 0,17$).

- Напрявні кочення.

$$Q = (nf_0 + f_k F / r_{нав.})v, \quad (8.5)$$

де n — число граней напрямних; f_0 – початкова сила тертя на одній грані (у середньому $f_0 = 4 \dots 5 Н$); f_k – коефіцієнт тертя кочення, $f_k = 0,01$ мм для сталевих кулькових і роликів напрямних; F – номінальне навантаження на одну напрямну, $Н$; $r_{нав.}$ – наведений радіус тіл кочення, $мм$; v – швидкість переміщення робочого органу, $м/с$.

При роботі вузла тертя в умовах надлишкового тепловиділення на контактуючих поверхнях проявляється ряд таких небажаних ефектів, як зниження міцності поверхневого шару матеріалу, нестабільність фрикційних характеристик, підвищення абразивної здатності продуктів зношування, температурне жолоблення контактуючих поверхонь і елементів пари тертя, зміна проміжків. Увесь комплекс таких ефектів приводить до зниження довговічності трибосполучення і погіршенню його характеристик.

З метою зниження температури на поверхні тертя і в об'ємі застосовують наступні конструктивно – технологічні підходи:

- зменшують тепловиділення (знижують втрати на тертя) у процесі експлуатації;
- розбудовують поверхні, що віддають тепло;

- обирають пару тертя таким чином, щоб хоча б один з її елементів мав високу теплопровідність;
- контролюють величину проміжків для того, щоб зменшити втрати на тертя при термічному розширенні деталей;
- при можливості заміняють тертя ковзання на тертя кочення, а сухе тертя – на рідинне;
- видаляють продукти зношування із зони контакту;
- застосовують індивідуальне охолодження і хімічні способи поглинання теплоти, що виділилася при терті.

Для зменшення тепловиділення доцільно використовувати: антифрикційні покриття; слизькі гуми; мастильні матеріали; ефекти вибіркового переносу та аномально низького тертя. Гарні результати по зниженню тертя одержують при обробці поверхонь спеціальним составом, що містить MoS_2 . Ефективним є видалення теплоти із зони тертя мастильним матеріалом на водній основі, тому що теплоємність води в 2,5 рази вище, а в'язкість майже в 50 раз менше, ніж у традиційних мастильних матеріалів.

Розвиток поверхонь, що віддають тепло, за рахунок ребер застосовується звичайно при розробці корпусів редукторів і в теплообмінній апаратурі. Але при цьому щільність локального теплового потоку з поверхні ребра завжди нижче, ніж з основної поверхні. Тому ефективніше прагнути не до відводу теплоти за рахунок поверхонь, що віддають тепло, а до зменшення тепловиділення на контакті. Гарні результати дає заміна ковзання при сухому терті і граничному змащенні на кочення. Внаслідок такої заміни тепловиділення зменшується майже на порядок. Майже такий же ефект у ряді випадків дає хімічне регулювання тепловбирання, коли застосовують у деяких дослідних фрикційних матеріалах компоненти, для розкладання яких потрібна велика кількість теплоти. Після остигання компоненти відновлюються до наступного спрацювання.

На процес припрацювання, а надалі і на зносостійкість, негативний вплив надає ігнорування конструктором теплового розширення елементів пари тертя. Нагрівання не дозволяє зберегти постійним відстань між опорними поверхнями, що приводить до росту локальних навантажень у зоні контакту, додатковим деформаціям, а в результаті – до змін точок прикладання тангенціальних і осьових навантажень у порівнянні із проектом. У результаті нагрівання виникають наступні шкідливі для роботи верстата явища: 1. Зміна величин проміжків у рухливих з'єднаннях і викривлення геометрії сполучень; 2. Зниження захисної здатності оливоного шару, що розділяє тертьові деталі, і як наслідок, підвищене зношування (напрямних, зубчастих коліс).

Облік температурних деформацій при конструюванні деталей вузлів тертя і komponуванні машин зводиться до правильного призначення проміжків у сполученнях, розробці заходів для максимального зниження викривлення конфігурації тертьових поверхонь у робочому стані і зменшенню переміщень, що негативно впливають на функціональні властивості машини, що викликані тепловою деформацією окремих її вузлів.

Для компенсації теплових деформацій у вузлах машин передбачаються також плаваючі елементи. Наприклад, якщо підшипник закріпити жорстко на валу й у корпусі, то подовження валу при підвищенні температури вузла в процесі його роботи буде викликати зменшення осьового проміжку в підшипнику та наступне защемлення тіл кочення між кільцями, що знизить довговічність підшипників. Така небезпека усувається застосуванням плаваючих опор. У цьому випадку тільки підшипник 1 жорстко закріплюють на валу й у корпусі, фіксуючи вал уздовж осі, а інший 2 встановлюють у корпус (рис. 8.12) з можливістю вільно переміщатися (плавати) в осьовому напрямку. При двох опорах у якості плаваючої вибирають найменш навантажену, щоб легше реалізувати принцип плавання. У багато опорному валу слід жорстко закріплювати в корпусі найбільш навантажену опору.

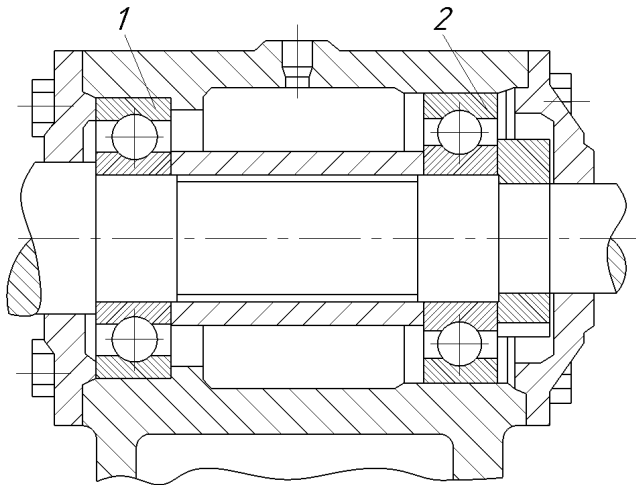


Рис. 8.12. Опорний вузол із кулькопідшипниками

8.7. Захист поверхонь тертя від небажаних дій

При конструюванні трибосполучення доводиться враховувати, що досить часто мають місце наступні групи небажаних дій на фрикційний контакт: вібраційна; абразивна; хімічна. Вібрація крім зношування також помітно впливає на ефективне значення сили тертя, змінюючи механічні і деформаційні властивості контакту, його фактичну площу, тепловиділення на контакті. Залежно від співвідношення швидкості і параметрів вібраційного навантаження може спостерігатися як зниження, так і збільшення сили тертя. Змушене осцилювання в деяких випадках може привести до резонансного ефекту зниження сили тертя. Однак підвищення амплітуди вібраційного навантаження іноді веде до збільшення сили тертя.

Важливою обставиною є врахування поведінки адсорбованих (у тому числі оксидних плівкових) шарів на контактуючих поверхнях при вібраційних навантаженнях. Вібрації можуть приводити до втомного пошкодження плівок, у результаті чого можуть виникнути ювенільні (не покриті оксидними плівками) поверхні металів і локальні точки схоплювання. При збільшенні амплітуди і переході від вібраційного до імпульсного навантаження можливо також крихке пошкодження плівок.

При створенні нових машин намагаються знизити шкідливий вплив вібрації, застосовуючи пристрої, що демпфують, у яких відбувається перетворення зовнішнього тертя у внутрішнє (гідравлічні демпфери, багат шарові матеріали з високою поглинальною здатністю і т. п.).

Велику небезпеку представляє абразивне зношування. Цей вид зношування для незахищеного контакту в 3...4 рази вище, ніж у захищеного за допомогою герметизаторів (ущільнень) з полімерних композиційних і керамічних матеріалів.

На зносостійкість дуже істотно впливає середовище. При впливі агресивного середовища на матеріал відбувається або утворення шарів, що пасивують, або розтріскування верхніх шарів матеріалу. Шари, що пасивують, в ряді випадків підвищують зносостійкість матеріалів і значно зменшують коефіцієнт тертя. В умовах активного впливу середовища (розтріскування) процес корозії інтенсифікує зношування за рахунок полегшення знімання верхнього розпушеного шару матеріалу.

При створенні ущільнень (герметизаторів) потрібне рішення проблем, пов'язаних з відділенням внутрішнього простору машини або пристрою від навколишнього середовища для запобігання їх від взаємного шкідливого впливу або для поділу об'ємів, що перебувають під різним тиском. Ущільнюючі елементи зберігають високу довговічність завдяки мікроеластогідродинамічній плівці, що виникає між шорсткостями поверхні і елемента, що ущільнюється.

Основними критеріями вибору є: окружна швидкість або частота обертання валу; робоча температура; ущільнююча здатність в умовах застосування; розміри ущільнення. Важливо враховувати максимальну робочу температуру, яка при перевищенні припустимого значення приводить до деструкції матеріалу, і мінімальну робочу температуру, обмежену втратою пружності матеріалу ущільнення, що впливає на величину проміжків.

Для правильної роботи контактної ущільнювачі необхідна відповідна підготовка валу. Висока гладкість поверхні ($Ra = 0,04...0,1$ мкм) не сприяє втриманню змащувальної речовини в нерівностях і ускладнює створення мікроеластогідродинамічної плівки, а більша шорсткість поверхні ($Ra > 1,25$ мкм) викликає збільшення зношування і коефіцієнта тертя. У зв'язку із цим існує деяка оптимальна шорсткість, що перебуває в діапазоні $Ra = 0,16...0,63$ мкм. Іншим важливим для довговічності та ефективності ущільнення фактором є радіальне биття поверхні, що ущільнюється. Для податливих манжетних ущільнень воно не повинно перевищувати 25 мкм. У той же час неспіввісність встановлення манжети щодо валу не повинна перевищувати 0,25 мкм.

При роботі машин у приміщеннях з середнім забрудненням атмосфери довговічність контактних ущільнень порівнянна або перевищує довговічність підшипників, що ущільнюються, за умови, що в місці контакту ущільнення і поверхні, що ущільнюється, подається мастильний матеріал, що створює умови рідинного тертя.

Більша частина ущільнень виконується з повним коефіцієнтом взаємного перекриття $K_{вз} = 1$. Однак якщо в абсолютній більшості зниження $K_{вз}$ значно поліпшує умови тепловіддачі і підвищує фрикційно – зносні характеристики трибосполучень, то їхні функціональні властивості при цьому можуть погіршуватися. Так, зменшення $K_{вз}$ у ковзному контакті герметизаторів неминує спричиняє збільшенню витoku герметизуемого середовища.

8.8. Оцінка надійності при механічному зношуванні

Відмова настає по досягненню межового стану, який обумовлений межовим лінійним зношуванням деталі h або межовим сумарним лінійним зношуванням обох деталей сполучення Σh . Припустимо значення розміру h , при зношуванні до якого деталей не може експлуатуватися, зберігаючи деякий запас n щодо граничного $h_{\text{меж}}$:

$$\bar{n} = \frac{\bar{h}_{\text{меж}}}{h}, \quad (8.6)$$

де рискою зверху позначені середні значення величин.

У загальному випадку умовою безвідмовної роботи є додана різниця

$$Dh = h_{\text{меж.}} - h > 0. \quad (8.7)$$

Для нормального закону розподілу середнє квадратичне відхилення різниці Δh у вираженні (8.7) дорівнює:

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{\text{меж.}}^2 + \sigma_h^2}, \quad (8.8)$$

де $\sigma_{\text{меж.}}$ також розподіляється за нормальним законом.

Тоді ймовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P(t) = 1 - \Phi \left\{ -\frac{\bar{h}_{\text{меж.}} - \bar{h}}{\sqrt{\sigma_{\text{меж.}}^2 + \sigma_h^2}} \right\}, \quad (8.9)$$

де Φ – функція нормованого нормального розподілу.

З поняття квантиля U_p , нормального розподілу виходить, що:

$$\bar{h}_{\text{меж.}} - \bar{h} = U_p \sigma_{\Delta h}, \quad (8.10)$$

$$U_p = \frac{\bar{h}_{\text{меж.}} - \bar{h}}{\sqrt{\sigma_{\text{меж.}}^2 + \sigma_h^2}}. \quad (8.11)$$

Деякі значення для U_p при різних $P(t)$ наведені в таблиці 8.5 нижче.

Т а б л и ц я 8.5

Значення для U_p при різних $P(t)$

$P(t)$	0,50	0,70	0,80	0,90	0,95	0,99	0,999
U_p	0,0	-0,524	-0,842	-1,282	-1,645	-2,326	-3,090

Для того щоб урахувати коефіцієнт запасу $\bar{n}$, розділимо чисельник і знаменник (8.11) на $\bar{h}$ та уведемо коефіцієнти варіації:

$$\nu_{\text{меж.}} = \frac{\sigma_{\text{меж.}}}{\bar{h}_{\text{меж.}}}; \quad (8.12)$$

$$\nu_h = \frac{\sigma_h}{h}. \quad (8.13)$$

В такому разі:

$$U_p = -\frac{\bar{n}-1}{\sqrt{\bar{n}^2 \nu_{\text{меж.}}^2 + \nu_h^2}}. \quad (8.14)$$

Якщо, наприклад, розглядається зношування підшипника ковзання, то середнє припустиме збільшення проміжку дорівнює:

$$\bar{\Delta}_{\text{прип.}} = \Delta_{\text{меж.}} - \bar{\Delta}_{\text{поч.}}, \quad (8.15)$$

де $\Delta_{\text{меж.}}$ – призначений припустимий проміжок; $\bar{\Delta}_{\text{поч.}}$ – середнє значення початкового проміжку, середнє квадратичне відхилення якого дорівнює:

$$\sigma_{\text{поч.}} = \sqrt{\sigma_{\text{в.}}^2 + \sigma_{\text{вт.}}^2}, \quad (8.16)$$

де $\sigma_{\text{в.}}$ й $\sigma_{\text{вт.}}$ – середні квадратичні відхилення діаметрів валу і втулки, прийняті рівними $1/6$ відповідних допусків.

Тепер, якщо позначити коефіцієнт варіації розміру деталі:

$$\nu_{\Delta} = \frac{\sigma_{\text{поч.}}}{\sigma_{\text{прип.}}}; \quad (8.17)$$

ν_{γ} – коефіцієнт варіації інтегральної швидкості зношування, то можливо написати прийняте в теорії надійності рівняння:

$$U_p = -\frac{\bar{n}-1}{\sqrt{\bar{n}^2 \nu_{\Delta}^2 + \nu_I^2}}, \quad (8.18)$$

де n – умовний коефіцієнт запасу по зношуванню, обчислений як відношення середніх значень допустимого збільшення проміжку

$\Delta_{\text{прип.}}$ – $\bar{\Delta}_{\text{поч.}}$ до дійсного сумарного лінійного зношування

$$\sum h = (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot t, \quad (8.19)$$

де γ_1 і γ_2 – швидкості зношування елементів пари тертя; t – час тертя.

Для деталей машин, що зношуються, в якості критерію надійності використовується технічний ресурс (або просто ресурс). При високих вимогах до надійності рухливих сполучень звичайно задаються припустимим значенням $P(t) = \gamma\%$ (наприклад, 90 %), визначають час роботи сполучення $t = T_{\gamma\%}$, що відповідає даній регламентованій ймовірності безвідмовної роботи.

По інтенсивності зношування, швидкості відносного переміщення тертьових поверхонь v і часу роботи t можна оцінити лінійне зношування деталі W

$$W = hv t. \quad (8.20)$$

Інтенсивність зношування є функцією матеріалів, змащення, тиску і швидкості. Формула припускає збереження виду тертя і відсутність істотного впливу температури на інтенсивність зношування.

Оцінку надійності слід вести:

- по зміні лінійного розміру однієї деталі, яка може характеризувати точність (наприклад, вимірювальний, вимірювальний різальний інструмент) або міцність (наприклад, робочі органи дорожніх, гірських, сільськогосподарських та ін. машин);

- по зміні комбінації лінійних розмірів сполучених деталей – проміжків у підшипниках, кроків зубчастих і ланцюгових передач, яка може характеризувати динамічні навантаження, несучу здатність, шум і вихідну точність.

Якщо розглядається зношування підшипника ковзання (без істотного викривлення форми), то $h_{\text{меж.}}$ – гранично припустимий проміжок, $\bar{h}_{\text{поч.}}$ – середнє значення початкового проміжку, середнє квадратичне відхилення початкового проміжку:

$$S_h = \sqrt{S_{\text{с.}}^2 + S_{\text{вт.}}^2}, \quad (8.21)$$

де $S_{\text{с.}}$, $S_{\text{вт.}}$ – середні квадратичні відхилення діаметрів валу й втулки, прийняті рівними шостій частині відповідних допусків.

У ланцюгових передачах ресурс звичайно обмежений зношуванням ланцюга, при якому може порушитися його зачеплення з зірочкою (приймають припустимим збільшення кроку ланцюга 3 %). Хоча зі зношуванням ланцюга зношується також і зірочка, зношування останньої менш інтенсивне, тому що в сполученні ролик ланцюгу – зуб зірочки має місце, як правило, тертя кочення, а в шарнірному сполученні двох ланок більшості ланцюгів – тертя ковзання. У цьому випадку $h_{\text{меж.}}$, $\bar{h}_{\text{поч.}}$, S_h –

межеве і середнє початкове значення кроку ланцюга, а також середнє квадратичне відхилення початкового кроку.

Для технічних цілей використовуються розрахунки на основі подібності:

$$I = k_1 p^m, \quad (8.22)$$

де k – тут і далі з різними індексами коефіцієнти пропорційності; p – тиск у контактї; m – показник ступеня, що залежить від умов роботи (зазвичай $1 < m < 3$, для прироблених поверхонь $m \approx 1$).

Для металевих матеріалів у природньому стані й відпалених сталей при абразивному зношуванні

$$I = k_2 \frac{p}{H}. \quad (8.23)$$

Ця закономірність зберігається до твердості матеріалу, що не перевищує значень 0,6...0,75 твердості абразиву. При більших значеннях H залежність інтенсивності I від твердості трохи знижується в порівнянні з розрахунковою. Для загартованих сталей залежність зносостійкості від твердості лінійна (з вільним членом).

Показник ступеня I при твердості H може в окремих випадках відрізнятися від одиниці і доходити до двох, в такому разі:

$$I = k_3 \frac{p^m}{H^l}. \quad (8.24)$$

Сумарне зношування сполучених поверхонь I і 2 дорівнює:

$$I = I_1 + I_2. \quad (8.25)$$

Тоді сумарне зношування сполучення дорівнює:

$$\frac{1}{H^l} = \frac{1}{H_1^l} + \frac{1}{H_2^l}, \quad (8.26)$$

де H_1 і H_2 – твердості сполучених поверхонь деталей.

Формула для інтенсивності зношування, якщо відомі надійні значення коефіцієнта тертя f , має вигляд:

$$I = k_4 \frac{p^m f^n}{H^l}, \quad (8.27)$$

де $k_4 = k_3 / f_0^n$; f і f_0 – коефіцієнти тертя розглянутої і вихідної пари; m, n, l – показники ступенів, що залежать від впливу змащення, термообробки деталей і ступеню близькості p до межового значення $[p]$, при якому проявляється схоплювання матеріалів.

Ця формула може бути корисною при перерахуваннях інтенсивності зношування близьких матеріалів. У формулі в більшості випадків можна приймати $n = 1$. Якщо має місце тертя сталі по іншому матеріалу, то $l = 1$, якщо тертя загартованої сталі по загартованій сталі, то $l = 2...3$, що пов'язане з різко підвищеним у загартованих сталей опором до схоплювання, який звичайно суттєво прискорює зношування. При терті деталей без змащення і при граничному терті деталей зі змащенням у випадку, якщо $p \leq (0,7...0,8) [p]$, $m = 1$, при великому тиску $m = 2...3$. При напіврідинному терті деталей зі змащенням при будь – яких тисках значення m підвищується, доходячи до 3. Це підвищення пов'язане з тим, що при рості загального навантаження одночасно збільшується його частка, сприймана контактом мікронерівностей.

Експериментальні дані по зубчастих і ланцюгових передачах, а також інші дослідження показали, що інтенсивність зношування росте пропорційно кількості абразиву q , $2/3$ до, що поступає в зону тертя. Тому, якщо відомо q , то як при змащенні, так і без нього

$$I = k_5 q \frac{p}{H^l}. \quad (8.28)$$

Формула відрізняється від (8.27) тим, що прийняте $m = 1$, а замість f^n вводиться q .

Формули (8.24)...(8.28) дозволяють виразити коефіцієнт варіації інтенсивності зношування v_I через коефіцієнти варіації тиску v_p , коефіцієнта тертя v_f , твердості v_H і кількості абразиву v_q . Показники ступенів при p, f, H до накопичення уточнюючих даних приймаємо детермінованими величинами:

$$v_I = \sqrt{(mv_p)^2 + (mv_f)^2 + (lv_H)^2}. \quad (8.29)$$

У випадку зношування із заданою кількістю абразиву

$$v_I = \sqrt{v_q^2 + v_p^2 + (lv_H)^2}. \quad (8.30)$$

Значення v_H при розгляді зношування сполучених деталей може бути оцінене за коефіцієнтами варіації твердості деталей v_{H1} , v_{H2} :

$$v_H = \sqrt{\left[\left(\frac{\bar{H}}{\bar{H}_1} \right) v_{H1} \right]^2 + \left[\left(\frac{\bar{H}}{\bar{H}_2} \right) v_{H2} \right]^2}. \quad (8.31)$$

Якщо прийняти у формулі (8.27) коефіцієнти m , n , l випадковими, то коефіцієнт варіації інтенсивності зношування за рахунок тільки розсіювання значень показників ступенів буде оцінюватися як:

$$v_{I \text{ смун.}} = \sqrt{\left(\ln \frac{\bar{p}}{p_0} S_m \right)^2 + \left(\ln \frac{\bar{f}}{f_0} S_n \right)^2 + \left(\ln \frac{\bar{H}}{H_0} S_l \right)^2}, \quad (8.32)$$

де $\bar{p}$, $\bar{f}$, $\bar{H}$ – середні значення параметрів p , f , H у розглянутому режимі роботи пари тертя; p_0 , f_0 , H_0 – вихідні значення параметрів p , f , H , при яких отримано значення коефіцієнта k_d у формулі (8.27); S_m , S_n , S_l – середні квадратичні відхилення показників ступенів m , n , l у розглянутому режимі роботи. Тоді при зношуванні без абразиву в загальному випадку формула (8.29) доповнюється введенням члена $v_{I \text{ смун.}}^2$ під коренем:

$$v_{I \text{ смун.}} = \sqrt{(mv_p)^2 + (mv_f)^2 + (lv_H)^2 + v_{I \text{ степен}}^2}. \quad (8.33)$$

Якщо розрахована або експериментально оцінена середня інтенсивність зношування, то формули (8.24)...(8.33) дозволяють по розсіюванню параметрів деталей і режиму роботи оцінити ймовірність безвідмовної роботи деталі за критерієм зношування.

Приклад. Оцінити ймовірність безвідмовної роботи P за критерієм зношування підшипника ковзання із графітопласта АМС –3 твердістю $HB\ 30...40$ ($\bar{H}_1 = 35$), що працює при сухому терті. Ресурс $t = 800$ год. Сполучення підшипника з валом виконано по посадці $30\ H8/d8$. Вал сталевую твердістю $HB\ 340...370$ ($\bar{H}_2 = 355$). Умови тертя – найбільший тиск у контакті при середньому проміжку $\bar{p} = 5$ МПа, $v = 0,2$ м/с, $f = 0,05...0,1$. Середня інтенсивність зношування в цих умовах при $f_0 = 0,075$ $\bar{l} = 10^{-10}$. Межевий припустимий проміжок $h_{нпрп.} = 0,15$ мм. Передбачається, що розсіювання показників ступенів m , n , l відсутнє.

Рішення.

Оцінка допусків для підшипника і валу, відповідні посадці 30 H8/d8, дозволила одержати $\bar{h}_{\text{поч.}} = 0,073$ мм, $S_{\text{от}} = 0,0055$ мм, $S_{\text{е}} = 0,0055$ мм. Звідси:

$$S_k = \sqrt{S_{\text{в}}^2 + S_{\text{от}}^2} = \sqrt{0,0055^2 + 0,0055^2} = 0,0075 \text{ мм.}$$

Приймаємо $m = 1$, $n = 1$, $l = 1$.

$$\text{Обчислюємо } \bar{H} = \frac{\bar{H}_1' \bar{H}_2'}{\bar{H}_1' + \bar{H}_2'} = \frac{35 \cdot 355}{35 + 355} = 31,85.$$

Щоб урахувати розсіювання максимального тиску, викликаного розсіюванням проміжку, скористаємося формулами, що зв'язують максимальний тиск і проміжок. Проробивши обчислення, отримаємо $v_p = 0,035$.

Вважаючи, що середнє квадратичне відхилення дорівнює шостій частині допуску, маємо $v_f = 0,11$, $v_{H1} = 0,048$, $v_{H2} = 0,014$. Підставляючи ці значення у формули (8.14), (8.29), (8.31), , отримаємо $v_H = 0,045$, $v_l = 0,124$, $\bar{\Delta} = 0,077$ мм, $v_{\Delta} = 0,1$, $n = 1,34$, $u_p = -1,86$. Знаючи u_p , з ймовірнісних таблиць знаходимо $P = 0,965$.

8.9. Технологічне забезпечення надійності вузлів тертя

Такі експлуатаційні властивості деталей і з'єднань, як межа витривалості, корозійна стійкість, зносостійкість, коефіцієнт тертя, контактна твердість, міцність посадок, герметичність з'єднань залежать від стану поверхневого шару деталей, обумовленого технологією їх виготовлення.

Технологічний процес виготовлення деталей з високими показниками якості – точності і міцності – є складним і суперечливим. У процесі зміцнення, наприклад, при хіміко – термічній обробці, падає точність, досягнута на попередніх операціях механічної обробки, а при досягненні необхідної точності при механічній обробці після зміцнення знімається якісний шар, виникають несприятливі залишкові напруження, тобто знижуються міцність і твердість робочих поверхонь деталей. Незалежно від способу обробки і методу зміцнювальної технології завдання технологічного процесу полягає в створенні зносостійкої або робочої поверхні деталі, що добре припрацьована. Вибір способу обробки поверхні і призначення параметрів поверхневого шару здійснюється конструкторськими службами разом з технологами за результатами

всебічного аналізу і техніко – економічних розрахунків, особливо для виробів масового виробництва.

Працездатність матеріалу деталі багато в чому залежить від технологічних способів і методів, застосовуваних у процесі його отримання та обробки. Так, термін служби підшипників кочення, виготовлених зі сталі, отриманої методом вакуумного переплаву, збільшується в 4 рази. Отримання матеріалу з малим розсіюванням показників його властивостей повинне починатися з дотримання стабільного складу вихідних матеріалів певної якості, наприклад, шихти. Недотримання цього положення найчастіше не може бути надалі компенсоване. Наприклад, чавуни мають спадкоємні властивості – з одних доменних чавунів у складі шихти при плавці у вагранках або печах можна одержувати виливки необхідної структури, з інших чавунів того ж хімічного складу це робити важко або взагалі неможливо. В алюмінієво – залізо – нікелевій бронзі при 4% Fe і 4% Ni збільшення змісту Al з 10 % до 11 % різко знижує опір зношуванню пари бронза – сталь.

На зносостійкість і загальну міцність деталей впливає і спосіб отримання заготовки. Наприклад, виливок із сірого чавуну піддають низькотемпературному відпалу для зняття внутрішніх напружень (при температурі 550...600 °C при швидкості нагрівання 100 °C/год, залежно від конфігурації і розмірів виливків витримка становить від 1 до 8 год.). При тривалому впливі на чавун високої температури відбувається часткова коагуляція цементиту в перліті, можлива його міграція до границь зерен, намічається перехід від пластинчастого перліту до зернистого. Це найбільш характерно для тонкостінних виливків і знижує зносостійкість чавуну.

При експлуатації деталей може проявлятися нестабільність форми і розмірів деталей, не пов'язана зі зношуванням поверхонь. Залишкова зміна форми і розмірів деталей в умовах нормальної або близької до неї температури середовища може бути обумовлена розпадом структурних складових, переходом однієї модифікації складовий матеріалу в іншу, релаксацією залишкових напружень і взаємодією матеріалу із середовищем. У деяких деталях після загартування зберігається деяка кількість аустеніту, яка перетворюється потім при відпустці, обробці холодом або при холодній деформації в мартенсит або троостит. Однак і після цих операцій може зберегтися деяка частка залишкового аустеніту, який згодом розпадається. У плунжерних парах, підшипниках кочення та інших деталях у місцях розпаду залишкового аустеніту збільшується об'єм, що зменшує проміжки, підвищує навантаження на тіла кочення і може привести до тимчасового або повного заклинювання плунжерів. Жолоблення станин, циліндрів, правлених валів – результат релаксації залишкових напружень.

Шляхи управління поверхневою міцністю деталей при терті залежить від властивостей нової фази – вторинних структур, що утворюються з вихідного матеріалу шляхом його структурної перебудови і взаємодії із середовищем. Ця трансформація приводить спочатку до створення нової фази – істинного об'єкта руйнування – і тільки потім до його руйнування. У цьому і полягає корінна відмінність об'ємного та поверхневого руйнування і міцності. Однак існують такі умови тертя, при яких має місце і безпосереднє руйнування основного матеріалу. Це різні види зруйнованості: схоплювання, мікрорізання, проникнення і проорювання, фретінг – процес та ін. Процеси мінімального тертя і зношування, обумовлені утворенням і руйнуванням вторинних структур, класифікуються як процеси нормального тертя і зношування. В основі цих процесів лежить універсальне явище структурної пристосованості (СП) матеріалів при терті. Універсальність цього явища полягає в тому, що воно реалізується при терті будь-яких матеріалів у певному діапазоні навантажень і швидкостей переміщення, що залежить від цих матеріалів. Цей діапазон залежить також від складу і концентрації активних компонентів зовнішнього середовища і температури. Сутність явища СП полягає в тому, що при його реалізації відбувається масштабний стрибок: усі взаємодії третьових твердих тіл і середовища (механічні, хімічні, електричні та ін.) локалізуються в тонкоплівкових об'єктах – вторинних структурах. Вторинні структури екранують вихідний матеріал від механічної і фізико-хімічної деструкції. Зовнішні механічні впливи неминуче приводять до руйнування вторинних структур, але ці ж дії й сполучені процеси переносу речовини із середовища забезпечують регенерацію фази, що екранує.

Висока зносостійкість при СП може бути досягнута в результаті зменшення товщини плівок вторинних структур, збільшення часу їх життя, оптимізації площі, займаної вторинними структурами, і розподілу їх на поверхнях тертя. Для досягнення максимальної зносостійкості в рамках явища СП необхідно використовувати засоби зменшення активації (деформування) поверхневих шарів (технологію зміцнення, високоміцні матеріали, спеціальні сплави), засоби, що зменшують роботу тертя (антифрикційні матеріали, оптимальні комбінації матеріалів, мастильні середовища), засоби регулювання пасивації (присадки до мастильних середовищ, що модифікують) і управління температурою. Ефективність управління пасивацією ґрунтується на створенні вторинних структур, що мають високу міцність і пластичність, при відсутності різкого переходу від структури трансформованих плівок до основного матеріалу.

Обґрунтоване застосування методів технології зміцнення можливо за умови правильної комбінації первинних або вихідних показників

властивостей поверхневих шарів і умов експлуатації. Сьогодні відомі десятки різних методів зміцнення, що відрізняються механічними, фізичними, хімічними і комбінованими механізмами зміцнення. Застосування методів технології зміцнення повинне задовольняти двом основним вимогам: мінімізації нормального механохімічного зношування і розширенню діапазону нормальних процесів шляхом захисту від неприпустимих явищ пошкоджуваності. За призначенням всі існуючі методи технологічного поверхневого зміцнення можна поділити на дві групи. При зміцненні можна отримати первинні структури двох типів: 1) із властивостями, що забезпечують можливість оптимальної перебудови і додаткового зміцнення в конкретних умовах експлуатації (механічний і фазовий наклеп, хіміко – термічна обробка, гальванічні покриття та ін.); 2) з максимально можливою стабільністю по відношенню до механічних і хімічних дій. 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 отримувати первинні структури з високостабільними властивостями, що мало змінюються в складних і несприятливих умовах навантаження (борування, дифузійне хромування, карбідізоване електролітичне хромування, газотермічне напилювання твердих покриттів та ін.).

Методи зміцнення поверхонь тертя. При використанні різних методів енергетичної дії на поверхню реалізуються процеси, що приводять до модифікування поверхневих шарів: 1) міжзернові структурні зміни, виникнення дислокацій, викривлення кристалічних решіток; 2) зміна параметрів кристалічних решіток; 3) зміна виду кристалічних решіток; 4) синтезування хімічних сполучень; 5) руйнування кристалічних решіток (аморфізація). Для модифікування поверхонь застосовуються, переважно, наступні методи дії: механічні, термічні, термодифузійні, високоенергетичними потоками випромінювання, що проникають. При цьому в поверхневому шарі реалізуються один або кілька зазначених вище процесів.

Методи обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) досить продуктивні і засновані на використанні пластичних властивостей металу – на його здатності необоротно деформуватися під дією зовнішніх сил без порушення цілісності волокон. При обробці ППД у більшості випадків можна використовувати парк металорізального встаткування,

наявний на заводі. Їх застосування забезпечує шорсткість поверхні в межах $Ra = 0,63...0,125$ мкм, відсутність концентраторів напружень (рисок, надрізів та ін.) при високій розмірній стійкості інструменту. При зміцненні металу способами ППД підвищується поверхнева твердість, межа текучості і пружності, створюються залишкові напруження стиску, збільшується опорна поверхня.

Зміцнення металу змінює його втомну міцність, але ще в більшій мірі – зносостійкість при зовнішньому терті. Дробоструминний наклеп збільшує в 1,5...2 рази зносостійкість сталей при сухому терті, коли проявляється схоплювання, і більш ніж в 2 рази підвищує зносостійкість сталей 20Х цементованої, 37ХН3А загартованої і 45 нормалізованої в умовах втомного зношування.

Модифікування поверхонь термічною дією здійснюється у твердому стані і з розплавленням поверхні. Для цих цілей використовуються індукційне нагрівання, нагрівання газовим полум'ям і плазовими потоками, світло – променеве, електронно – променеве та іонно – променеве нагрівання. Вплив здійснюється як у безперервному, так і в імпульсному режимі нагрівання. Найбільше поширення отримало поверхневе загартування, обумовлене поліморфними перетвореннями. При цьому в поверхневому шарі може відбуватися істотна зміна параметрів кристалічних решіток, а також зміна типу решітки. У загальному випадку відбувається зміна структури зерен.

Поверхневе загартування застосовують звичайно для утворення твердого зносостійкого шару на певних ділянках деталей, виготовлених із середньо – і високовуглецевих та перлітних сталей, ковкого, сірого і високоміцного чавунів зі змістом не менш 0,6 % зв'язаного вуглецю. Традиційними методами поверхневого загартування є: полум'яна обробка, контактна, високочастотна і з нагріванням в електроліті. Глибину загартування призначають не менш 1,5...2 мм. При більших контактних тисках для попередження продавлювання загартованого шару глибину загартування призначають 4...5 мм і більше.

Основною відмінною рисою методів поверхневого зміцнення висококонцентрованими джерелами нагрівання є можливість отримання швидкостей нагрівання та охолодження матеріалів, на кілька порядків перевищуючих значення, характерні для традиційних методів зміцнення (грубоного загартування, загартування ТВЧ, газополум'яного загартування та ін.), що сприяє одержанню зміцнених шарів з недосяжним раніше рівнем експлуатаційних властивостей.

Азотування серед методів хіміко – термічної обробки займає одне із провідних місць. Азотування зазнають спеціальні сталі (нітроалой), що містять елементи, які утворюють нітриди високої термічної стійкості типу

CrN, *MoN*, *AlN*. Крім того, внаслідок наявності вуглецю в азотованому шарі формуються карбонітриди типу $Fe_3(C_3N)$ або $Fe_3(N,C)$. Найчастіше азотування зазнає сталь *35ХМЮА*. На відміну від цементації азотований шар відрізняється надзвичайно високою твердістю і невеликою товщиною. Азотування конструкційних сталей підвищує опір схоплюванню.

Більш широко використовується процес комбінованої хіміко – термічної обробки, що складається з науглецювання та азотування. Характеристики зносостійкості і стійкості проти заїдання сталей *12Х18Н10Т* і *Х16Г5АН4* після азотонауглецювання суттєво вище, ніж при азотуванні. Для зниження тертя і зношування застосовують фосфатування, сульфоціанування та нітросульфидування.

Найбільш висока твердість (*HV 1500...2000*) досягається при боруванні, тому цей процес в основному використовують для підвищення зносостійкості матеріалів, що працюють в абразивному середовищі.

Традиційні методи дифузійної металізації також застосовуються для підвищення зносостійкості. Наприклад, для захисту сталей *12Х2Н4Ф* та *18Х2Н4ВА* від фретінг – корозії рекомендується дифузійне хромування. Термохромування вуглецевих сталей знижує коефіцієнт тертя в 2 рази. Для підвищення зносостійкості сталей, особливо в умовах абразивного зношування, застосовують термічне титанування, ванадіювання і титано – ванадіювання. Зносостійкість сталі *В8* збільшується в порівнянні з традиційною термообробкою в 5...11 разів.

Іншим перспективним напрямком зміцнення поверхонь тертя є осадження захисних і функціональних покриттів і плівок наплавленням, газотермічним напилюванням, осадженням з газової фази, елетрохімічним і хімічним осадженням та ін.

Очищення і мийка деталей. Якість очищення особливо впливає на стан поверхонь тертя, що отриманий в період припрацювання. Ризики, подрипини, задирки, що виникають у цей період, знижують гідродинамічний тиск у проміжках підшипників, створюють локальні концентрації напруження у зоні дефекту, порушують тепловий і навантажувальні режими поверхонь, що сполучаються, і впливають на первісне зношування деталей. Тому зниження первісного зношування за рахунок підвищення якості очищення і мийки деталей у процесі виготовлення суттєво впливають на збільшення терміну служби. На ефективність очищення впливають організація і технологія виробництва, конструкція, матеріал і стан об'єкта очищення, вид і ступінь забруднення поверхні. У перший період роботи миючого розчину відбувається поступове зменшення його миючої здатності. Миюча здатність може знижуватися в основному через збільшення концентрації забруднень у розчині і коливання його хімічного складу. Змінюються поверхневий натяг

миючих рідин, крайовий кут змочування та інші параметри, що визначають миючі якості розчину. При насиченні мийного розчину забрудненнями залишкове забруднення деталей різко збільшується. Розчин майже повністю втрачає мийочу здатність і лише змочує деталі.

8.10. Забезпечення надійності машин при експлуатації

Експлуатація верстатів являє собою систему заходів, що включає в себе консервацію і пакування, транспортування і монтаж, налагодження устаткування, контроль геометричної і технологічної точності, відхід і обслуговування.

Зовнішнє очищення машини необхідне для перевірки кріплень, виконання контрольно – налаштувальних робіт, попередження засмічення змащення під час заправлення системи, запобігання від корозії та ін.

Кріплення вузлів машини прямо або побічно впливає на її зносостійкість. Ослаблення кріплень виникає внаслідок залишкових і пружних деформацій і може бути викликане також вібраціями. Кріплення необхідно систематично перевіряти.

Потрібна періодична перевірка систем охолодження, змащення, гідравлічних пристроїв та ін. Для компенсації зношування або залишкових деформацій регулюють проміжки в підшипниках, клапанах, у передатних гвинтах і гайках, у фрикційних муфтах, гальмах та ін.; приводять у норму натяг пружин, ланцюгів і стрічок.

Догляд за гідросистемою передбачає контроль температури оливи, яка звичайно не повинна перевищувати $\pm 50^{\circ}\text{C}$. Першу зміну оливи в гідросистемі, як правило, проводять через 0,5...1 міс. роботи, щоб вилучити продукти притирання механізмів. Надалі оливу змінюють через 4...6 міс. за результатами аналізу мастильного матеріалу.

Обкатування верстатів. Призначення обкатування – припрацювання в єдиному комплексі всіх пар тертя, що входять до складу верстату. Похибки поверхонь деталей, що сполучаються, і неточності взаємного розташування робочих поверхонь у з'єднаннях обумовлюють досить малу фактичну площу контактування деталей. Прикладання експлуатаційних навантажень до деталей при такому контактуванні їх поверхонь призвело б при роботі верстату до швидкого перегріву в багатьох парах і заїданню в них. Обкатування верстату або механізму готує їх до сприйняття експлуатаційних навантажень при відповідних швидкісних режимах.

Під час обкатування повинні бути реалізовані два процеси:

а) зношування поверхонь на вершинах хвиль шорсткості і на ділянках, де вихідні технологічні дефекти, дефекти монтажного походження, силові

теплові деформації перешкоджають поширенню плями контакту до проектної;

б) ліквідація вихідної шорсткості поверхні і формування нової, з певними параметрами і спрямованістю, характерними для кожної поверхні тертя при роботі машини на експлуатаційному режимі найбільшої тривалості.

Значні технологічні дефекти виготовлення деталей і складання машини та конструктивні недоліки в забезпеченні гарного взаємного прилягання поверхонь не можуть бути усунуті при обкатуванні і навіть при роботі машини протягом міжремонтного періоду.

Припрацювання протікає на окремих ділянках у режимах напівсухого, межового і напіввідинного тертя. При цьому відбувається підвищення нагромадження продуктів зношування. Можливе відділення великих часток при викрашуванні і спрацьовуванні найбільш виступаючих нерівностей. Тому бажано при стендовому обкатуванні машин, залежно від їхнього типу і масштабів виробництва, мати спеціальну циркуляційну систему змащення з посиленою фільтрацією для запобігання поверхонь тертя від ушкодження продуктами зношування і змушеної необхідності у зв'язку із цим подовжити час припрацювання.

Промивання третьових поверхонь гасом після обкатування неприпустиме: гас змиває оливну плівку і після пуску верстату поверхні будуть короткочасно працювати в суху. Розбирання вузлів тертя по закінченню стендового обкатування для контролю деталей вимагає надалі додаткового обкатування.

Критерії оцінки завершення припрацювання:

а) перехід на прямолінійну ділянку кривої зношування (можливо встановити за визначенням заліза в оливі);

б) досягнення мінімуму потужності, що потрібна на холостий хід верстату;

в) стабілізація моменту тертя і температури;

г) досягнення певного ступеня прилягання контактуючих поверхонь.

Тривалість обкатування визначається початковою шорсткістю третьових поверхонь, точністю обробки деталей та їх складання, матеріалом деталей найбільш напружених пар тертя і залежить від експлуатаційних режимів роботи верстату, від режимів обкатування і від властивостей змащення.

Обкатування є заключною ланкою в технологічному ланцюзі виробництва або ремонту. Металорізальні верстати після ремонту випробовують на холостому ході, пускаючи послідовно верстат на всіх швидкостях і подачах та залишаючи його працювати на максимальній швидкості 1,5...2 години. Потім верстат випробовують під навантаженням,

обробляючи зразки. Тут обкатування сполучене з випробуванням і воно нетривале.

Для скорочення часу обкатування застосовують присадки до оливи, що дозволяють форсувати режим. При цьому обкатування найчастіше ведуть на оливах необхідної в експлуатації в'язкості, оскільки при підвищеному температурному режимі олива розріджується. Присадками до оливи при обкатуванні можуть служити: поверхнево – активні речовини та їх металеві мила; органічні сполуки сірки, хлору, фосфору та інших активних компонентів; органозолі. Останнім часом для обкатування застосовують металоплакуючі присадки.

В основі дії поверхнево – активного змащення лежить механізм адсорбційного пластифікування. При невисоких тисках у контакті мастило, утворюючи міцний адсорбований шар, розділяє поверхні тертя і зменшує зношування. На неприпрацьованих поверхнях, де розвиваються високі місцеві тиски, мастило пластифікує метал, прискорює зношування.

Змащення верстатів. При роботі машин кількість оливи зменшується; вона убуває внаслідок витоків через нещільності, деяка її частка переходить у шлам, частина губиться разом з водою, що видаляється, випаровується. Втрати оливи в системі періодично заповнюють додаючи свіжу.

Олива в системі внаслідок старіння втрачає мастильні властивості; незважаючи на дію очисних пристроїв потрібна періодична заміна її свіжою. Незалежно від регламентованих строків, зміна оливи проводиться у випадках випадання шламу вище звичайного і виходу значень кислотного числа, в'язкості та інших показників за межі встановлених норм. У системах з великою ємністю рекомендується періодично робити аналіз працюючої оливи.

У пластичного змащення, що наповнює деяку порожнину продуктами зношування, засмічується тільки робочий шар, тобто шар, що покриває поверхні тертя. Сильне забруднення цього шару підсилює зношування деталей і ускладнює зміну змащення. Свіже мастило, що подається, переміщає мастило, що не працювало, витісняє значну частину забрудненого мастила, змішує його залишок з іншим.

Кarti змащення. Крім загальної інструкції зі змащення верстата, складають для наочності і, щоб уникнути пропусків, карту змащення. Карта змащення – схематичне креслення машини зі специфікацією з позиціями точок, що змащуються. Усі точки, що змащуються, повинні бути видні; при необхідності приводять схеми вузлів. На кресленні особливо чітко повинні бути нанесені місця заливу і зливу оливи, насоси, фільтри, оливо покажчики та олійниці. При централізованому змащенні обов'язково дають на схемі машини розведення мастилопроводів.

Специфікація карти змащення повинна містити всі необхідні відомості для обслуговування машини. У специфікацію вносять: 1) порядкові номери точок, що змащуються, у кінематичній послідовності по вузлах; 2) найменування вузлів і деталей, що змащуються, причому із двох деталей пари надається найменування тільки однієї; 3) число точок, що змащуються, позначених на схемі одним номером; 4) найменування мастильної системи точки (ручна, набивна, ковпачкова олійниця, ванна і т.п); 5) сорт мастильного матеріалу і норма витрати за робочу зміну; 6) режим – періодичність змащування, долив оливи, зміна її; 7) ємність мастильної системи.

Ремонт верстатів. Поступове зношування верстатів у процесі експлуатації проявляється в зниженні точності обробки, підвищеному шумі, у більш частому виникненні неполадок і відмов. Підтримати верстати у працездатному стані і відновити втрачені в процесі експлуатації технічні показники можливо тільки ремонтом.

Зараз ставиться на чергу завдання переходу на *безремонтну експлуатацію або ремонт без розбирання машини*. Під останнім терміном розуміють:

- усунення капітальних ремонтів;
- відновлення зношених вузлів тертя без їхнього розбирання;
- широке використання діагностичних засобів з метою оцінки фактичного стану машини;
- перехід вузлів тертя машини на змащування їх металоплакуючими мастильними матеріалами;
- у деяких випадках використання відновлювального ремонту і заміна його комплектаційним ремонтом, здійснюваним заміною деталей, вузлів і агрегатів, що зносилися.

Перехід на безремонтну експлуатацію є комплексним завданням. Рішення цього завдання повинне базуватися на наступному:

- перехід від планово – запобіжної системи ремонту до ремонту за технічним станом;
- використання методів підвищення зносостійкості тертьових деталей, заснованих на ефекті беззношуваності (вибірковому переносі при терті), включаючи конструктивні, технологічні та експлуатаційні методи;
- використання в машині фіксуєючих поверхонь тертя, що не зношуються та служать при встановленні змінних деталей;
- використання в машині агрегатного принципу, який допускає незалежну зміну пар тертя і вузлів, що зношуються.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Авдеев Н.В. Металлирование. Москва: Машиностроение, 1978. 184 с.
2. Авраамова Т.М., Бушуев В.В., Гиловой Л.Я.; под ред. В.В.Бушуева. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т. Т.1. Москва: Машиностроение, 2011. 608 с.
3. Андрийчук Н.Д., Иващенко Е.А., Коваленко А.А., Соколов В.И. Термодинамика для инженеров-строителей. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. 304 с.
4. Андрийчук Н.Д., Соколов В.И., Коваленко А.А., Дядичев К.М. Пути совершенствования систем теплоснабжения. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. 244 с.
5. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. Москва: Физматгиз, 1963. 472 с.
6. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник. Самара: Самар. Гос. техн. ун-т., 2000. 268 с.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. Москва: Наука, 1983. 416 с.
8. Боуден Ф.П., Тейбор Д.; под ред. И.В. Крагельского. Трение и смазка твердых тел. Москва: Машиностроение, 1968. 549 с.
9. Бушуев В.В., Еремин А.В., Какойло А.А.; под ред. В.В. Бушуева. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т. Т.2. Москва: Машиностроение, 2011. 586 с.
10. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
11. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. Ленинград: Машиностроение, 1979. 224 с.
12. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Москва: Машиностроение, 1989. 328 с.
13. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): Учебник. - 5-е изд., перераб. и доп. Москва: "Издательство МСХА", 2002. 632 с.
14. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Методы поверхностной лазерной обработки. Москва: Высш. шк., 1987. 191 с.
15. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова. Москва: 1979. 367 с.
16. Долецкий В.А. Увеличение ресурса машин технологическими методами. Москва: Машиностроение, 1978. 216 с.
17. Жарский И.М., Баршай И.Л., Свидуневич Н.А., Спиридонова Н.В. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин. Минск: Вышэйшая школа, 2005. 299 с.
18. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. Москва: Машиностроение, 2008. 320 с.

19. Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. Киев: Наук. думка, 1986. 264 с.
20. Кершенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. Москва: Машиностроение, 1987. 232 с.
21. Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. Киев: Техника, 1990. 192 с.
22. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. Луганск: ВУГУ, 1998. 272 с.
23. Коваленко А.А., Соколов В.И., Осенин Ю.И., Кондауров Е.Н. Аэрогидромеханика. Ч.5. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. Луганск: ВНУ, 2002. 64 с.
24. Коваленко А.А., Соколов В.И., Осенин Ю.И., Кондауров Е.Н. Аэрогидромеханика. Ч.1. Основы механики сплошных сред. Луганск: ВНУ, 2001. 64 с.
25. Коваленко А.А., Соколов В.И., Осенин Ю.И., Кондауров Е.Н. Аэрогидромеханика. Ч.3. Основы динамики сплошной среды. Луганск: ВНУ, 2001. 40 с.
26. Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. Луганск: ДонГАСА, 1999. 137 с.
27. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособие. Москва: Высш. шк., 1991. 319 с.
28. Костецкий Б.И., Колесниченко Н.Ф. Качество поверхности и трение в машинах. Киев: Техніка, 1969. 216 с.
29. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К.; под общ. ред. Б.И. Костецкого. Поверхностная прочность материалов при трении. Киев: Техніка, 1976. 296 с.
30. Крагельский И.В. Трение и износ. Москва: Машиностроение, 1968. 479 с.
31. Кроль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Луганск: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
32. Кроль О.С. Методы и процедуры оптимизации режимов резания. Луганск: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2013. 260 с.
33. Кроль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2014. 154 с.
34. Кроль О. С. Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов. Северодонецк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2015. 120 с.
35. Кроль О. С., Бурлаков Е. И.: Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ». 2013. – № 11 (985). – С. 33-38.
36. Кроль О.С., Соколов В.И. Методы и процедуры инженерного прогнозирования в станкостроении. Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. 116 с.
37. Кроль О.С., Соколов В.И. Методы и процедуры рационального выбора в станкостроении. Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. 112 с.
38. Кроль О.С., Соколов В.И. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Северодонецк: СНУ ім. В. Даля, 2016. 160 с.

39. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2011. 388 с.
40. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів з використанням системи КОМПАС. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2013. 144 с.
41. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов: учеб. пособие. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 237 с.
42. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. Москва: 1971. 264 с.
43. Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И., Комар В.И. Плазменное поверхностное упрочнение. Киев: Техника, 1990. 109 с.
44. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. Москва: Машиностроение, 2008. 206 с.
45. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. Москва: Машиностроение, 1977. 167 с.
46. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса / Под ред. Д.Н. Гаркунова. Москва: Машиностроение, 1977. 215 с.
47. Пономарев В.П., Батов А.С., Захаров А.В. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин. Москва: Машиностроение, 1984. 184 с.
48. Проников А.С. Надежность машин. Москва: Машиностроение, 1978. 592 с.
49. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
50. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. Москва: 1974. 206 с.
51. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. Москва: Высшая школа, 1988. 238 с.
52. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. Москва: Машиностроение, 1985. 152 с.
53. Соколов В.И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем. Луганск: ВУГУ, 1999. 200 с.
54. Соколов В.И., Коваленко А.А., Калюжный Г.С. и др. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке. Луганск: ВУГУ, 2000. 168 с.
55. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.
56. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2018. 148 с.
57. Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О. Дослідження динамічних характеристик електрогідравлічного приводу технологічного обладнання. Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. 2019. № 1(249). С. 55-60.
58. Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О. Корекція автоматичного електрогідравлічного приводу технологічного обладнання. Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. 2020. № 4(260). С. 72-78.
59. Соколов В.І., Степанова О.Г., Степчук Я.І., Кавун Д.Ю., Ткаченко М.К. Розробка та дослідження системи автоматичного керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертового руху. Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. 2017. № 7(237). С. 63-70.

60. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.1 / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. Теоретические основы. Москва: Машиностроение, 1989. 400 с.
61. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т.2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. Москва: Машиностроение, 1990. 416 с.
62. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. Москва: Машиностроение, 1987. 208 с.
63. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с.
64. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2-х кн. Кн.1 / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. Москва: Машиностроение, 1978. 400 с.
65. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн.2 / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. Москва: Машиностроение, 1979. 358 с.
66. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.
67. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела: учеб. пособие. Луганск: изд-во ВУГУ, 2000. 624 с.
68. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие. В 2 т. Т.1. Луганск: изд-во ВУНУ, 2003. 496 с.
69. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие. В 2 т. Т.2. Луганск: изд-во ВУНУ, 2003. 480 с.
70. Харламов Ю.О., Клименко С.А., Будаг'янц М.А., Полонський Л.Г. Обробка деталей при відновленні і зміцненні: навч. Посібник. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2007. 500 с.
71. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. Северодонецк: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2017. 320 с.
72. Харламов Ю.О., Соколов В.І., Кроль О.С., Міцик А.В., Романченко О.В. Забезпечення надійності різального інструменту. Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2019. 212 с.
73. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ, и доп. Москва: Машиностроение, 2001. 664 с.
74. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. Москва: Советское радио, 1968. 288 с.
75. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O.: Analysis of physical and chemical transformations during thermal spraying of coatings based on carbides of tungsten and chromium. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 985 012036 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012036>.
76. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O.: Research of the mechanism of particles bonding with substrate during thermal spraying of coating. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 985 012037 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012037>.
77. Kharlamov Yu., Sokolov V., Krol O., Romanchenko O., Mitsyk A. Assurance of cutting tools reliability. Severodonetsk: Publishing house of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2020. 190 p.

78. Krol O. Engineering Forecasting of Machine Tools for Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. 114 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/EFMTD.2019>.
79. Krol O. Machine Tools Spindle Dynamics for Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2020. 143 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/MTSDD.2020>
80. Krol O. Selection of Machine Tools Optimal Cutting Modes for Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2020. 240 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/SMTOCMD.2020>
81. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OLPAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
82. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l academie bulgare des sciences* 72(11), 1546-1556 (2019). DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>.
83. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conference Series* 1278, 012002 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>.
84. Krol O., Sokolov V. 3D Modeling of machine tools for designers. Sofia: Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. DOI: https://doi.org/10.7546/3d_momftd.2018.
85. Krol, O., Sokolov, V.: Development of models and research into tooling for machining centers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 13(1(93)), 12–22 (2018). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131778>.
86. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501799>.
87. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4.
88. Krol, O., Sokolov, V.: Modelling of spindle nodes for machining centers. *Journal of Physics: Conference Series* 1084, 012007 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1084/1/012007>.
89. Krol, O., Sokolov, V.: Optimization of Processing Modes on Multioperational Machines Using Two-parameter D-Partitions. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), pp. 57-62. IEEE (2020). DOI: <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208120>.
90. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 4, 3-11. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_1.
91. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/10.7546/pmmtd.2018>.
92. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical*

- Engineering, vol. 4, 122-130. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_11.
93. Krol, O., Sokolov, V.: Rational choice of machining tools using prediction procedures. EUREKA: Physics and Engineering 4, 15-20 (2018). DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>.
 94. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machine tools for designers. Sofia: Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. 114 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/RCMTD.2019>.
 95. Krol, O., Sokolov, V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. Diagnostyka 21(3), 87-93 (2020). DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>.
 96. Krol, O., Sokolov, V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. Diagnostyka 21(4), 15-22 (2020). DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/127193>.
 97. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. Journal of Physics: Conference Series 1553 012012 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>.
 98. Krol, O., Tsankov, P., Sokolov, V.: Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system. EUREKA: Physics and Engineering 3, 52–58 (2018). DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00648>.
 99. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. Gear Clutch with Modified Tooth Profiles. Procedia Engineering 206, 979–984 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.581>.
 100. Shevchenko, S., Mukhovaty, A., Krol, O.: Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller Bearings. Procedia Engineering 150, 1107–1112 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.221>.
 101. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O.: Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1-10. (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
 102. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, 278-283. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_37.
 103. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. LNME, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.
 104. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
 105. Sokolov, V., Krol, O.: Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 364-373. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_38.

106. Sokolov, V., Krol, O.: Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive. *Procedia Engineering* 206, 936–943 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.575>.
107. Sokolov, V., Krol, O.: Time Characteristics of Initial Stages for Aerosols Diffusion in Channels of Ventilation Systems. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6. IEEE (2020). DOI: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271202>.
108. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>.
109. Sokolov, V., Porkuiian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8.
110. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012013 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012013>.
111. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501609>.
112. Sokolov, V., Krol O., Stepanova O.: Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 702-710. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_70.
113. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – Vol. 17. – N 1. – 2017. - Lublin–Rzeszow, Poland. - pp. 27-32.
114. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1278, 012003 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012003>.
115. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Acad'e'mie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020). DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.05.12>.
116. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(2(80)), 44–50 (2016). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.63711>.
117. Sokolova, Y., Azarenko, N., Sokolov, V.: The synthesis of system of automatic control of equipment for machining materials with hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, Issue 2 (68), 56–60 (2014), DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23396>.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ МАШИН	4
1.1. Основні поняття теорії надійності.....	4
1.2. Загальні відомості про показники надійності.....	5
1.3. Причини втрати працездатності машин	7
2. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ ..	12
2.1. Дефекти структури твердих тіл.....	12
2.2. Поверхнева енергія.....	15
2.3. Поверхневі явища.....	17
2.4. Механічні властивості матеріалу поверхневого шару	24
3. ГЕОМЕТРІЯ І КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	28
3.1. Макрогеометрія поверхонь деталей	28
3.2. Мікрогеометрія поверхонь деталей	29
3.3. Радіус кривизни мікронерівностей і крива опорної поверхні	31
3.4. Площі контакту шорстких поверхонь	33
3.5. Вплив геометричних параметрів поверхонь тертя на зносостійкість деталей	37
4. ТЕРТЯ СПОЛУЧЕНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	40
4.1. Зовнішнє тертя твердих тіл	40
4.2. Тертя ковзання при відсутності мастильного матеріалу (сухе тертя).....	42
4.3. Тертя при граничному змащенні.....	48
4.3. Рідинне тертя	53
4.5. Роль температури при терті.....	58
5. ПРОЦЕСИ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	60
5.1. Загальні відомості.....	60
5.2. Закономірності зношування	62
5.3. Абразивне зношування	65
5.4. Гідроабразивне зношування	70
5.5. Кавітаційне зношування	70

5.6. Зношування при схоплюванні.....	71
5.7. Зношування при втомному викрашуванні.....	72
5.8. Корозійно – механічне зношування.....	75
5.9. Інші види зношування	77
6. ЗМАЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ	79
6.1. Загальні відомості	79
6.2. Мазильні матеріали	80
6.3. Вибір мазильних матеріалів	82
6.4. Загальні принципи створення систем змащування	85
6.5. Підведення і розподіл мазильного матеріалу	90
6.6. Системи змащування верстатів.....	91
7. ОСНОВНІ ЗАЛЕЖНОСТІ НАДІЙНОСТІ МАШИН	93
7.1. Оцінка надійності машин	93
7.1.1. Безвідмовність.....	93
7.1.2. Довговічність.....	100
7.1.3. Ремонтпридатність.....	103
7.1.4. Збереженість.....	104
7.1.5. Комплексні показники надійності.....	104
7.2. Основні залежності надійності	107
7.2.1. Надійність у період нормальної експлуатації	107
7.2.2. Надійність у період поступових відмов.....	113
7.2.3. Спільна дія раптових і поступових відмов	125
7.3. Оцінка надійності верстатів	126
8. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ.....	131
8.1. Розвантаження поверхонь тертя	131
8.2. Рациональне навантаження елементів пари тертя.....	134
8.3. Вибір матеріалів пари тертя	138
8.4. Взаємне доповнення якості деталей	147
8.5. Вузли більш досконалого тертя	150
8.6. Оптимізація тепловиділення в парах тертя.....	152
8.7. Захист поверхонь тертя від небажаних дій.....	157
8.8. Оцінка надійності при механічному зношуванні	158
8.9. Технологічне забезпечення надійності вузлів тертя	165
8.10. Забезпечення надійності машин при експлуатації	171
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	175

Навчальне видання

ХАРЛАМОВ Юрій Олександрович
РОМАНЧЕНКО Олексій Володимирович
СОКОЛОВ Володимир Ілліч
КРОЛЬ Олег Соломонович
СПІФАНОВА Ольга Вікторівна

ТРИБОТЕХНІКА І НАДІЙНІСТЬ МАШИН

Навчальний посібник

Оригінал-макет *Могильна О.В.*

Підписано до друку 03.03.2021.
Формат 60×841/16 Папір типограф. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,7. Обл.-вид. арк. 12,2.
Тираж 50 прим. Вид. № 3309. Замів № __. Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля
Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.2003 р.
Адреса університета: просп. Центральний 59-а
м. Северодонецьк, 93400, Україна
e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com.

Надруковано у типографії Мадрид, ООО
Свідоцтво про реєстрацію: ДК № 4399 від 27.08.2012 р.
Адреса видавництва: вул. Ольминського, 11,
м. Харків, 61024, Україна
Телефон/факс +38 (057) 756-53-25
E-mail: info@madrid.in.ua www.madrid.in.ua