

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Закалов О.В., Закалов І.О.

ОСНОВИ ТЕРТЯ І
ЗНОШУВАННЯ В
МАШИНАХ

Тернопіль
2011

УДК 531.43 (075.8)
ББК К41327
Т67

Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.

- Укладачі:** *Закалов Олександр Васильович*,
кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри обладнання харчових технологій ТНТУ ім. І.Пулюя.
Закалов Ігор Олександрович,
кандидат технічних наук.
- Рецензенти:** *Мазяк Зіновій Юліанович*,
доктор технічних наук, професор кафедри обладнання харчових технологій ТНТУ ім.І. Пулюя.
Рогатинський Роман Михайлович,
доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи ТНТУ ім.І. Пулюя.
- Відповідальний за випуск:** *Закалов Олександр Васильович*.

У посібнику викладено основні теоретичні положення проблем і перспектив розвитку науки про тертя, змащування і зношування в машинах (трибології), основні поняття про будову і властивості поверхневих шарів, а також явища, що виникають у процесі тертя і змащування в трибосистемах. Класифіковано види тертя, зношування і пошкоджуваності. Розглянуто основні положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя проф. Б.І.Костецького. Наведено експериментальні й аналітичні закономірності тертя і зношування. Визначено області нормальних і патологічних явищ при терті. Вказано раціональні конструктивні, технологічні й експлуатаційні заходи підвищення надійності і зносостійкості деталей вузлів тертя. Розроблено методичні вказівки для виконання лабораторно-практичних занять і самостійної роботи, дано загальну характеристику типів лабораторного устаткування і способів дослідження на тертя і зношення. Описано методику і порядок виконання експериментальних досліджень на тертя і зношування матеріалів та аналізу отриманих результатів.

Посібник призначено для викладачів і студентів вищих навчальних закладів освіти, наукових та інженерно-технічних працівників.

Навчально-методичний посібник розглянуто та затверджено на засіданні кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № 13 від 20.01.2011 року.

Схвалено й рекомендовано до друку на засіданні методичні комісії факультету переробних і харчових виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № 7 від 27.01.2011 року.

УДК 531.43 (075.8)
ББК К41327

ВСТУП

З розвитком техніки питання підвищення довговічності й надійності машин набувають все більшого значення. Вивченням причин руйнування деталей в експлуатації та розроблення методів підвищення довговічності машин займаються вчені і спеціалісти багатьох промислово розвинених країн світу.

Зменшення матеріало- та енергомісткості об'єктів виробництва і промислового виробництва в цілому, підвищення рівня автоматизації промисловості й сільського господарства, збільшення потужності і швидкохідності машин, необхідність роботи механізмів і приладів в різних газових і рідинних середовищах за низьких і високих температур висувають, в наш час, ряд додаткових вимог із підвищення надійності й довговічності технологічного обладнання, приладів та інших технічних систем.

У результаті підвищення довговічності деталей машин скорочуються витрати запасних частин і матеріалів на їх виготовлення, зменшується кількість працюючих і трудомісткість при експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті. Збільшення терміну служби машин рівноцінне збільшенню їх випуску на тих же виробничих площадках. Вирішуючи завдання підвищення надійності і довговічності машин, ми тим самим збільшуємо виробничі потужності машинобудівних підприємств.

У загальній проблемі надійності, точності і довговічності машин, механізмів і приладів основне місце належить питанням тертя, змащувальній дії, зношуванню поверхонь деталей і робочих органів, які є між собою в дуже складних кореляційних залежностях.

З розвитком науково-технічного прогресу необхідно проводити складніші розрахунки сил опору у важконавантажуваних, автоматичних і особливо точних вузлах тертя і забезпечувати їх антифрикційність в експлуатаційних умовах. У багатьох галузях промисловості виникла необхідність створення спеціальних фрикційних пристроїв і гальмівних систем, для чого потрібно керувати процесами зовнішнього тертя, знати і використовувати його закони. Наука про тертя відстає від потреб практики і в наш час не може дати відповіді на багато важливих питань у реальному масштабі. Сучасний стан теорії зовнішнього тертя не дозволяє конструктору проводити необхідні розрахунки сил тертя в машинах, які проектують.

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні нових матеріалів (композиційні сплави, полімерні матеріали, тверді мастила), однак спеціалісти не мають необхідної інформації про зовнішнє тертя і зношування в машинах і механізмах, яка потрібна для їх розроблення і застосування.

Одним із актуальних завдань сучасного машинобудування є раціональне застосування мастил, що в багатьох випадках визначає працездатність і довговічність машин. Складні умови експлуатації сучасних машин різко підвищили вимоги до змащувальних матеріалів. У результаті цього отримала подальший розвиток теорія змащувальної дії, особливо при граничному терті.

Виникла необхідність глибокого вивчення механізмів і закономірностей механічного і фізико-хімічного впливу мастил з різним складом за різноманітних умов тертя. Особливе місце зайняло використання присадок до змащувальних матеріалів (поверхнево-активних, хімічно-активних) і твердих мастил. Значну увагу при цьому слід приділяти створенню сучасних автоматизованих систем змащування технічних засобів і машин.

Питання зношування є центральними в загальній проблемі тертя, змащувальної дії і зношування матеріалів. Кожен новий крок з розвитку машин, механізмів і приладів пов'язаний з вивченням явищ, що відбуваються на контакті спряжених деталей, з урахуванням міцності поверхні і їх руйнування (зношування). В боротьбі зі зношуванням на першому місці стоїть завдання створення загальної теорії опору зношування матеріалів. Ця теорія необхідна для обґрунтованого застосування конструкційних, технологічних і експлуатаційних засобів, недопущення патологічних процесів пошкоджуваності й досягнення мінімального зношування у вузлах тертя. Важливе значення має розроблення методів розрахунків нормального зношування і граничних умов переходу до патологічних процесів руйнування при терті.

Тертя, змащування та зношування в машинах органічно пов'язані між собою. Неможливо говорити про вирішення завдання зносостійкості без допомоги теорії тертя і зношування чи про розроблення змащувальної техніки і матеріалів без розуміння природи явищ тертя і зношування. Нерозривний зв'язок між завданнями задачами тертя, змащування і зношування твердих тіл завжди виступає на перший план у дослідницьких роботах, що мають прикладний напрямок. Між тим, ці три взаємопов'язані області в багатьох теоретичних роботах розглядають окремо, як самостійні.

При аналізі сучасного стану теорії і практики необхідно наголосити ще про одну важливу особливість. Усі прикладні роботи направлені на досягнення добрих умов тертя і зношування матеріалів, на усунення патологічних процесів у зоні контакту, на різке зменшення величини зношування. В багатьох випадках надійність машин, як вказувалось вище визначається довговічністю пар тертя і для більшості видів технологічного обладнання і машин першорядне значення має підвищення зносостійкості деталей. Тому важливою проблемою є впровадження і подальший розвиток робіт зі знаходження ефективних заходів зміцнення поверхневих шарів деталей.

Необхідність дослідження зносостійкості деталей машин витікає і з економічних витрат. Однією з найголовніших причин зношувальних відмов є власне зношування рухомих спряжень машин. Втрати в машинобудуванні високорозвинених держав унаслідок зношення і тертя досягають 8% національного доходу. Характерно, що хоча відносні розміри зношування,

наприклад, відношення втрати маси машини до її первинної маси, дуже малі, вони призводять до виходу з ладу всього дорогого виробу. Можна навести такі приклади. Легковий автомобіль має в середньому масу, яка дорівнює 1000 кг. Якщо втрата його маси внаслідок зношування вузлів тертя складе 1 кг, то він вже не підлягає ремонту. Костюм, зшитий з 3 м² тканини, непридатний, якщо зношеною виявляється частина його поверхні площею лише 0,001 м².

На сьогодні застосовують різноманітні ефективні способи підвищення зносостійкості і довговічності деталей машин. Провідна роль у створенні довговічних і надійних конструкцій машин належить конструкторам і технологам, які на всіх етапах їх створення (конструювання, виготовлення, доведення) безпосередньо впливають на технічні характеристики машини і працездатність окремих її вузлів і деталей. На основі наукового аналізу літературних джерел, а також особистого досвіду і знань конструктор і технолог повинні знайти оптимальні конструктивні вирішення, правильно вибрати матеріал і визначити раціональні технологічні методи виготовлення і зміцнення деталей машин.

Складність проблеми, що розглядається, зумовила формування і створення самостійної науки про тертя і зношування - трибології (цей термін увійшов у світову наукову практику в 1966р.), яка визначається як наука і технологія взаємодії поверхонь, що знаходяться у відносному русі, а також пов'язаних із цим явищем наслідків. Як окрема прикладна галузь трибології, що охоплює всі стадії процесу створення, технічного обслуговування, експлуатації і ремонту технічних засобів і яка в наш час розвивається самостійно, розглядається триботехніка.

Роботи українських учених в галузі трибології добре відомі, їх визнають в усьому світі. Вітчизняну наукову школу з трибології створив і сформував у 50...70 роках 20-го століття видатний вчений Борис Іванович Костецький. Професор Б.І. Костецький і його учні розробили структурно-енергетичну теорію тертя і зношування в машинах, яка найсучасніша і широко відома в світі. Структурно-енергетична теорія тертя базується на відкритих професором Б.І. Костецьким явищах структурної пристосовності матеріалів при терті та окисного зношування. В деяких теоретичних розробках зарубіжних учених питання про окисне зношування, як про певний процес так званого нормального тертя, донедавна піддавалося сумніву. Широкі експериментальні дослідження й теоретичні обґрунтування, які очолював професор Б.І. Костецький, практика космічного машинобудування, ядерної енергетики і провідних галузей хімічного і спеціального машинобудування підтвердили провідну роль процесів окислення і самоорганізації при терті в машинах.

РОЗДІЛ 1

ЗНАЧЕННЯ ТЕРТЯ В ПРОБЛЕМІ МАТЕРІАЛО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1.1. Загальні аспекти

Всебічне підвищення ефективності та якості виробництва, створення умов суворой економії енергії і матеріалів є дуже важливою народно-господарською і соціальною проблемою. Особливе місце у вирішенні цієї проблеми займають досягнення в області тертя, змащування і зношування твердих тіл у вузлах тертя. Кожна технічна система (машина, технологічне обладнання, апарат, робочий орган, агрегат, механізм, деталь) складається з більшого або меншого числа вузлів тертя.

Встановлено, що на сьогодні приблизно від однієї третини до половини світових енергетичних ресурсів в тій чи іншій формі витрачається на тертя, тому значення проблеми тертя та зношування деталей машин в сучасному висококомунікованому світі важко переоцінити. Оскільки зношування рухомих спржень під впливом сил тертя призводить до передчасного виходу з ладу машин і невиправдано великим затратам на їх ремонт, боротьбі з тертям і зношуванням в машинах і механізмах в усіх промислово розвинених країнах світу приділяють підвищену увагу.

Із середини минулого століття всі завдання і питання, наукові дослідження, їх практична реалізація пов'язані з проблемою тертя. Змащування і зношування в машинах були об'єднані у самостійному науковому напрямку, який з 1966 р. отримав назву "трибологія". Слово "Трибологія" походить від грецького слова "трибос", що означає тертя, було визначено як "наука і технологія взаємодії поверхонь, що перебувають у відносному русі, а також пов'язаних з цим явищем наслідків".

Значущість трибології в останні десятиріччя неухильно підвищується. Вона охоплює різні сфери діяльності людини, але особливу вагомість набуває у зв'язку з необхідністю підвищення зносостійкості машин, приладів, обладнання, інструментів, робочих органів, інших виробів машинобудування, а також зменшення втрат на тертя при їх використанні. Вирішення завдань із застосування досягнень трибології носить яскраво виражений міжгалузевий характер і здійснюється на державному рівні в багатьох високорозвинених в науково-технічному напрямку західних країнах.

Професор Джост Х.П. у праці "Прошлое и будущее трибологии" ("Трение и износ", 1990. – Т.11, №1. – С. 149–160) наводить деякі приклади економічного значення цього напрямку: "Звіт DES констатує, що тільки в Сполученому Королівстві Великобританії можна б було зекономити 515 млн. фунтів стерлінгів (за оцінкою 1965 р.), якби більше уваги приділялося трибології.

Досвід останніх 22 років показав, що ця цифра складає близько 1% валового національного доходу, але вона суттєво занижена. Нині вважають, що достатня увага до трибології, особливо на стадії навчання, наукових досліджень та використання, могла б дати економію від 1,3% до 1,6% валового національного доходу. І найважливіше, що перші 20% такої економії можна отримати без значних капіталовкладень” [1].

У багатьох ширших офіційних дослідженнях, аніж у Великобританії, ФРН, Канаді, Китаї і деяких інших країнах, в кожному окремому випадку підтверджувалася справедливність розміру вказаної економії від валового національного доходу. Тому термін “трибологія” тепер включено до словника кожної промислово розвиненої країни світу. Він отримав завершальне етимологічне визнання і занесений у додаток до Оксфордського словника англійської мови.

Слід звернути увагу, що в усіх університетах та політехнічних вузах світу нині є професорські кафедри і курси з трибології. Ця наука проникла навіть у шкільні програми. Громади, які вивчають трибологію, успішно функціонують у всіх розвинених країнах.

В Україні до 80-х років ХХ століття не існувало подібних кафедр або дисциплін при кафедрах, а слово „трибологія” навіть не було відоме більшості інженерів, що займалися проектуванням, експлуатацією та ремонтом техніки. Однак слід відзначити, що останнім часом пройшли певні зрушення в цьому напрямку. В багатьох технічних вищих навчальних закладах України введено навчальні курси з трибології. В 1993 році в Україні створено Спільку трибологів із центром у Київському національному авіаційному університеті, мета котрої – втілення перспективних ідей і розроблень у промисловість.

Важко навести приклади з економічних втрат в Україні, оскільки в друкованих виданнях такі не зустрічаються. Однак в 1990 р. у журналі “Тертя та зношування” акад. В.С.Авдуєвський написав: “На практиці недостатня зносостійкість призводить до простоїв машин, спричинених непрацездатністю, надзвичайно велике завантаження основних виробничих потужностей для виготовлення запасних частин (до 30% для автотракторної техніки), розростання мережі ремонтних організацій та майстерень (4 млн. працюючих у країні зайнято ремонтом), дуже складна та неефективна система розподілу запасних частин”.

Наведена інформація стосується не лише народного господарства, але й усіх галузей техніки, особливо тих, що стосуються ремонтних підприємств і системи розподілу запасних частин.

Провідні конструкторські бюро і підприємства, які займаються проектуванням і виготовленням складних агрегатів, не мають у своєму складі спеціалістів-трибологів і вирішують раніше перераховані завдання методом «спроб та помилок», шляхом стендових випробувань, що неефективно і неекономічно. Виходячи з викладеного, можна констатувати, що розвиток і реалізація потенціалу фундаментальних і прикладних знань в області трибології

в багатьох випадках відстають від потреб науково-технічного прогресу, а ті знання котрі є, не повною мірою використовують провідні конструкторські організації через нестачу спеціалістів. Тому останніх два-три десятиріччя в усіх промислово розвинених країнах характеризуються посиленою увагою до проблем тертя та зношування в машинах, шкідливі наслідки яких оцінюються багатьма мільярдами доларів щорічно.

Аналіз наукових публікацій та тематика крупних комплексних і спеціалізованих науково-технічних конференцій останніх років, думки багатьох провідних учених-трибологів дають змогу виділити в сучасній трибології, як області знань і її додатків, шість найважливіших і перспективних областей, які самостійно розвиваються: трибоаналіз (теоретичні положення трибомеханіки, трибофізики та трибохімії), трибоматеріалознавство (вивчення триботехнічних матеріалів та керування їх властивостями); триботехнологія (технологічні методи керування фрикційними характеристиками рухомих спряжень); триботехніка (сукупність технічних засобів, що підлягають тертю та зношуванню); трибомоніторинг (засоби та методи діагностики, контролю та випробування трибосистем); трибоінформатика (засоби та методи опрацювання, зберігання та передавання трибологічної інформації).

Трибоаналіз – важливий розділ трибології, що охоплює проблеми накопичення і систематизації наукової інформації про фундаментальні дослідження основних фрикційних процесів, а також побудову моделей цих процесів з метою прогнозування результатів контактної взаємодії твердих тіл у заданих умовах. Трибоаналіз є базисом для побудови та розвитку решти п'яти областей і мають метою побудову моделей процесів для практичного використання результатів у реальних конструкціях вузлів тертя.

Триботехнічне матеріалознавство (трибоматеріалознавство) складає специфічний розділ науки про матеріали для вузлів тертя. Трибоматеріалознавство є зв'язуючою ланкою між результатами теоретичних досліджень, що проводять в області трибоаналізу, і комплексів знань, що втілюються в триботехніці у вигляді реальних конструкцій вузлів тертя.

Метали та їх сплави відіграють роль основних матеріалів для вузлів тертя. В останні роки вони активно витісняються перш за все різноманітними композитами, але в багатьох випадках зберігають своє значення і продовжують вдосконалюватися. Тому метою цієї галузі є розроблення вимог до матеріалів для вузлів тертя, технологій створення таких матеріалів, основ їх підбору у вузли тертя і аналіз закономірності їх роботи. Сказане справедливе і стосовно змащувальних матеріалів – твердих, рідких, газоподібних і гібридних.

Триботехнологія, так само, як і трибоматеріалознавство, є зв'язуючою ланкою між трибоаналізом і реальними конструкціями вузлів тертя й охоплюють два великих напрямки прикладної трибології: 1 – вивчення триботехнічних аспектів формоутворення деталей, обробки матеріалів руйнуванням та деформуваннями способами; 2 – вивчення та розроблення методів дослідження потрібних триботехнічних властивостей поверхонь тертя за рахунок зміцнюючої дії та нанесення спеціальних покриттів.

Зауважимо, що особливо важливою технологічною характеристикою поверхні тертя є шорсткість та її орієнтація відносно напрямку переміщення тіл тертя. Вона визначає коефіцієнт тертя, зношування, контактну жорсткість, час припрацювання, фактичну площу дотику, тепло- та електропровідність контакту. Оптимальний вибір технологічної шорсткості, її орієнтація на деталях дає значне скорочення часу припрацювання виробів і зменшення зношування на цьому етапі. При неправильному врахуванні цих факторів зношування за час припрацювання може досягти величин, які дорівнюють зношуванню на весь період експлуатації виробу, що залишився.

Трибомоніторинг – самостійна область трибології, котра, ґрунтуючись на трибоаналізі, повинна використовувати як на етапі випробування і доведення вузлів тертя, так і на етапі їх експлуатації. Трибомоніторинг включає два напрямки – трибометрію і трибодіагностику.

Трибометрія охоплює методи і засоби вимірювання основних параметрів тертя і є важливим елементом усіх видів експериментальних, модельних і натурних досліджень вузлів тертя.

Трибодіагностика – як сукупність методів і засобів неперервного контролю і керування станом фрикційних параметрів деталей та вузлів машин – один із наймолодших напрямків у забезпеченні створення сучасної та надійної триботехніки. Одночасне використання трибометрії і трибодіагностики на модельних і реальних конструкціях дозволить забезпечити створення оптимальної конструкції вузла тертя, визначити можливі області його функціонування і спрогнозувати ресурс. Наявність вбудованих систем контролю на реальних конструкціях призведе до значного скорочення матеріальних засобів у процесі експлуатації й ремонту машин і механізмів.

У коло проблем моніторингу входить все більше завдань із усіх областей трибоаналізу, трибоматеріалознавства, триботехнології, бо всі вони служать для створення надійних і довговічних вузлів тертя, тобто є основою для розвитку триботехніки і трибоінформатики.

Триботехніка як прикладна область трибології охоплює кінцеву стадію процесу створення вузлів тертя, акумулюючи в них найновіші досягнення трибоаналізу, трибоматеріалознавства, триботехнології і трибомоніторингу. Перш за все це знаходить відображення в методах розрахунку і конструювання, оскільки від правильного визначення конфігурації, призначення розмірів, вибору матеріалів і технології виготовлення конструкції та її елементів тертя залежить працездатність машин і механізмів.

Однак уважне співставлення свідчить про відставання в багатьох випадках практичних додатків триботехніки від рівня досягнутих результатів наукових досліджень, з одного боку, і неготовність трибоаналізу дати відповіді на багато питань конструкторів і технологів – з іншого. До цього часу не розроблені надійні модельні схеми і критерії переходу від простих схем випробування на тертя і зношування до реальних вузлів. Це призводить до того, що закладені в трибоконтрукцію завищені запаси “незнання” не часто

зводять до мінімуму використання досягнень в області трибоматеріалів і триботехнології. Значні резерви підвищення працездатності закладені в удосконаленні конструктивних вирішень вузлів тертя.

Триботехніка визначається як наукова і технічна дисципліна, яка вивчає взаємодію поверхонь при їх відносному русі. Завдання триботехніки полягає у дослідженні тертя, змашування і зношування механічно оброблених поверхонь з метою отримання детальної уяви про їх взаємодію.

Мета досліджень з триботехніки – свідоме мінімізування і виключення непотрібних втрат всюди, де є поверхні тертя. Поверхні ковзання і кочення – це ключ до підвищення ефективності в сучасному промислово розвиненому високомеханізованому суспільстві.

Трибоінформатика є заключною ланкою в наукових дослідженнях і практичних додатках трибології. Метою трибоінформатики є отримання, узагальнення, зберігання й використання інформації, отриманої в усіх раніше перерахованих областях трибології. Дану інформацію повинні широко використовувати вчені-трибологи в процесі аналізу, створення нових матеріалів і технологій для вузлів тертя, розроблення методик діагностування. Використання такої інформації на етапі проектування дозволить конструктору приймати вірні рішення у створенні нових конструкцій.

1.2. Вклад вітчизняних і зарубіжних вчених у створенні і формуванні науки про тертя і зношування в машинах

Тертя – дивний феномен природи. Воно подарувало людству тепло і вогонь, можливість за короткий час зупинити швидкісний поїзд і автомобіль, і навпаки, забезпечити їх переміщення, здійснити механічну обробку металу, прискорити хімічну реакцію в сто тисяч разів, записати людський голос на платівку, почути звуки скрипки і багато іншого.

Дослідження, присвячені розробленню теорії тертя, проводили багато вчених протягом віків. Тертя вивчали Леонардо да Вінчі і Ломоносов, Амонтон і Кулон, Петров і Ейлер, Менделєєв і Рейнальдс та інші вчені. Перші відомі дослідження поставив Леонардо да Вінчі (1508р.). У результаті цих робіт вперше було сформульовано поняття про коефіцієнт зовнішнього тертя. Леонардо да Вінчі вважав, що коефіцієнт тертя є величиною постійною (0,25) для різних тіл за умови однакової “гладкості” поверхонь.

Цю ж точку зору в подальшому підтримували Г.Амонтон і Т.Бюлфінгер.

У ранніх дослідженнях переважали чисто механічні уявлення. В основу вивчення було покладено взаємодію шорстких твердих поверхонь. У подальшому була висунута гіпотеза і розвивались ідеї про молекулярні сили взаємодії при терті. У відповідності з цією гіпотезою думали, що тертя

зумовлене подоланням сил молекулярного притягування, яке виникає між двома твердими тілами, і що сила тертя зростає зі зменшенням шорсткості, бо при тіснішому зближенні поверхонь збільшується молекулярне зчеплення між ними.

Еволюція механічної гіпотези, яку вперше сформулював І. Делагір, пов'язана з іменами А. Парана, Л. Ейлера, Д. Леслі, Л. Гюмбеля та ін. Виникнення й обґрунтування гіпотези про молекулярну взаємодію поверхонь тертя пов'язана з іменами І.Дезагюльє, М.Бріллюена, В.Гарді, Р.Томлінсона, Б.Дерягіна.

Перший етап розвитку класичної науки про зовнішнє тертя представлений дослідженнями тертя спокою. Питання про динамічну суть зовнішнього тертя вперше було поставлене у відомих роботах Ш.Кулона.

Дослідження Ш.Кулона займають особливе місце. Він вперше вказав, що є необхідність розрізняти тертя спокою і тертя руху і встановив, що тертя зумовлюється рядом причин і природою матеріалів, протяжністю поверхні, тиском, тривалістю контакту, швидкістю ковзання.

Значним досягненням була чітко сформульована Ш.Кулоном подвійна природа тертя. Він вважав, що тертя зв'язок двох видів опору: зчеплення, пропорційне навантаженню і не залежить від площі, і зчеплення, що залежить від площі дотику.

Ця подвійна природа виражається законом

$$F = A + f \cdot N,$$

де F – сила тертя; A – константа, яка характеризує здатність тіл, що труться, до взаємного зачеплення; N – нормальна реакція; f – коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт тертя).

Для грубо оброблених поверхонь константа A має малі значення. Тому цю величину тривалий час не брали до уваги. Закон Кулона спрощено набув вигляду $F = f \cdot N$. Ця залежність має назву Амонтона-Кулона про зв'язок між силами тертя і нормальним навантаженням, що було результатом робіт першого етапу науки про тертя. В наступних роботах було зроблено багато спроб експериментальної перевірки і теоретичного обґрунтування закону Амонтона-Кулона, що призвело до накопичення великого експериментального матеріалу з визначення коефіцієнтів тертя для різних матеріалів.

Дослідження Ш.Кулона стали основою для створення формального вчення про тертя в механіці та інженерній справі, в розробленні якого брали участь вчені Д.Леслі, Л.Гюмбель, Г.Лейбніц, С.К.Котельніков, А.В.Вишнеградський та інші.

Подальший розвиток науки про зовнішнє тертя був пов'язаний із загальним прогресом науки і техніки, різким розширенням і ускладненням умов зовнішнього тертя, розробленням і застосуванням нових матеріалів, накопиченням спостереження, які реєстрували відхилення від закону Амонтона-Кулона. Наближений характер закону і його обмежене застосування ставали все очевиднішими.

Механічна і молекулярна концепції з часом значно змінилися: механічна – збагатилася уявою про закони пружно-пластичної деформації і руйнування; молекулярна – дослідженнями з фізики граничного шару і тонкої структури металу поверхонь, що труться.

Комбіновані теорії, основу яких складають механічні (деформаційні) уявлення і припущення про молекулярно-адгезійну взаємодію, розвинені в роботах Ф. Боудена, І. Крагельського, Г. Єпіфанова, Г. Ернста, П. Мерчента та ін.

У роботах Б. Дерягіна, Е. Рабіновича висунуто теорії, в яких на першому плані стоїть атомно-молекулярна взаємодія поверхонь тертя, а механічна взаємодія враховується як результат роботи атомно-молекулярних зв'язків.

Однак велика різноманітність матеріалів, що використовуються, ускладнення умов механічного навантаження і фізико-хімічної дії середовищ зробило неможливим використання класичних понять про взаємодію на молекулярному рівні.

Ці взаємодії стали “затемнюватися” активізацією фізико-хімічних процесів, невід’ємних при навантаженні тертям, явищами фізичної і хімічної адсорбції, дифузії. Природно, що при цьому і механічна взаємодія втратила своє переважаюче значення.

Однією з особливостей більшості досліджень є спроби побудувати загальну теорію для одного із можливих процесів, найбільш виражених за деяких умов тертя.

Запропоновано загальні теорії зовнішнього тертя, засновані на різних “універсальних механізмах” – фізичних, механічних, хімічних, енергетичних та ін. Кількість “універсальних” теорій продовжує зростати. Явища розглядаються у різних масштабах – від макроскопічного до субмікроскопічного, на рівні атомних і електронних взаємодій.

Описування сил тертя проводять, виходячи з найрізноманітніших посилянь, і як наслідок, з’являються різноманітні фізичні параметри: модуль пружності, температура плавлення, поверхнева енергія і т.д. Теорії деформації базуються на врахуванні й аналізі явищ пошкодженості при терті.

Більшість запропонованих теорій базується на деталізованому опрацюванні окремих питань. Водночас загальні їх концепції й принципові положення мало відповідають сучасному рівню фізики твердого тіла.

Постійне зростання потужності машин, складні умови експлуатації, підвищення допустимих показників надійності і зносостійкості вимагають точних і обґрунтованих даних про зовнішнє тертя.

Наука про зовнішнє тертя – область знань, що має прикладне значення, а її зміст є синтезом відповідних розділів механіки, фізики, хімії.

Значний вклад у розвиток сучасної світової науки про тертя і зношування в машинах внесла українська школа, яку створив професор Борис Іванович Костецький, який тривалий час її очолював. Відомими й визнаними представниками цієї школи є професори Л.І. Бершадський, І.Г. Носовський, П.В. Назаренко, Г.А. Прейс та інші.

Б.І.Костецький і його учні зробили цілий ряд фундаментальних відкриттів у проблемі тертя, які значно розширили уяву про явища, що відбуваються на поверхні контакту двох тіл при їх вільному русі.

До нашого часу тертя в усіх його аспектах залишається загадкою. При терті (і тільки при терті) одночасно проходять механічні, електричні, теплові, вібраційні і хімічні процеси. Тертя може збільшити або зменшити міцність металу, підвищити або зменшити в ньому вміст вуглецю чи водню, перетворити золото і платину в окисли, відполірувати деталі або зварити їх.

Процеси тертя і зношування є складними і залежать від ряду факторів, для розуміння яких необхідний синтез знань в областях механіки, теоретичної фізики, фізичної хімії, термодинаміки, металознавства, фізики твердого тіла та ін. У зв'язку з цим нині існують різні уявлення про явища, що відбуваються на поверхні контакту твердих тіл при терті.

Тому спроби вчених вирішити основні завдання теорії тертя з позиції окремих областей знань приречені на невдачу. Неповнота і протиріччя різних "універсальних механізмів", побудованих на окремих явищах, що спостерігаються при терті, призвела до необхідності розглядати завдання на основі загальних фундаментальних принципів і енергетичних співвідношень.

В останні десятиріччя розвиток теоретичної фізики, матеріалознавства і фізичної хімії поверхневих явищ з позиції термодинаміки незворотних процесів дозволяє розглядати процеси тертя і зношування матеріалів, використовуючи уявлення про саморегулювання, структурну адаптивність (приспосовуваність) і самоорганізацію відкритих термодинамічних систем (Гленсдорф, Пригожин). Відкриті термодинамічні системи характеризуються тим, що можуть обмінюватись з середовищем енергією і речовиною (Пригожин, Чіхос).

Результати досліджень Б.І.Костецького дозволяють розглядати енергетичні співвідношення за нормальних умов зовнішнього тертя, в процесі якого відбувається трансформація механічної роботи в енергію внутрішніх процесів. Встановлено, що при зовнішньому терті змінюються властивості поверхневих шарів матеріалів. Відбуваються структурні перетворення, збільшується опір деформації і твердість, зростає електричний опір, підсилюються дифузійні процеси, утворюється теплота і т.п.

Основне принципове положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя, яку запропонував професор Б.І. Костецький, описується залежністю

$$A = Q + \Delta E,$$

з якої бачимо, що робота зовнішнього тертя A витрачається на утворення теплоти Q і енергію, що накопичується ΔE .

Наукова школа Б.І. Костецького вперше в світі показала і довела, що тертя є процесом, який самоорганізується, при якому з певною послідовністю і досить "розумно" проходять явища, направлені на руйнування поверхні, або ж,

навпаки, на створення цілої серії систем, що зменшують зношування і тертя. Відкрите раніше невідоме явище отримало назву структурної пристосованості матеріалів при терті. Значення цього відкриття для проблеми, що розглядається, важко переоцінити.

1.3. Основні терміни й означення

Основні терміни, що відносяться до триботехніки, стандартизовані ГОСТом 27674-88 “Трения, изнашивание и смазка. Термины и определения”, який містить 97 термінів, класифікованих за видами тертя, зношування, змащування, методами і змащувальними матеріалами. До загальних понять триботехніки відносять терміни, розглянуті нижче.

Зовнішнє тертя – явище опору відносному переміщенню, яке виникає між двома тілами в зонах дотику поверхонь по дотичних до них, що супроводжуються дисипацією енергії.

Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) накопичення його залишкової деформації при терті, що проявляється в поступовій зміні розмірів і (або) форми тіла.

Знос – результат зношування, що визначається в установлених одиницях. Величину зносу можна виразити в одиницях довжини, об’єму, маси і т.д.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, що оцінюється величиною, оберненою швидкості зношування, або інтенсивністю зношування.

Зношувальний матеріал – матеріал, що вводиться на поверхню тертя для зменшення сили тертя і (або) інтенсивності зношування.

Змащування (змазка) – дія змащувального матеріалу, в результаті якого між двома поверхнями зменшується сила тертя і (або) інтенсивність зношування.

Змащування – підведення змащувального матеріалу до поверхні тертя.

Тертя спокою – тертя двох тіл при мікропереміщенні в процесі переходу до відносного руху.

Тертя руху – тертя двох тіл, що знаходиться у відносному русі.

Тертя без змащувального матеріалу – тертя двох тіл за відсутності на поверхні тертя введеного змащувального матеріалу будь-якого виду.

Тертя із змащувальним матеріалом – тертя двох тіл за наявності на поверхні тертя введеного змащувального матеріалу будь-якого виду.

Тертя ковзання – тертя руху двох тіл, за якого швидкості тіл в точках дотику різні за величиною і напрямком, або лише за величиною, або лише за напрямком.

Тертя кочення – тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл в точках дотику однакові за величиною і напрямком.

Сила тертя – сила опору за відносного переміщення одного тіла по поверхні другого під дією зовнішньої сили, направленої по дотичній до загальної границі між цими тілами.

Найбільша сила тертя спокою – сила тертя, при якому будь-яке перевищення призводить до виникнення руху.

Попереднє зміщення – відносне мікропереміщення двох твердих тіл при терті в межах переходу від стану спокою до відносного руху.

Швидкість ковзання – різниця швидкостей тіл у точках дотику при ковзанні.

Поверхня тертя – поверхня тіла, що бере участь при терті.

Коефіцієнт тертя – відношення сили тертя двох тіл до нормальної сили, що притискає ці тіла одне до одного.

Коефіцієнт зчеплення – відношення найбільшої сили тертя спокою двох тіл до нормальної відносно поверхонь тертя сили, що притискають тіла одне до одного.

Механічне зношування – зношування в результаті механічної дії.

Молекулярно-механічне зношування – зношування в результаті одночасної механічної дії та молекулярних або атомарних сил.

Корозійно-механічне зношування – зношування при терті матеріалу, який вступив в хімічну взаємодію із середовищем.

Абразивне зношування – механічне зношування матеріалу в результаті різальної або дряпаючої дії твердих тіл або частинок.

Гідроабразивне зношування – зношування в результаті дії твердих тіл або частинок, захоплених потоком рідини.

Газоабразивне зношування – зношування в результаті дії твердих тіл або частинок, захоплених (втягнутих) потоком газів.

Втомне зношування – зношування поверхні тертя або окремих її ділянок в результаті повторного деформування мікрооб'ємів матеріалу, що призводить до виникнення тріщин і відокремлених частинок (зношування втомлення може відбуватися при коченні й ковзанні).

Ерозійне зношування – зношування поверхні в результаті дії потоку рідини або газу.

Кавітаційне зношування – зношування поверхні при відносному русі твердого тіла в рідині в умовах кавітації.

Зношування при заїданні – зношування в результаті схоплення, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу і дія нерівностей, що утворились, на поверхню спряження.

Окисне зношування – зношування за наявності на поверхні тертя захисних плівок, які утворилися в результаті взаємодії матеріалу з киснем.

Зношування при фреттінг-корозії – корозійно-механічне зношування тіл, які дотикаються при малих коливальних відносних переміщеннях.

Швидкість зношування – відношення значення зносу до інтервалу часу, протягом якого він виник.

Інтенсивність зношування – відношення значення зносу до шляху, на якому відбувається зношування, або об'єму виконаної роботи.

Схоплення при терті – явище місцевого з'єднання двох твердих тіл, яке відбувається внаслідок дії молекулярних сил при терті.

Перенесення матеріалу – явище при терті твердих тіл, коли матеріал одного тіла з'єднується з другим і, відірвавшись від першого, залишається на поверхні другого.

Зайдання – процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхонь тертя внаслідок схоплення і перенесення матеріалу.

Задир – пошкодження поверхні тертя у вигляді широких і глибоких борозен (рівчаків) у напрямку ковзання.

Припрацювання – процес зміни геометрії поверхонь тертя і фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя, що проявляється за постійних зовнішніх умов у зменшенні сили тертя, температури та інтенсивності зношування.

Газове змащування – змащування, коли поділ поверхонь тертя деталей здійснюється газовим мастильним матеріалом.

Рідинне змащування – змащування, коли повний розділ поверхонь тертя здійснюється рідинним мастильним матеріалом.

Тверде змащування – змащування, коли поділ поверхонь тертя деталей, які перебувають у відносному русі, здійснюється твердим мастильним матеріалом.

Гідродинамічне (газодинамічне) змащування – рідинне (газове) змащування, коли повне розділення поверхонь тертя здійснюється в результаті тиску, самовиникаючого в шарі рідини (газу) при відносному русі поверхонь.

Гідростатичне (газостатичне) змащування – рідинне (газове) змащування, при якому повне розділення поверхонь тертя деталей, які перебувають у відносному русі або спокої, здійснюється в результаті надходження рідини (газу) в зазор між поверхнями тертя під дією зовнішнього тиску.

Еласто-гідродинамічне змащування – змащування, при якому характеристики тертя і товщина плівки рідинного мастильного матеріалу між двома поверхнями, які перебувають у відносному русі, визначається пружними властивостями матеріалів тіл, а також реологічними властивостями останнього.

Граничне змащування – змащування, коли тертя і зношування між поверхнями, які перебувають у відносному русі, визначається властивостями поверхонь і властивостями мастильних матеріалів, відмінними від об'ємної в'язкості.

Напіврідинне змащування – змащування, коли здійснюється частково гідродинамічне, частково граничне змащування.

1.4. Тертя і підвищення надійності машин

Нині з тертям і зношуванням деталей пов'язана одна із найгостріших проблем сучасності – підвищення надійності і довговічності машин і механізмів, яка визначається в основному збереженням розмірів їх динамічних елементів, якістю і міцністю поверхонь спряжень. Переважна більшість виходів з ладу рухомих деталей машин і механізмів (від 80 до 90%) відбувається внаслідок руйнування поверхонь тертя.

Затрати на відновлення машин в результаті тертя і зношування в промислово розвинених країнах дуже великі, причому щорічно вони збільшуються. Тому підвищення терміну служби машин і технологічного обладнання навіть незначною мірою рівноцінне введенню в дію нових виробничих потужностей.

Традиційним шляхом інтенсифікації виробництва є підвищення продуктивності машин, технологічного обладнання і агрегатів. Організація сучасних потокових автоматизованих виробництв на базі складних систем машин і верстатів, у першу чергу програмованих, промислових роботів і робото-технологічних комплексів, систем автоматизованого проектування підвищує вимоги до надійності та безвідмовності кожного складового агрегата (кожного структурного елемента, якщо мова йде про автоматичні лінії, дільниці, цехи тощо, то тим більше).

Тому одним із основних показників, що характеризує якість сучасних технічних систем (інструменту, механізму, вузла, агрегата, приладу, машини, системи машин), є надійність – властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або напрацювання.

Надійність – одна із властивостей якості продукції. Ця властивість виробів проявляється в процесі використання виробів за призначенням і розглядається нерідко як властивість виробу зберігати якість (значення основних експлуатаційних і споживчих характеристик) з часом.

Поняття “надійність” може відноситися не тільки до виробів, але і до систем “людина-машина”, до інформаційно-керуючих систем, до програмного забезпечення.

У практиці і в нормативно-технічній документації надійність будь-якого технічного виробу (приладу, апарату, інструменту, машини, агрегату, вузлів і деталей, системи машин) визначається як властивість об’єкту зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування.

Надійність є складною властивістю, яка залежно від призначення об’єкту і умов його використання, включає безвідказність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість в повній цілості.

Безвідказність – властивість об’єкту безперервно зберігати працездатний стан впродовж деякого часу або деякого напрацювання. Напрацювання – це поняття, яке служить для кількісної оцінки надійності об’єкту і характеризує тривалість або об’єм роботи об’єкту. Вона вимірюється в годинах, числах циклів навантаження, кілометрах пробігу та інших величинах, які визначаються специфічними особливостями виробу.

Довговічність – властивість об’єкту зберігати працездатний стан до граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Довговічність виробів характеризується такими показниками, як середній радіус, призначений або встановлений строк служби тощо.

Ремонтопридатність – властивість об'єкту, яка полягає в пристосовуваності до попередження і виявлення передвiдказного стану, вiдказiв i пошкоджень, пiдтриманню i вiдновленню працездатного стану шляхом проведення технiчного обслуговування i ремонту.

Збереженiсть (збереження повної цiлiсностi) – властивiсть об'єкту зберiгати значення показникiв безвiдказностi, довговiчностi i ремонтотпридатностi впродовж i пiсля зберiгання i (або) транспортування.

Надiйнiсть характеризується подiями:

Вiдказ (вiдмова) – подiя, яка полягає в повнiй або частковiй втратi об'єктом працездатностi.

Вiдкази подiляють на функцiональнi, при яких виконання своїх функцiй об'єктом, що розглядається, або елементом припиняється (наприклад, поломка зубiв шестернi) i параметричнi, при яких деякi параметри об'єкта змiнюються в недопустимих межах (наприклад, втрата точностi верстату).

Надiйнiсть є складною властивiстю, яка залежно вiд призначення об'єкта й умов його використання зумовлюється безвiдмовнiстю, довговiчнiстю, ремонтотпридатнiстю, збереженiстю (у повнiй цiлiсностi). Кiлькiсною характеристикою однiєї або кiлькох властивостей, що складають надiйнiсть виробiв, є показник надiйностi.

Названi вище показники вiдносяться до одиничних показникiв надiйностi, бо характеризують одну з властивостей надiйностi. Показники, якi характеризують одночасно кiлька властивостей надiйностi, називають комплексними. До них вiдносяться коефiцiєнт готовностi, коефiцiєнт технiчного використання та iн.

Питання пiдвищення термiну служби машин давно привертали увагу iнженерно-технiчних працiвникiв, однак у своїй дiяльностi вони керувалися в основному емпiричними даними. Розвиток технiки i машинобудування надав проблемi пiдвищення надiйностi i довговiчностi машин особливо великого значення з точки зору економiї матерiальних та енергетичних ресурсiв i робочої сили, залучив до вирiшення цiєї проблеми широке коло конструкторiв, технологiв, експлуатацiйникiв i вчених рiзних спецiальностей. Це дозволило не тiльки розробити конструктивнi i технологiчнi заходи з пiдвищення термiну служби машин i створити рацiональнi методи догляду за ними, але й на базi досягнень фiзики, хiмiї, механiки, термодинамiки i металознавства закласти основи вчення про тертя, зношування i змашування машин. Цiєю проблемою широко займаються на заводах, у вузах i галузевих науково-дослiдних iнститутах, їй присвячують наради i конференцiї, з цих питань видають монографiї i публiкують багаточисельнi журнальнi статтi.

На вiдмiну вiд високого рiвня стану розрахункiв деталей i конструкцiй на мiцнiсть, жорсткiсть i стiйкiсть, сучасний стан теорiї тертя i зношування не дає конструктору надiйних методiв розрахунку пар спряжень на зношування i бiльшостi зношуваних деталей на довговiчнiсть на передбачуваний термiн служби. Навiть гiдродинамiчна теорiя змашування, розвиток якої почався понад

дев'яносто років назад, не дозволяє виконати розрахунок підшипника з рідинним змащуванням з тією ж надійністю результатів, як і розрахунок балки методами опору матеріалів. Однак теорія й інженерна практика підвищення зносостійкості й надійності роботи деталей, що труться, мають велику кількість важливих якісних залежностей, результатів експериментальних досліджень і спостережень, використання яких дає змогу суттєво підвищити терміни служби машин.

На жаль, ці матеріали не можна повною мірою використовувати внаслідок їх розрізненості й різноманітності. Тому систематизація, узагальнення і представлення їх в доступній формі стосовно запитів конструкторів, технологів і працівників служб головного механіка, заводських лабораторій і експлуатаційників має велике значення для проблеми, що розглядається.

1.5. Терміни служби машин

Термін служби машин – календарна довготривалість експлуатацій виробу до зруйнування або настання граничного стану. Граничний стан може встановлюватися внаслідок морального або фізичного зношування, при зміні параметрів, за умовами безпеки, за економічними показниками, за необхідності першого капітального ремонту.

Вихід з ладу деталей і робочих органів машин за нормальних умов експлуатації відбувається внаслідок різних видів фізичного зношування: втомного руйнування і зламу, повзучості матеріалів, механічного зношування, корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу тощо.

Сучасний рівень розвитку прикладної теорії і стан конструкторських розрахунків при відносно добрих знаннях фізичних і механічних властивостей матеріалів дозволяють забезпечити міцність деталей машин з великою гарантією від поломок у нормальних умовах експлуатації. Тому найбільш розповсюдженою причиною виходу деталей і робочих органів машин з ладу є не поломка, а зношування і пошкодження робочих поверхонь деталей у вузлах тертя.

Незважаючи на досягнутий прогрес в області збільшення терміну служби машин, останній залишається недостатнім. Тривалість роботи авіаційного поршневого двигуна до ремонту складає 400...1000 годин. Відомі факти надзвичайно недовготривалого терміну служби (менше 1000 год.) циліндрових втулок потужних силових дизелів. Спостерігались випадки виходу з ладу у результаті кавітаційного руйнування потужних насосів і гребних гвинтів менше ніж через рік служби.

Особливо велике зношування деталей і робочих органів машин-знарядь, які експлуатуються в абразивному й агресивному середовищах, деталей транспортних машин, які працюють в умовах бруду і пилу. Наприклад, термін служби каменедробарок становить у середньому 3...4 місяці, зубів ковшів екскаваторів, ножів скреперів і бульдозерів, шнеків – 3...6 міс. Контрольні терміни служби до капітального ремонту вугільних комбайнів і врубуючих машин – 8...12 міс., а транспортних засобів у вугільних шахтах – 2...3 роки.

Дизелі, встановлені на потужних автосамоскидах, потребують капітального ремонту вже після 1200...1500 годин роботи, тобто через 4...6 міс. Бортові шестерні тракторів працюють до заміни не більше 2000...2500 год, термін служби тракторних трансмісій до ремонту складає 2500...3500 год. За сезон роботи тракторів на піщаному ґрунті необхідно замінювати 2-3 комплекти гусениць, що в середньому становить 50% вартості нового трактора. Леміш тракторного плуга обробляє в середньому до повного зношування всього 15...20 га ґрунту, що змушує щорічно виготовляти для сільського господарства понад 20 млн. лемішів, не кажучи вже про те, що на важких ґрунтах ріжуча кромка леміша потребує ремонту через 4...6 год роботи плуга. Річна потреба у запасних ланках привідних ланцюгів сільськогосподарських машин складає 100 млн. штук. У бурякорізках ножі з вуглецевої сталі потребують переточування з наступною термообробкою через кожних 1...2 місяці роботи, що викликає їх потребу в цукровій промисловості до 1 млн. штук на рік. Шнекові гвинти зі сталі 20X масловідтискних пресів неперервної дії служать 3...6 місяців.

Малу тривалість роботи мають дротяні канати вантажопідіймальних машин, а особливо на металургійних підприємствах. Середні терміни служби канатів доменних підйомників – 3...4 міс., розливних кранів мартенівських цехів – 6...7 місяців.

Досвід показує, що при належному догляді за технікою (із урахуванням правильної конструкції) машини можуть експлуатуватися у важких умовах протягом багатьох років. За даними П.І.Коха, на Ново-Солікамському калійному заводі шахтні вагонетки масою 2т служать 11...12 років, 13...14 років працюють екскаватори в кар'єрах тресту "Коркінвугілля". У цілому за весь термін служби гірничого обладнання на його ремонт потрібно у 10...12 разів більше засобів, ніж на випуск нових машин. Існує лише один шлях скорочення цих витрат – підвищити показники надійності машин і механізмів.

Неправомірним також є єдине оцінювання морального зношування для всіх типів машин галузі, бо вони відрізняються за ступенем функціональної і технічної відпрацьованості. Сільськогосподарські машини і знаряддя давно встановлених конструкцій (плуги, борони, культиватори, сівалки та ін.) мають розраховуватися на значно більший термін служби, ніж машини, які знаходяться на початкових стадіях свого розвитку (картоплезбиральні комбайни, машини для збирання томатів, капусти тощо).

В літературі існують дані про терміни служби різноманітних машин до їх повного морального зношування. Для сільськогосподарських машин за даними В.С.Антошкевича (ВІСХОМ), період складає 12 років без диференціації за типами машин.

Терміни служби і затрати на ремонт великої групи сільськогосподарських машин і знарядь у США наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Термін служби і затрати на ремонт сільськогосподарської техніки в США

Назва	Термін служби, роки	Сумарний машинний час, год.	Вартість ремонтів, у % від вартості нової машини	Індекс рівностікості і
1	2	3	4	5
Трактор				
Плуг	15	12000	120	0,63
Борона дискова	15	200	80	0,72
Борона зубова	15	2000	30	0,87
Коток	20	2500	30	0,87
Зернова сівалка	25	1500	10	0,95
Кукурудзяна сівалка	20	1200	25	0,89
Обприскувач	20	1200	30	0,87
Культиватор	10	1500	30	0,87
Фреза	12	2500	40	0,83
Косарка	12	2000	35	0,85
Граблі	12	2000	75	0,73
Волок	10	1500	25	0,89
Сінонавантажувач	12	1500	25	0,89
Силосозбиральний комбайн	12	1200	25	0,89
Зернозбиральний комбайн	12	2000	60	0,77
Прес-підбирач	10	2000	40	0,83
Жниварка	12	2500	40	0,83
Качаноочисник	12	1200	25	0,89
Бавовнозбиральний комбайн	10	2500	25	0,89
Розкидувач гною	10	2000	55	0,78
Дробарка кормів	15	2500	25	0,89
	15	2000	25	0,89

Примітка. Індекс рівностікості розрахований виходячи з того, що вартість запасних частин складає половину загальних затрат на ремонт.

Науково обгрунтовані планові начала мають бути покладені в основу визначення раціональних термінів служби машин і загальної технічної політики, забезпечення їх довговічності. Підвищення зносостійкості деталей робочих органів машин і механізмів є важливим складовим елементом роботи для досягнення максимальної економічної ефективності механізації й автоматизації виробництва.

1.6. Збитки від тертя і зношування в машинах

Більшість машин (85–90%) виходять з ладу з причини зношування деталей. Витрати на ремонт машин і обладнання, транспортних засобів складає в нашій країні близько 40 млрд. грн. за рік. Щорічно ця цифра збільшується на понад 1 млрд. грн.

Тільки на ремонт сільськогосподарських машин затрачається 6 млрд. грн. на рік. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин у кілька разів перевищує її собівартість: для автомобілів – у 6 разів, для літаків – до 5, для верстатів – до 8.

Трудомісткість ремонту і технічного обслуговування багатьох будівельних і шляхових машин за термін їх служби приблизно в 15 разів перевищує трудомісткість виготовлення нових. Створення машин, які не мають необхідності в капітальних ремонтах за весь термін їх служби та значне скорочення плинних ремонтів за своєю техніко-економічною ефективністю рівноцінні подвоєнню потужності машинобудівних заводів і збільшенню випуску чорних металів на багато мільйонів тонн за рік.

На частку заводів, які випускають нові трактори, припадає лише 25% потужностей, на частку заводів, які виготовляють запасні частини до тракторів – 34%, а на частку ремонтних підприємств – 44%. Кажучи інакше, на ремонт тракторів витрачається в 4 рази більше виробничих потужностей, ніж на їх виготовлення.

Цікаві дані з розподілу об'єму трудових затрат на весь термін служби автомобіля: на виготовлення – 1,4%, на технічне обслуговування – 45,4%, на плинний ремонт – 46%, на капремонт – 7,2%.

Ремонтом техніки в Україні зайнято понад 3 млн. чоловік. Одна третина верстатного парку держави знаходиться в ремонтних підприємствах. На запасні частини витрачається більше однієї п'ятої металу, який виплавляється в державі.

Простоювання автомобілів через технічні несправності в деяких автомобільних господарствах сягають 30...40% календарного часу. На кожну 1000 вантажних автомобілів, які простоюють, стають непридатними майже 3 тис. тонн металу і 417 тонн гуми. Підраховано, наприклад, що до списання трактора Т-130 на запасні частини, для заміни і ремонту необхідно використати стільки ж металу, скільки він важить сам – близько 12 т.

Народне господарство нашої країни щорічно використовує мільйони вентилів, ущільнюючі пристрої яких працюють на тертя і зношування. Проведені дослідження виявили, що майже 90% регульованих кранів вентилів працюють погано або зовсім не працюють. Причинами поганої роботи вентилів

є: конструктивна недосконалість, низька якість виготовлення і використання низькосортних металів. Однак основні витрати народне господарство несе не на виготовлення вентилів, а в результаті того, що вони не виконують своїх функцій. Підраховано, що при якісній роботі вентилів можна на 10% скоротити витрату тепла, що дозволило б зберегти до 6 млн.т умовного палива за рік або 130 млн. гривнів.

У наш час дизелі Д-54 мають ресурс 7500 мотогодин і вище. Такий показник досягнуто завдяки тому, що на заводах з виготовлення двигунів була проведена величезна робота з підвищення терміну служби основних деталей двигуна: введено гартування гільз циліндрів і шийок компресійного кільця, застосовано відцентроване очищення масла в шатунних шийках колінчастого вала, введено реактивні масляні центрифуги і т.п. Але не всі дизелі, виготовлені на заводах серійної продукції, працюють по 7500 мотогодин. Багато з них мають ресурс 3,5...4 тис. мотогодин. Після ремонту двигуни працюють дуже мало, всього 2,5...3 тис. мотогодин. Причиною є недостатня культура експлуатації і низька якість ремонту.

Торкаючись двигунів автомобілів, тракторів і комбайнів, слід відзначити, що за весь термін служби їх ремонтують до 5 разів.

Ресурс двигуна після ремонту у порівнянні з ресурсом нового двигуна складає 30...50%. Кількість робітників, які зайняті ремонтом двигунів, у кілька разів перевищує кількість робітників, які виготовляють двигуни на заводах серійної продукції. Матеріальні витрати на ремонт також у багато разів перевищують витрати на виготовлення нового двигуна. В цілому в країні на автомобілях, тракторах і комбайнах відремонтованих двигунів у 2 рази більше, ніж нових.

Причинами малого ресурсу машин після ремонту є:

- низька якість обробки поверхонь деталей, які труться;
- металорізальні верстати ремонтних підприємств не забезпечують тієї точності обробки, яку мають деталі, що виготовляються на заводах серійної продукції;
- відсутність засобів надійного промивання деталей перед складанням;
- забрудненість абразивним пилом складальних цехів, низька культура виробництва на ремонтних підприємствах;
- погане припрацювання деталей після ремонту, відсутність сучасних випробувальних стендів, приладів для контролю процесу припрацювання;
- забрудненість абразивом змащувальних і гідравлічних систем;
- недостатня спеціалізація виробництва на ремонтних підприємствах у порівнянні з її рівнем на заводах серійної продукції, що не дозволяє розробляти й реалізовувати найраціональніші технологічні процеси.

Великі матеріальні втрати народне господарство несе від підвищеного тертя у вузлах машин. Відомо, що більше половини палива, яке використовується автомобілями, тепловозами та іншими видами транспорту, витрачається на подолання опору, який створюється тертям у рухомих з'єднаннях. У текстильному виробництві на подолання опору витрачається близько 80% усієї енергії. Низькі ККД багатьох машин зумовлені в основному великими втратами на тертя. ККД глибоїдного редуктора, який встановлюється в ліфтах, металорізальному обладнанні, шахтових підйомниках тощо, складає тільки 0,65...0,70, а в такій розповсюдженій парі як гвинт-гайка – всього лише 0,25.

Згідно з працями П.С.Зака збільшення ККД черв'ячних редукторів за рахунок підвищення їх якості тільки на 4% у масштабі народного господарства дасть економію за рахунок підвищення затрат електроенергії понад 25 млн. грн. на рік.

На багатьох симпозіумах і наукових конференціях з питань зменшення зношування в техніці наголошується, що управління зношуванням є центральною ланкою у вирішенні таких загальнонаціональних проблем, як економія енергії, зменшення затрат матеріалів, а також забезпечення надійності і безпеки механічних і технічних систем.

У Великобританії в межах держави була проведена робота з упровадження досягнень триботехніки. Згідно зі звітом Британської ради з триботехніки, опублікованому в 1966 р., економічний ефект від застосування досягнень триботехніки в практику складав понад 500 млн. фунтів стерлінгів на рік (табл. 1.2), що еквівалентно 2% валового національного продукту.

Таблиця 1.2.

Результати впровадження досягнень триботехніків у практику у Великобританії

Результати впровадження досягнень триботехніки в практику	Річний економічний ефект, млн.фунтів стерлінгів
Зниження споживання енергії за рахунок зменшення тертя	20
Скорочення ручної праці	10
Зменшення витрат на матеріали змащування	10
Зменшення витрат на обслуговування і ремонт	230
Виключення втрат, пов'язаних з відказом обладнання	115
Економія вкладень за рахунок інтенсивнішого використання обладнання і більшого ККД	22
Економія вкладень за рахунок підвищення довговічності машин	100
УСЬОГО	515

Профілактичне обслуговування машин і механізмів стає доцільнішим з точки зору економії ресурсів робочої сили, матеріалів і збільшення довговічності. Досвід експлуатації вертольотів середніх розмірів показує, що 30% часу втрачається на непередбачене обслуговування. Враховуючи, що собівартість роботи гелікоптера складає 1000 доларів на годину, легко оцінити втрати від таких операцій. Аналогічні порівняння можна зробити для літаків і важкого обладнання.

Великі втрати від зношування машин і механізмів несе промисловість Німеччини. В 1974 році в сталеварній промисловості на зміну зношеного обладнання було витрачено більше 1,4 млрд. марок, що разом з витратами, викликаними простоюванням, призвело до подорожчання продукції прокатного обладнання на 10...20% (1 год. простоювання прокатного обладнання коштує 20 тис. марок). У вугільній промисловості втрати від зношування дорівнюють 10 млрд. марок на рік, а в усій промисловості Німеччини – понад 100 млрд. марок, тобто більше 1% річного бюджету. Зменшення втрат енергії в двигунах внутрішнього згорання на 10% дозволить зекономити 0,5 млрд. марок на рік, а застосування правильних триботехнічних рекомендацій зменшить на 50% річні витрати, викликані зношуванням.

У 1976 році у ФРН була створена державна програма зі збереження матеріальних ресурсів у результаті вирішення триботехнічних проблем. У першопочатковому варіанті було сформульовано близько 80 проблем з розділів тертя без змащувального матеріалу, гідродинамічного і напіврідинного змащування, мастильних матеріалів, методів вимірювання та дослідження тертя і зношування. Субсидії склали 84 млн. марок на період до 1984 р.

У результаті були вирішені завдання збільшення довговічності й міжремонтних періодів, збереження рідких металів і енергії, зниження вібрації і шуму в машинах. Для виконання програми були створені координаційні групи з розділів: 1) абразивне зношування; 2) вібраційне зношування; 3) підшипники і циліндропоршнева група; 4) еластогідродинаміка; 5) напіврідинне змащування; 6) техніка вимірювань і методи випробувань; 7) підшипникові матеріали; 8) обробка поверхонь; 9) мастильні матеріали двигунів внутрішнього згорання; 10) технологічні операції; 11) поведінка фрикційних систем; 12) дизельні машини.

РОЗДІЛ 2

ОРГАНІЗАЦІЯ БОРОТЬБИ З ТЕРТЯМ ТА ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УКРАЇНІ

2.1. Области застосування триботехніки

Одна із класифікацій областей використання триботехніки може базуватися на встановленні різниці (наприклад, за твердістю матеріалів) між парами ковзання: із двох твердих, із твердої і гнучкої, а також із двох гнучких поверхонь.

Пара твердих поверхонь (метал по металу) є найбільш розповсюдженою в техніці і виробництві. В табл. 2.1 наведено використання триботехніки в технології виробництва (в середній колонці вказано конкретні виробничі процеси, а в правій – перелік відповідних галузей промисловості).

Таблиця 2.1

Процеси триботехніки у виробництві

Класифікація	Виробничі процеси	Галузь промисловості
Пара тертя – метал по металу (дві тверді поверхні)	Кування. Штампування. Шліфування. Фрезерування. Розвертування. Волочіння. Полірування. Пресування. Формування. Висадка	Виробництво чавуну і сталі. Виробництво дроту. Обробка металів. Машинобудування. Інструментальна
Пара тертя – гнучка і тверда поверхні	Литво під тиском і видування. Холодна обробка. Пресування. Волочіння. Теплове формування. Вакуумне формування. Нанесення шарів	Шинне виробництво. Виробництво пластмас. Будівництво. Електроізоляція. Взуттєве виробництво. Тверді мастила
Пара тертя – волокно по волокну (дві гнучкі пари)	Ткацтво. Прядіння	Текстильна промисловість. Трикотажне виробництво. Виробництво кабелів. Виробництво пластмас

Пара тертя із гнучкої і твердої поверхонь утворюється при терті еластомерів і пластиків об тверду поверхню, в той час як тертя пари гнучких поверхонь виникає при терті волокна об волокно. Як бачимо з таблиці 2.1, діапазон можливого використання досягнень триботехніки в технології виробництва і споріднених областях дуже широкий, а перелік відповідних галузей промисловості також досить вагомий.

Типовими областями застосування досліджень тертя металів у промисловості є:

- змащування зворотно-поступальних механізмів;
- проектування інструменту для технологічних операцій;
- волочіння металевого дроту, змащування філери;
- механічна обробка чавуну і сталі;
- контактні напруження в зубчастих передачах і підшипниках кочення;
- пара тертя – гнучка і тверда поверхня зустрічаються при дослідженні ковзання автомобільних шин;
- динамічного витікання ущільнень машин;
- ковзання і зчеплення між гнучкими пасами і шорсткими шківками;
- характеристики дискового зчеплення автомобіля і склоочисника;
- використання твердих мастил у технології тощо.

Пара тертя волокно об волокно знаходить конкретне використання в текстильній промисловості і у виробництві електричних кабелів. Як правило, оптимізація виробничих операцій значно залежить від розуміння і правильного використання принципів триботехніки.

Застосування досягнень триботехніки можна знайти в автомобільній і аерокосмічній промисловості, медицині і біології та багатьох інших галузях народного господарства. Характерним прикладом є створення двигунів внутрішнього згорання, суден на повітряній подушці, систем гальмування, пневматичних шин і сталених коліс залізничних вагонів тощо. Освоєння космосу поставило завдання вивчення конкретних фрикційних (або змащувальних) характеристик конструкційних матеріалів в умовах вакууму при криогенних температурах. У такому розрідженому середовищі десорбція або випаровування поверхневих покриттів і мастил може виникати спонтанно, і холодне зварювання незахищених поверхонь, які повинні бути змащені, стає реальною небезпекою з катастрофічними наслідками. Належне змащування вузлів тертя в космосі важко забезпечити, а іонізуюче опромінення додатково ускладнює вирішення цього завдання.

В останні десятиріччя досягнення триботехніки знайшли застосування в області біомеханіки, наприклад, для змащування суглобів людини. Коли синовіальна рідина, що виділяється в суглобах людини, не забезпечує належного змащування рухомих поверхонь, починається хвороба артрит, яка приводить до інвалідності. Хворий артритом суглоб втрачає здатність забезпечувати достатню густину синовіальної рідини. Перспективний підхід з точки зору триботехніки у відновленні здатності синовіальної рідини до згущення шляхом уприскування у хворий суглоб полімерів.

2.2. Інженерно-технічні проблеми триботехніки

Прошли часи, коли майже епізодичного застосування змащувальних матеріалів (мастил) було достатньо для вирішення всіх завдань, пов'язаних із тертям рухомих поверхонь. Багато цих завдань у наш час можуть бути успішно вирішеними тільки на основі знань про систему взаємодіючих поверхонь критичного вузла складного механізму. Дотепер багато загадок природи (з точки зору триботехніки) залишаються не вирішеними. Наприклад, викликає подив здатність дельфіна пересуватися у воді швидше, ніж передбачає теорія. Якщо це пояснюється тим, що на поверхні його шкіри встановлюється чисто ламінарна течія, то як подавлюється турбулентність? Встановлено, що використання деяких полімерів і присадок зменшує опір течії в трубопроводах і гідравлічних системах, але теорія знову ж не дає пояснення цьому. Такі присадки мають важливе застосування при гасінні пожеж (забезпечуючи довжину струменя), а також при розробленні конструкцій торпед.

Як зменшити пробуксовування автомобільних шин на мокрій дорозі або виключити проковзування ведучих коліс при розгоні залізничних потягів? Як відновити функції ураженого артритом суглоба?

Необхідно знайти заміну або методи позбавлення відходів промислових масел, розчинів, технологічних емульсій і змащувально-охолоджувальних рідин, щоб запобігти подальшому забрудненню природних водних ресурсів.

Фактично вирішення однієї із найважливіших проблем сучасності – захисту навколишнього середовища, неможливе без застосування основ триботехніки і виключення відходів на всіх рівнях у промисловості й техніці.

З тертям і його наслідками ми зустрічаємося дуже часто. Важко уявити, які катастрофічні наслідки були б при зникненні тертя. Навіть у результаті часткового його зникнення, наприклад, внаслідок ожеледиці, в сотні разів збільшиться кількість дорожніх пригод. Без тертя неможлива робота багатьох механічних передач, а робота пасових (ремінних) передач, фрикційних варіаторів, гальм і муфт повністю засновується на використанні сил тертя. В усьому світі іде боротьба за збільшення коефіцієнта тертя наземно-колісного транспорту з дорогою, яке підвищує тяглову здатність і збільшує коефіцієнт ефективності гальмування.

Трибологічні явища враховуються при проектуванні й виробництві машин і механізмів. Вони проявляються в земляних роботах, сільському господарстві, будівництві, добувній промисловості й багатьох інших випадках.

Для зменшення тертя в світі на рік витрачається понад 100 млн. тонн мастильних матеріалів, які при змащуванні зазнають старіння і підлягають заміні. Мастила, які відпрацювали, підлягають переробці або утилізації, інакше вони будуть серйозною небезпекою для навколишнього середовища.

Відносні розміри зношення, наприклад, відношення втрати маси машини або вибору до її початкової маси, досить малі, але зношення призводить до виходу з ладу всієї машини або виробу в цілому. Втрати коштів у

машинобудуванні промислово розвинених держав унаслідок тертя і зношування досягають 4...5% національного доходу. Опір тертю поглинає в усьому світі 30...40% енергії, яка виробляється протягом року.

Енергія при терті перетворюється в теплоту, що нагріває механізми і вузли машин. Їх надмірне нагрівання в багатьох випадках призводить до відказів (відмов) і аварій. Дослідження показують, що приблизно 80...90% відказів машин відбувається через зношування вузлів і деталей машин, а також робочого інструменту.

До найважливіших і найактуальніших інженерно-технічних проблем триботехніки необхідно віднести: 1) підготовку інженерних кадрів з триботехніки; 2) розроблення сучасної теорії тертя; 3) створення "беззношувальних" вузлів тертя; 4) створення і виробництво принципово нових автоматизованих змащувальних систем для машин і обладнання та нових змащувальних матеріалів; 5) розроблення нових видів фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО) поверхонь тертя; 6) захист деталей машин від водневого зношування.

2.2.1. Підготовка спеціалістів з триботехніки

Для успішного розвитку будь-якої науки необхідні наукові інженерно-технічні кадри.

У США, Великобританії, Німеччині, Польщі і багатьох інших країнах тривалий час проводяться роботи з підготовки спеціалістів з тертя, зношування і змащування машин. В одних країнах інженерні кадри готують на спеціальних факультетах підвищення кваліфікації (Польща), в інших – шляхом спеціалізації студентів у вищих навчальних закладах (Німеччина). У Великобританії підготовка кадрів з триботехніки проводиться в університетах. Навчання студентів триботехніки у Вищій технічній школі Німеччини проходить на спецкурсах, загальний об'єм програм складає 400 годин. Окремим курсом читається трибофізика і трибохімія.

Програма навчання студентів триботехніки містить такі предмети: 1) проектування змащувальних пристроїв; 2) випробувальні станції змащувальних пристроїв; 3) основи триботехніки; 4) методи розрахунку і конструювання в техніці змащування; 5) засоби раціоналізації в триботехніці; 6) оцінювання експлуатаційних властивостей пар тертя; 7) транспорт і транспортуючі пристрої; 8) фізичні і техніко-вимірювальні основи проблем тертя і зношування; 9) розрахунок трубопроводів і змащувальної апаратури; 10) прикладна хімія змащувальних матеріалів.

Навчання побудовано таким чином, що випускники за даною спеціалізацією можуть працювати в усіх галузях промисловості, а також в спорудженні енергоустановок, хімічних установок, в приладобудуванні і в галузі транспортних засобів. У курсі триботехніки, що читається у Вищій інженерній школі м.Цвікау, є розділ "Ефект беззношування" (вибірковий перенос при терті).

В Україні наукових кадрів з триботехніки готують у Києві, Одесі, Хмельницькому та ін. Однак інженерних кадрів з триботехніки не випускає ні один вищий навчальних закладів України.

2.2.2. Розроблення сучасної теорії тертя та зношування

Те, що тертя є неврівноваженим термодинамічним процесом, відомо було давно. Але тільки в останні роки було встановлено, що при глибокій неврівноваженості й нелінійності можлива самоорганізація й утворення структури системи тертя іншого порядку, аніж тертя при граничному змащуванні. Таким чином, виявлено можливість роботи при досконалішій системі, аніж тертя при граничному змащуванні, а одночасно і можливість існування різних (двох) систем тертя – при граничному змащуванні й вибірковому переносі.

В реальних системах, які розглядаються у фізиці, виявляють просторові й часові структури. Наявність просторово-часової структури є загальною і фундаментальною властивістю матерії. При вивченні складних систем мають справу з кібернетичними структурами.

Автор робіт з термодинамічної теорії структур і самоорганізації в неврівноважених системах І.Р.Пригожин встановив, що деякі відкриті системи при переході від рівноважних умов до умов, далеких від рівноважних, стають нестійкими, їх макроекономічні властивості радикально змінюються. Такі властивості мають багато біологічних систем, причому в усіх випадках існує термодинамічний поріг самоорганізації, який розмежовує клас рівноважних структур і клас структур, які називають дисипативними, що виникають лише при великих відхиленнях від рівноваги.

Вперше основні положення теорії відкритих термодинамічних систем для вивчення явища тертя твердих тіл були застосовані в працях українського вченого Б.І. Костецького. Він створив структурно-енергетичну теорію тертя і зношування в машинах, яка визнана в усьому світі і є найсучаснішою з точки зору викладеного вище, а її концепція заснована на термодинаміці утворення самоорганізуючих структур при необоротних процесах і дисипації енергії тертя.

2.2.3. Проблема створення "беззношувальних" вузлів тертя машин

До останнього часу генеральним напрямком боротьби зі зношуванням у машинобудуванні було підвищення твердості поверхонь деталей, що труться. В промисловості розроблена велика кількість методів підвищення твердості деталей: цементування, азотування, хромування, ціанування, поверхневе гартування, наплавлення твердими матеріалами та ін. Багаторічний досвід свідчить, що цей напрямок дав змогу великою мірою підвищити надійність деталей машин, що працюють на тертя. Наприклад, електролітичне хромування циліндрів двигунів внутрішнього згорання не тільки підвищує зносостійкість пари циліндр–поршневе кільце, але й значною мірою зменшує втрати на тертя в циліндро-поршневій групі двигунів. Без азотування або цементування

зубчастих передач в наш час неможливо забезпечити надійну роботу важконавантажених редукторів. Розроблені методи підвищення твердості деталей, що труться, стали сильною зброєю в справі підвищення зносостійкості деталей, а звідси – і терміну служби машин.

Однак постійне прагнення до зменшення маси і підвищення інтенсифікації робочих процесів призвело до збільшення тисків у вузлах машин і швидкостей ковзання і погіршило умови змащування. Крім того, вимоги до підвищення ККД механізмів, а також застосування спеціальних змащувальних матеріалів і рідин призвело до того, що традиційні методи збільшення зносостійкості деталей, підвищення їхньої твердості в багатьох випадках перестали себе виправдовувати. Площа фактичного контакту поверхонь деталей при високій твердості матеріалу з багатьох причин (наявність можливого переносу, великої шорсткості й хвилястості поверхні) складає незначну долю номінальної поверхні тертя. В результаті на ділянках фактичного контакту створюється високий тиск, що призводить до інтенсивного зношування тертя.

У процесі пошуку засобів підвищення зносостійкості деталей машин у СНД було відкрито явище вибіркового переносу при терті (Д.Н.Гаркуновим). Вибірковий перенос (ВП) – це комплекс фізико-хімічних явищ на контакті поверхонь при терті, який дозволяє подолати обмеженість ресурсу спряжень машин, що труться, і зменшити втрати на тертя. У ВП використовуються фундаментальні фізико-хімічні процеси. На відміну від тертя при граничному змащуванні, де основою є механічна взаємодія і ефект Ребіндера, майже не використовується.

Вибірковий перенос, його системи зменшення зношування і тертя, розроблені А.А.Поляковим, не впливають з раніше відомих уявлень про тертя і зношування. Складність ВП зумовлюється як сукупність різних хімічних і фізико-хімічних процесів, що носять кібернетичний характер. У зв'язку з цим доречно послатися на загальну теорію систем, де вказується, що традиційний розділ науки на класичні дисципліни не задовольняє потреби сучасного наукового пізнання, а складні системи будь-якого виду не піддаються опису в рамках однієї наукової дисципліни. Процеси, що складають сутність ВП знаходяться, як правило, на стиках розділів хімії, фізичної хімії, фізики, кібернетики і механіки.

Складність ВП полягає також у тому, що ряд його хімічних і фізичних процесів не зустрічаються в практиці досліджень тертя. До них слід віднести процеси, що відбуваються при терті в сервовитній плівці, коли накопичення дислокації при її деформації підтримується на дещо низькому рівні, тим самим забезпечуючи її неруйнування і беззношуваність контактуючих поверхонь. До цих явищ слід також віднести зворотний зв'язок між навантаженням і силою тертя, коли в певному діапазоні навантажень і швидкостей ковзання їх збільшення викликає зменшення сили тертя. Більшість хімічних реакцій ВП є гетерогенними, тому їх вивчення ускладнене.

Сервоитна плівка – захисна металева плівка, що виникає на початковій стадії тертя в результаті вибіркового розчинення анодних компонентів поверхневого шару матеріалу.

Електричні явища супроводжують усі види зовнішнього тертя, бо процес утворення адгезійного зв'язку між поверхнями різнорідних твердих тіл, що дотикаються, призводить до утворення в контактній подвійній електричній шару. У ВП електричні явища відіграють певну роль. У початковій стадії ВП має місце вибіркоче (електрохімічне) розчинення в результаті роботи мікроелементів мідного сплаву, ускореного механодинамічною дією тертя. В результаті на поверхні утворюється шар міді – сервоитна плівка, яка пасивує поверхню мідного сплаву. Починає одночасно працювати елемент мідь–сталь. На поверхні тертя виникає два одночасно однойменно заряджені шари. Ця обставина має кардинальне значення – виникає кулонівське відштовхування цих шарів, що зменшує адгезійну взаємодію. Вступає в роботу третій елемент. Його дія полягає у втягуванні в зазор позитивно заряджених частинок. Напруженість поля ЕРС, що виникає, може сягати десятків мільйонів вольт на 1 см, і в зазор будуть втягуватись не тільки золі, але і частинки колоїдних розмірів, тобто виникає електрофорез.

Згідно з Д.Н. Гаркуновим ВП має в своїй основі описані вище та інші корисні фізико-хімічні явища і групи явищ, названі системами зношування і тертя. Вони стримують зношування, зменшують опірність зсуву і мають властивості самоорганізації, а іноді і здатність до оберненого зв'язку зі збуджуючою причиною. Їх основна цінність полягає в тому, що вони працюють диференційовано проти факторів, що ведуть до руйнування поверхні. Майже кожна з систем має глибокий зміст. Наприклад, система захисту від водневого зношування являє собою цілий трибологічний напрямок, а дифузійно-вакансійний механізм зменшення опірності зсуву являє собою нову фізичну проблему тертя, що зумовлює беззношувальність.

Традиційною системою зношування і тертя є самостійне утворення шару змащувального матеріалу при терті з граничним змащенням у результаті адсорбції молекул мастила на поверхні. Є й інші дані використання фізико-хімічних явищ для захисту від зношування і для зменшення тертя.

Явище ВП зумовлено термодинамічними системами тертя. Властивості цих систем розкрив І.Р. Пригожин, котрий встановив можливість високої самоорганізації фізичних і хімічних систем за певних термодинамічних умов. Тертя є термодинамічно неврівноваженим процесом, який може існувати як в області, близькій до рівноваги, так і далі від неї, утворюючи різноманітні структурні класи, перехід до яких здійснюється стрибкоподібно. У зв'язку з цим можливе існування систем тертя, що не накопичують енергію у вигляді нагромадження дефектів у поверхневих шарах, а повністю передають енергію в навколишнє середовище. Прикладом такої системи є ВП.

Корисною є властивість ВП працювати в середовищах, де тертя при граничному змащуванні не може ефективно виконувати свою функцію. ВП проявляє здатність перебудови захисних систем, котрі змінюються залежно від

властивостей середовища, що є вихідним матеріалом для утворення системи зношування і тертя. Варіанти розглядаються як різні модифікації ВП, які отримали назви за принципом змащувальної дії – плазмоутворення мастила, металоплачуча, іонна, траверсивна та ін.

При плазмоутворюючому змащуванні використовується група вуглецево-водневих мастил, що забезпечують виникнення ВП шляхом трибодеструкції частини своїх компонентів у зоні контакту при терті, хемосорбції продуктів деструкції на анодних компонентах сплаву вузла тертя й утворення поверхнево-активних речовин (ПАР) і сервовитної плівки. Таке мастило викликає ВП тільки у вузлах тертя, що містять плівкоутворюючий матеріал – бронзу, мідь тощо.

Для здійснення ВП у парах тертя сталь–сталь, чавун–сталь та ін., що не містять плівкоутворюючого матеріалу, використовуються металоплачучі змащувальні матеріали. Вони мають у своєму складі плівкоутворюючі матеріали, або оксиди металу, що відновлюються при терті, або металоорганічне з'єднання, що виділяє метал при розкладі в зоні тертя. При цьому поверхнево-активні речовини повинні міститись у базовому змащувальному матеріалі або утворюватись при розкладі металоорганічного з'єднання.

«Металоплачучі» пластичні змащувальні матеріали (наприклад, на основі ЦИАТИМ–201), що містять порошок бронзи або латуні, застосовуються у важконавантажених вузлах тертя типу гвинт–гайка та ін., де звичайні матеріали з добавками металоорганічних або комплексних з'єднань, працюють як у режимі ВП, так і в режимі граничного змащення.

У випадках, коли змащувальним матеріалом є середовище, що не містить поверхнево-активних речовин (наприклад, вода, водяні розчини сірчаної кислоти, солей), «металоплачуче» мастило переходить в іонне.

Іонне мастило засноване на властивості іонів металу, що знаходяться в розчині, втягуються у зазор між поверхнями тертя і розряджати в зоні контакту, утворюючи роздільну (дивідуальну) плівку.

Зносостійкість контактуючих поверхонь у соляних та інших агресивних розчинах істотно зростає, якщо в контакт ввести продукти деструкції пластмаси за допомогою підпружинених вставок або інших конструктивних заходів. Такі вставки істотно збільшують термін служби поверхонь тертя в морській воді. Продукти деструкції твердої пластмаси поводять себе в контакті аналогічно продуктам деструкції рідких вуглеводнів, тобто виключаючи окисно-відновний процес, і утворюють поверхнево-активні речовини, що істотно знижує інтенсивність зношування. Суміщення іонного мастила з підживленням поверхнево-активними речовинами називають траверсним мастилом.

Дослідження механізму вибіркового переносу, його закономірностей і областей раціонального використання призвело до деякої зміни поглядів, що склалися раніше, на ряд питань триботехніки – структуру і властивості тонких

поверхневих шарів, деталей машин, що труться, механізм дії зношування і змащування, шляхи створення змащувальних матеріалів і присадок до них, оптимальну структуру і властивості зносостійкості й антифрикційних матеріалів і припрацювання покриттів та ін.

Наведені вище зведені дані про вибірковий перенос, його використання і ефективність, узагальнені з літературних джерел. На думку Д.Н. Гаркунова, можна вважати, що вибірковий перенос – особливий вид тертя, який зумовлений самовільним утворенням в зоні контакту неокисленої тонкої металічної плівки з низьким опором зсуву і нездатний наклепуватися. На плівці, в свою чергу, утворюється полімерна плівка, яка утворює додатковий антифрикційний шар.

ВП застосовується в машинах: літаках (вузли тертя, шасі), автомобілях (передня підвіска), металорізальних верстатах (направляючі, пара гвинт–гайка), парових машинах (циліндр–поршневе кільце), дизелях (підшипники кочення), редукторах (пара черв'як–колесо), обладнанні хімічної промисловості (підшипники, ущільнювачі), механізмах морських суден (підшипники), магістральних нафтопроводах (ущільнення), гідронасосах (вузли тертя), нафтопромислового обладнанні (вузли тертя). ВП застосовується також в приладах (електричні контакти) і може бути використаний для підвищення стійкості ріжучого інструменту при свердлінні, фрезеруванні, протягуванні і при нарізуванні різі.

Фактори, що зумовлюють незношуваність:

- контактування поверхонь проходить через м'який шар металу, основний метал має знижений (в 10 разів) тиск;
- металічна плівка при деформації в процесі тертя не наклепується і може багатократно деформуватися без руйнування;
- тертя проходить без окислення поверхонь, ефект Ребіндера реалізується значною мірою;
- продукти зношування переходять з однієї поверхні, що треться, на іншу і назад, а в зоні тертя продукти зношування утримуються електричними силами.

Вибірковий перенос дає змогу:

1. При виготовленні машин економити метал (15...29%) за рахунок більшої вантажопідйомності (в 1,5...2 рази) пар тертя;
2. Збільшити термін роботи машини (в 2 рази), скоротити період припрацювання двигунів (в 3 рази) і редукторів (в 10 разів), відповідно скоротити витрати електроенергії;
3. В підшипниках кочення і ковзання зменшити витрати змащувальних матеріалів (до 2 разів);
4. Підвищити ККД глобоїдних редукторів з 0,7 до 0,85, гвинтової пари з 0,25 до 0,5;
5. Збільшити економію дорогоцінних металів (золота, платини, срібла) в приладах у 2...3 рази за рахунок великої надійності електричних контактів.

2.2.4. Удосконалення змащувальних систем і розширення їх випуску

Мастило різко зменшує інтенсивність зношування. Досить ввести в зону контакту деталей невелику кількість мастила (товщина змащувального шару 0,1 мкм), як сила тертя може зменшуватися в 10 разів, а зношування поверхонь тертя до 1000 разів.

Сучасні машини й обладнання містять велике число вузлів тертя (від десятків до тисяч), які витримують високі тиски, температури і швидкості ковзання. В наш час розроблені спеціальні змащувальні системи, які автоматично, через суворо певний проміжок часу, подають в зону тертя задану кількість змащувального матеріалу. Рівень технічного вдосконалення машин багато в чому визначається ступенем організації змащування вузлів тертя.

Ефективність змащувальної системи залежить від її конструктивної досконалості і якості змащувального матеріалу. Дотепер немає чітких рекомендацій з дозування й тривалості подачі змащувальних матеріалів в конкретні вузли тертя машини.

В наш час випускають кілька тисяч змащувальних систем на рік. Збільшення випуску повинно супроводжуватись підвищенням їх ефективності, що потребує проведення науково-дослідних розробок із конструктивного й технологічного вдосконалення виробництва основних вузлів цих систем, створення поточкових ліній, покращення планування і використання економічних стимулів підвищення продуктивності праці.

Річний випуск основних видів машин, на яких потенційно доцільно встановлювати системи змащування, дуже значний. Серед них – металорізальні верстати і ковальсько-пресові машини та верстати, екскаватори, бульдозери, автогрейдери, трактори, магістральні локомотиви, вантажні автомобілі й автобуси, комбайни та інші сільськогосподарські машини. За експертною оцінкою спеціалістів (проектантів машин, розробників змащувального обладнання, експлуатаційників) оснащення змащувальними системами і багатовідвідними насосами, що забезпечують точність і своєчасність подачі змащувальних матеріалів, підлягає до 85% перерахованих вище машин і обладнання (близько 2,5 млн. одиниць).

Для значного підвищення технологічного рівня і якості машин, їх економічності і надійності необхідно розв'язати проблему змащування. Це може бути забезпечено за рахунок: підвищення технологічного рівня і якості змащувального обладнання, його уніфікації, стандартизації, вдосконалення і підвищення ефективності експлуатації змащувального обладнання і техніки змащування; вдосконалення спеціалізації і кооперування виробництва; організації крупносерійного і масового виробництва змащувального обладнання з повним задоволенням потреб машинобудування при мінімальних затратах.

З випуску змащувального обладнання у світі спеціалізується багато фірм. В більш повній номенклатурі змащувальне обладнання випускають фірми "Фогель" (Західний Берлін) і "Трабон" (США); їх змащувальні системи користуються найбільшим попитом споживачів.

Підвищення технічного рівня обладнання для змащування доцільно проводити за такими основними напрямками: створення комплексного обладнання за принципом систем машин; розширення номенклатури змащувальних систем різних видів стаціонарних і мобільних машин, а також різних виробничих і кліматичних умов; створення автоматичних систем, адаптованих до режимів роботи основних вузлів тертя машин; зменшення габаритів і металомісткості вузлів і апаратів змащувальних систем; підвищення точності і стабільності подачі змащувального матеріалу; проведення робіт зі стандартизації й уніфікації.

2.2.5. Фінішна антифрикційна безабразивна обробка (ФАБО) поверхонь тертя

Як відомо, зносостійкість залежить від кінцевої (фінішної) технологічної обробки поверхонь деталей. Тому велике значення мають експериментальні дослідження впливу шорсткості поверхонь тертя на інтенсивність зношування деталей. Для найбільш розповсюджених спряжень знайдено оптимальні значення параметрів шорсткості, за яких зношування деталей мінімальне. Встановлено, що від фінішної обробки деталей залежить не тільки початкове (при припрацюванні) зношування, але й зношування при встановленому процесі, тобто припрацювання може впливати на інтенсивність зношування при тривалій експлуатації машин.

В останні роки розроблено нові технологічні процеси фінішної обробки деталей, які дозволяють зменшити припрацювання зношування деталей і підвищити антифрикційні властивості спряжень (покращити змащування деталей, зменшити коефіцієнт тертя). До таких методів можна віднести вібраційну обробку поверхонь тертя й алмазне вигладжування.

Однак використано ще не всі резерви підвищення зносостійкості деталей в області застосування нових фінішних видів обробки. Наприклад, кінцеву обробку дзеркала циліндра двигунів внутрішнього згорання проводять хонінгуванням, перед яким циліндри шліфують, розгортають або розточують. Хонінгування проводять у кілька етапів. Цей процес може забезпечити необхідну шорсткість поверхні дзеркала циліндра і певний напрямок виступів нерівностей (виступи, направлені під певним кутом до осі дзеркала циліндра), які створюють найкращі умови для утримання змащувального матеріалу на

робочій поверхні. Однак при цьому оброблювана поверхня більшою чи меншою мірою насичується абразивом хонів і, не дивлячись на наступне продування циліндра стисненим повітрям, абразивні частинки залишаються на робочій поверхні і у важкодоступних місцях (на стиках нерухомих посадок і т.д.). Ці частинки в процесі роботи вимиваються мастилом і викликають підвищене зношування деталей. Це ж саме стосується обробки шийок колінчастих валів.

У зв'язку з викладеним, вкрай необхідне розроблення нових технологічних методів викінчувальної обробки деталей, за яких взагалі виключалася б абразивна обробка поверхні. До таких методів відноситься фінішна антифрикційна абразивна обробка (ФАБО). Суть ФАБО в тому, що поверхня тертя деталі покривається тонким шаром латуні, бронзи або міді шляхом використання явища перенесення металу при терті. Перед нанесенням покриття абразивну поверхню знежирюють і покривають гліцерином або сумішшю, що складається з двох частин гліцерину і однієї частини 10%-го розчину соляної кислоти. В процесі тертя окисна плівка на поверхні сталі розпушується, поверхня мідного сплаву пластифікується, створюються умови для його схоплення зі сталлю. Товщина перенесеного шару бронзи або латуні 1...2 мкм.

Деталі, які підлягають ФАБО, можуть бути шліфовані, розгорнені, проточені або хонінговані. Шорсткість поверхні повинна бути не нижче $R_a=2,5...1,25$ мкм. Перевага ФАБО перед іншими фінішними операціями в тому, що цей метод надто простий і не потребує складного обладнання. ФАБО надає сталевій або чавунній поверхні високі антифрикційні властивості. Після ФАБО циліндр двигуна внутрішнього згорання немов перетворюється на перший період роботи в бронзовий, коефіцієнт тертя між поршневим кільцем і дзеркалом циліндра зменшується в два рази. Це може суттєво відобразитися на потужності двигуна.

Перші досліди з застосування ФАБО для циліндрів двигунів показали великі переваги цього методу перед хонінгуванням. Зносостійкість циліндрів і поршневих кілець зросла в півтора рази.

Шийки колінчастих валів також доцільно піддавати ФАБО, оскільки вони і спряжені з ними вкладиші лімітують час припрацювання двигунів і часто піддаються ремонту.

2.2.6. Проблема водневого зношування

Важливим завданням триботехніки є розроблення методів боротьби з водневим зношуванням. У кінці 70-х років в Україні експериментально було виявлено невідоме раніше явище концентрації в поверхневих шарах деталей, що труться, водню, який виділяється з матеріалів пари тертя і з навколишнього середовища (змащувального матеріалу, палива, води та ін.). Це явище викликає прискорення зношування.

Водневе зношування характеризується рядом процесів у вузлах тертя машин:

- інтенсивним виділенням водню в результаті трибодиструкції матеріалів, що містять водень, прискореним механічною дією;

- дифузією водню в деформованих шарах сталі; швидкість дифузії визначається градієнтами температур і напружень, що створює ефект накопичення водню в процесі тертя; особливим видом руйнування, пов'язаним з одночасним проявом великого числа "зароджень" тріщин по всій зоні деформування, і згаданим ефектом накопичення водню.

Водневе зношування не має загальних рис з водневою крихкістю сталі ні за джерелами насичення воднем, ні за інтенсивністю і характером розподілу водню в сталі, ні за характером руйнування, оскільки воно пов'язане тільки з процесом тертя і зумовлене ним. Для водневого зношування характерні висока локальна концентрація водню в поверхневому шарі сталі, що виникає внаслідок великих градієнтів температур і навантажень при терті, які зумовлюють явище накопичення і особливий характер росту тріщин, що призводить до суцільного руйнування шару. Водневе зношування вносить нову уяву про механізм крихкого руйнування.

Захист від водневого зношування має особливі значення для таких галузей:

- авіаційної техніки (вузли тертя паливних насосів, а також гальмівні колодки і барабани коліс виходять із ладу в результаті водневого зношування);

- залізничного транспорту (підвищення швидкостей поїздів пов'язане зі створенням ефективніших гальм); намагання використання пластмасових гальмівних колодок бажаних результатів не дало внаслідок підсиленого водневого зношування бандажів коліс;

- автомобільного транспорту (водневе зношування різко зменшує термін служби гальмівних накладок, гальмівних барабанів і дисків зчеплення, а також лопаток бензинових насосів та інших деталей і агрегатів автомобілів);

- морського флоту (водневому зношуванню підлягають вузли тертя, які змащуються водою, наприклад, гребені, вали суден та ін.);

- деревообробної промисловості (водневе зношування деревообробного інструменту і робочих органів машин стримує зростання продуктивності праці в галузі);

- техніки Півночі (однією з причин швидкого зношування машин є крихкодія водню, який за низьких температур не розсмоктується в поверхневих шарах, а концентрується між зоною тертя і об'ємом матеріалу деталі, що треться, внаслідок значного перепаду температур);

- техніки майбутнього (в нових машинах розширюється застосування

титану і його сплавів; при терті ці матеріали володіють низькими антифрикційними властивостями, дуже швидко поглинають водень і піддаються водневному зношуванню).

При проведенні робіт зі створення двигунів для автомобілів і літаків на водневому паливі дослідники повинні насамперед вжити заходи для захисту деталей від водневого зношування. Проблема водневого зношування має комплексний міжгалузевий характер і вимагає залучення для її розв'язку вчених різних спеціальностей (металознавців, фізиків, хіміків, спеціалістів з триботехніки) і повинна виконуватися за єдиним планом.

2.3. Основні напрямки підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя машин

До основних напрямків підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя машин відносять: оптимізацію конструктивних рішень вузлів тертя в процесі розроблення й проектування машин, тобто, так званий, конструктивний фактор (напрямок); технологічні методи; експлуатаційні заходи.

Оптимізація конструктивних вирішень вузлів тертя. Конструкція виробу визначає структуру виробництва і його технологію, трудомісткість і матеріаломісткість виробу, тобто економічність виробу у виробництві й експлуатації перш за все залежить від конструкції. Тому конструктор разом із технологом у процесі розроблення й проектування машини (виробу) в першу чергу повинен займатися відпрацюванням конструкції машини на технологічність.

Технологічність конструкції виробу – це сукупність конструктивних і технологічних вирішень, які забезпечують використання прогресивної технології й організації виробництва з найменшими затратами часу і матеріалів, які при заданих масштабах виробництва забезпечують найменшу собівартість і високу якість виробу за умови використання машиною всіх її функцій.

Мабуть першим серед конструкторів, хто звернув увагу на зв'язок зносостійкості з конструкцією вузлів тертя, був П.І. Орлов. В його праці "Смазка легких двигателей" (1937р.), що стала бібліографічною рідкістю, міститься цінний матеріал для конструкторів з питань конструктивних форм підшипників, конструювання високозносостійких опор ковзання, теорії тертя кочення. Вона по сьогодні не втратила цінності як в частині яскравих конструкторських прийомів, які шляхом раціонального використання мастила у вузлах машин забезпечують високу надійність деталей, що труться, так і в твердженні, що в питаннях конструювання, й особливо в техніці, змащування "дрібниць", наприклад, витікання масла з ущільнювачів, підвищених витрат при

викиді масла з суфлерів і тому подібне, не повинно бути, бо це затримує створення нових машин і утруднює роботу обслуговуючого персоналу при експлуатації діючих. В інших його трьох книжках із конструювання машин приділено багато уваги також резервам надійності і довговічності при конструюванні машин, наголошено на провідній ролі конструктора у вирішенні питань зносостійкості й довговічності машин.

У роботах М.М. Тененбаума, починаючи з 1966р., проводиться систематизація конструктивних способів забезпечення високої зносостійкості машин. Усі відомі способи розділено на такі групи: виключення зовнішнього тертя; покращення умов тертя; рівностійкість деталей, що зношуються; оптимізація форм деталей; індикатори зношування. М.М. Тененбаум у своїх роботах наголошує, що розв'язання прикладних задач повинно базуватися на закономірностях динаміки зношування деталей і впливу конструктивних параметрів на їх зносостійкість.

До конструктивних способів усунення пошкоджень і підвищення зносостійкості деталей машин Б.І. Костецький відніс такі:

- вибір виду тертя в опорах;
- визначення форми і розмірів робочих поверхонь;
- розроблення засобів із регулювання температури;
- раціональне поєднання матеріалів складових елементів вузла тертя;
- вибір системи змащування;
- наявність агрегатів і устаткування для очищення повітря і змащувального матеріалу, а також ущільнень;
- забезпечення технологічності ремонту і заміни зношених деталей і вузлів;
- розроблення заходів із захисту вузлів тертя від попадання абразиву та інших забруднень;
- правильний вибір матеріалу і методу зміцнення для пар тертя.

Основним принципом, як вказував у своїх працях Б.І.Костецький, який повинен бути в основі проектування й розрахунку форми і розмірів деталей пар тертя, є забезпечення в гарантованому діапазоні швидкостей ковзання і навантажень режиму нормального (окисного) зношування. Для цього необхідно керуватися відомими закономірностями того або іншого виду зношування залежно від швидкості ковзання й нормального тиску для вибраних матеріалів і середовищ, а також даних про вплив розмірів пар тертя (масштабного фактора) на вид зношування і його інтенсивність.

Шляхи вирішення цих завдань схематично зображено на рис. 2.1.

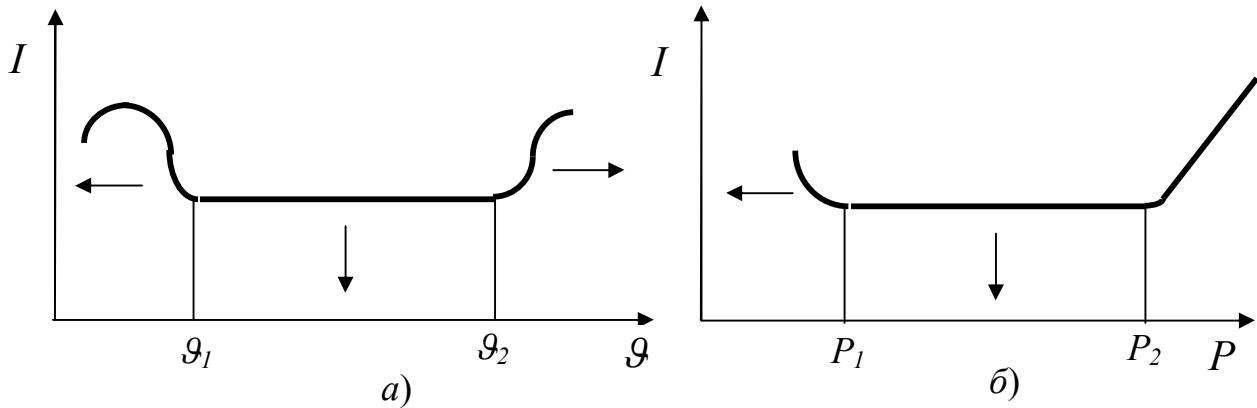


Рисунок 2.1. Схема розширення діапазону і мінімізація окисного зношування: а – за швидкістю ковзання; б – за нормальним тиску

Другим принциповим завданням боротьби зі зношуванням і налагоджуванням є зменшення інтенсивності окисного зношування. Ці два принципові завдання доповнюють одне одного і їх сумісне вирішення забезпечує збільшення термінів служби і надійності роботи машин. Очевидно, що при цьому повинен бути використаний весь комплекс конструктивних, технологічних і експлуатаційних заходів.

Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей. У виробництві і техніці відомі й використовуються багаточисельні технологічні способи для підвищення зносостійкості деталей. Основні технологічні заходи, що підвищують зносостійкість і довговічність машин, можна розділити на такі групи:

1. Застосування сучасних методів для створення матеріалів необхідної міцності для різних умов експлуатації машин і отримання з них заготовок високої якості, близьких за формою і розмірами до готових деталей.
2. Застосування сучасних технологічних прийомів, що забезпечують виготовлення деталей заданої точності і стабільності як за розмірами, так і за фізико-механічними властивостями.
3. Застосування сучасних методів контролю якості матеріалів, заготовок і готових виробів за відповідними показниками надійності.
4. Застосування процесів зміцнюючої обробки (технології) для отримання необхідної якості робочих поверхонь деталей машин з високим опором зношуванню і поломкам у різних умовах експлуатації.

Методи зміцнюючих технологій для підвищення зносостійкості деталей машин накопичували протягом багатьох десятиріч розвитку машинобудування.

Серед найбільш розповсюджених необхідно назвати такі:

- хіміко-термічна обробка: цементування, азотування, хромування;
- ціанування, силіціювання, алітування, сульфоціанування і сульфідкування та ін.;
- термічна обробка: поверхневе гартування полум'ям, високочастотне

- гартування, поверхневе гартування з нагрівом в електроліті, лазерне зміцнення;
- хімічна обробка: глибоке анодування, оксидування, фосфатування;
 - поверхневе пластичне деформування: обкатка кульками і твердосплавними роликками, шротоструменева обробка, алмазне вигладжування, зміцнення чеканкою, гідрополірування, обробка поверхні вибуховим навантаженням;
 - гальванічні покриття: хромування, нікелювання, залізнення, борування, радіювання, посрібнення, луження, свинцювання і покриття сплавами;
 - хімічні покриття: нікелювання, хромування, покриття кобальтом і сплавами нікель–кобальт;
 - способи надання поверхні антифрикційних властивостей: графітування, накатування (заглиблення канавки), нанесення покриттів у вакуумі, нанесення дисульфиду молібдену, фрикційне латунювання і бронзування – ФАБО (фінішна антифрикційна безабразивна обробка), покриття пластмасами (вихровий і газополуменевий методи), металізація напиленням;
 - наплавлення: електродугове, електрошлакове, вібродугове;
 - електроіскрове зміцнення тощо.

Експлуатаційні заходи підвищення зносостійкості і довговічності машин. Конструктивна досконалість і висока якість виготовлення машин, що не гарантують їх тривалу і безаварійну роботу. Додатковими умовами такої роботи є грамотна технічна експлуатація і доцільна система технічного обслуговування і ремонтів.

Завданнями технічної експлуатації є: забезпечення справного технічного стану машин під час їх експлуатації і консервації; забезпечення безаварійної роботи машин за належної її економічності. Рівень технологічної експлуатації машин, в загальному, визначається встановленням її у відповідності з призначенням, кваліфікацією обслуговуючого персоналу, постановкою догляду за машинами і технічного нагляду за ними, організацією змащувального господарства.

В останні роки поряд з технологічними методами, які забезпечують високу якість поверхні і задані властивості поверхневих шарів, отримали розвиток методи підвищення якості поверхонь безпосередньо при експлуатації машин. Особливо ефективним напрямком є організація вторинних захисних структур на поверхні тертя внаслідок застосування спеціальних присадок до змащувальних матеріалів і механізмів взаємодії їх з металом поверхневих шарів у процесі деформації при терті.

Детальніше заходи з підвищення зносостійкості і надійності машин розглядатимемо у наступних главах.

2.4. Стан науки про тертя і зношування в машинах в Україні

Етапи розвитку триботезніки, як і інших наук, пов'язані зі створенням аерокосмічної і корабельної техніки, машинобудівної і металообробної промисловості, залізничного транспорту, автомобільної промисловості і т.п.

Значущість триботехніки в останні десятиріччя постійно підвищується.

Вона торкається різноманітних сфер діяльності людини, але особливо велика її роль у зв'язку з необхідністю підвищення зносостійкості машин, приладів, технологічного обладнання, інструменту, робочих органів та інших виробів, а також зменшення витрат на тертя при їх використанні. Вирішення завдань із застосування досягнень триботехніки має яскраво виражений міжгалузевий характер і здійснюється на державному рівні в багатьох високорозвинених у науково-технічному відношенні західних країнах. Зараз вважають, що увага до триботехніки (трибології) на відповідному рівні, особливо на стадії навчання, наукових досліджень і застосування, можуть дати економію коштів від 1,3% до 1,6% валового національного доходу. При цьому найважливіше, що перші 20% такої економії можна отримати без значних капітальних вкладень. Справедливість розміру вказаної економії підтверджена багатьма офіційними дослідженнями в Німеччині, Канаді, Великобританії, Китаї, США та інших країнах.

У зв'язку з цим, терміни "трибологія" і "триботехніка" внесені в словники кожної промислово розвинутої країни. В більшості університетів і технічних вузів світу нині створені і функціонують кафедри трибології. В усіх розвинених країнах створені організації трибологів.

В Україні не існує таких кафедр. Але в останні десятиріччя відбулися певні зрушення в цьому напрямку. В деяких вищих технічних навчальних закладах України, в тому числі і в Тернопільському державному технічному університеті імені Івана Пулюя читаються курси з триботехніки. В 1995 році в Україні створено "Товариство трибологів" з центром у Київському міжнародному університеті цивільної авіації, мета якого – впровадження перспективних ідей і розробок у промисловості.

В наш час провідними науково-дослідними організаціями в області триботехніки в Україні є Інститут проблем матеріалознавства АН України, Інститут надтвердих матеріалів АН України, Інститут електрозварювання АН України ім. Є. Патона та деякі інші.

Роботи в області триботехніки проводяться й у вищих навчальних закладах України: Національному авіаційному університеті, Національному технічному університеті "Київський політехнічний інститут", Військово-повітряних інститутах Києва і Харкова, Хмельницькому технологічному інституті та ін.

Велика роль у створенні української школи тертя і зношування в машинах, організації та проведенні наукових досліджень і підготовці кваліфікованих наукових кадрів з триботехніки, як вже вказувалося вище, належить професору, доктору технічних наук Борису Івановичу Костецькому, який працював в Київському інституті інженерів цивільної авіації та Українській академії сільського господарства (м. Київ).

У Києві видається республіканський міжвідомчий науково-технічний журнал "Проблеми тертя і зношування".

РОЗДІЛ 3

ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1. Загальні відомості про поверхню твердих тіл та її якість

Природа поверхні твердих тіл, її хімічний склад і структура великою мірою визначають триботехнічні характеристики пар тертя. Навіть часткове покриття поверхні твердого тіла (деталі) моношаром адсорбованих атомів або молекул істотно позначається на адгезії і терті. Лише 1% легованого елемента, що міститься в матеріалі, у разі дифузії до поверхні може визначати зносостійкість матеріалу. Те саме стосується присадок до мастильних матеріалів, котрі взаємодіючи з поверхнею твердих тіл, ефективно захищають їх від різних видів зношування.

Взаємодія твердих тіл в умовах зовнішнього тертя локалізована в найтонших поверхневих і приповерхневих (підповерхневих) шарах, що трансформуються у процесі як технологічної обробки, так і експлуатації. Руйнування деталей вузлів тертя починається здебільшого у поверхневих шарах. У зв'язку з цим підвищується роль поверхні деталі в підвищенні надійності й довговічності вузлів тертя, що потребує розгляду її основних характеристик.

Характеристики зовнішнього тертя, змащування і зношування безпосередньо пов'язані з якістю поверхонь деталей, які в процесі роботи труться. В техніці під поверхнею деталі розуміють зовнішній шар, який за будовою та іншим фізичним властивостям відрізняється від внутрішньої частини. Комплекс властивостей, набутих поверхнею деталі в результаті обробки, характеризуються загальним поняттям "якість поверхні".

Якість поверхні деталей машин впливає на такі їх службові властивості, як опір втомі, зносо-, ерозіє- і корозостійкість та пов'язаних з такими властивостями спряжень, як міцність посадок з натягом і щільність рухомих і нерухомих з'єднань.

Якість поверхонь деталей машин розглядається у вихідному і робочому (експлуатаційному) стані (рис. 3.1). Вона визначається геометрією поверхні, будовою і фізико-хіміко-механічними властивостями поверхонь шарів і напруженнями в них.

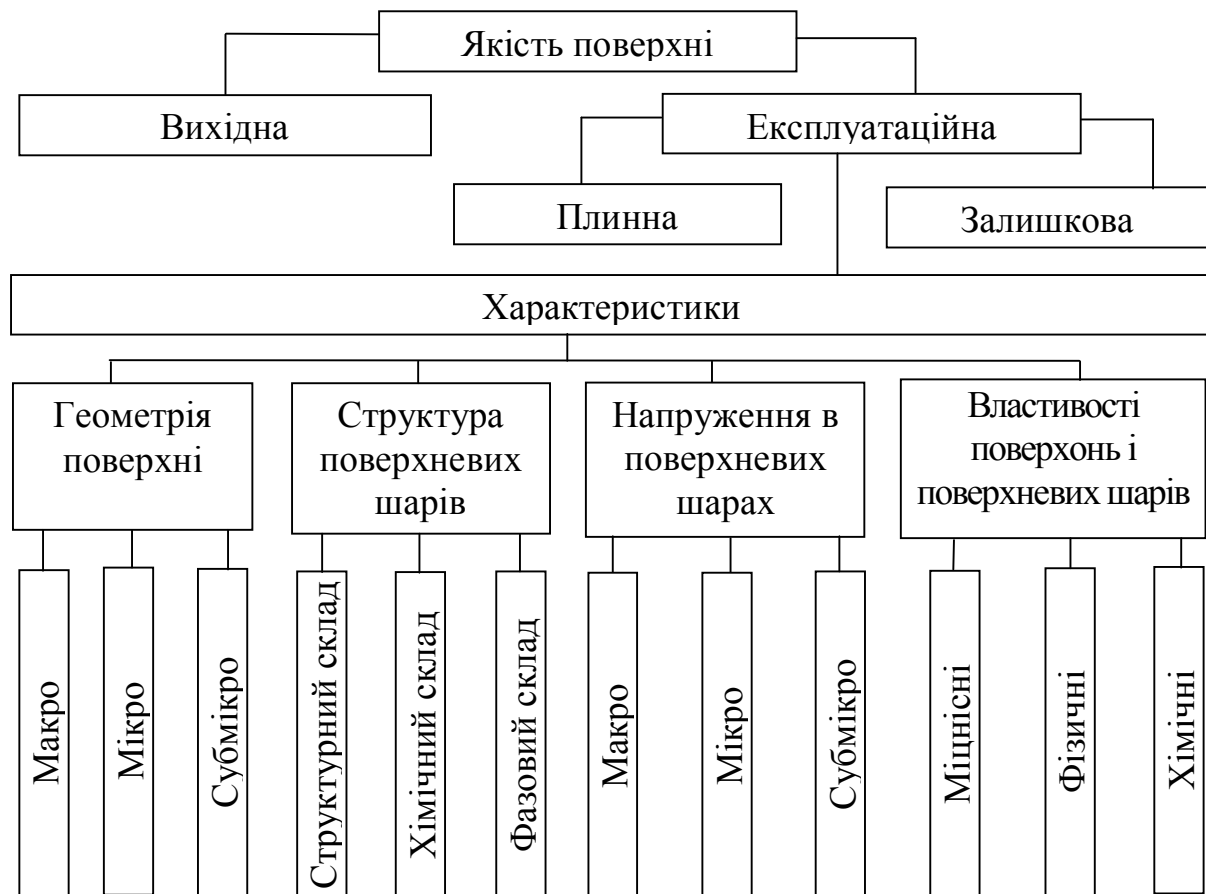


Рисунок 3.1. Основні показники якості поверхні

Вихідна якість зумовлюється технологією обробки. Її значення особливо велике для початку роботи спряжень, які труться (періоду припрацювання і подальшого зберігання в процесі експлуатації заданих посадок).

Реальні деталі в результаті механічної обробки заготовок мають відхилення від ідеальної форми, зображеної на робочих кресленнях цих деталей. Такі відхилення називають похибками.

Похибки обробленої поверхні з точки зору причин їх утворення і методів виміральної техніки, що застосовуються для їх визначення, можна поділити на макро-, мікро- і субмікрогеометричні відхилення.

Характер контактування двох твердих тіл, окрім геометрії поверхонь, визначається механічними, фізичними і хімічними властивостями тонких поверхневих шарів і їхнім напруженим станом. Такі поверхневі шари, товщина яких становить від десятків ангстремів до сотих і рідко – десятих часток міліметра, мають як правило іншу структуру і властивості, ніж матеріали усередині виробу. Відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини зумовлена трьома основними факторами:

а) станом атомів металу в поверхневих шарах, що відрізняється від стану атомів в об'ємі, наслідком чого є наявність вільної поверхневої енергії і велика адсорбційна активність;

б) сумою механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу під час остаточних і попередніх операцій технологічної обробки;

в) сумою повторних циклічних, механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу у разі навантаження тертям в експлуатації.

В процесі експлуатації вихідний технологічний рельєф швидко зникає. Хімічний склад і геометрія поверхонь тертя повністю змінюється. Формується нова якість поверхні. Перехід від вихідного стану до експлуатаційного здійснюється під дією факторів зовнішнього тертя: навантаження, швидкості руху, температури в зоні контакту і середовища. Зміни якості поверхні й особливого стану тонких поверхневих шарів під час роботи пари, яка треться, можуть бути зворотними, які зникають після зняття навантаження, і незворотними, залишковими. Тому експлуатаційну якість поверхні визначають не тільки залишковими характеристиками після зняття навантаження, але й плінними змінами в процесі тертя.

3.2. Геометрія поверхні деталей машин

Оцінка геометричних параметрів поверхні деталей машин включає оцінку макро-, мікро- і субмікродвигнень з урахуванням природи і механізмів утворення геометричних відхилень, тобто з розподілом на складові, які викликаються механічною обробкою, внутрішньою будовою і навантаженням при експлуатації.

Під макрогеометрією розуміють відхилення від форми поверхні всієї деталі або великих її ділянок. Макронерівності являють собою відхилення поверхні від номінальної форми всієї деталі: відхилення контуру від округлості: для циліндрів – конусоподібність, некруглість, бочкоподібність, сідловитість; для площин – неплоскостність, випуклість, угнутість та інші.

Мікродвигнення поділяються на хвилястість, шорсткість і субмікрошорсткість.

Мікрогеометричні відхилення можуть бути технологічними і експлуатаційними. Технологічні макродвигнення зумовлені недостатньою точністю верстата, інструмента, режимами обробки, температурними напруженнями і деформаціями. Експлуатаційні макродвигнення зазвичай спричиняються нерівномірністю зношування, що виникає в результаті неправильного устанавлення деталей рухомого з'єднання, вібраціями і перевантаженнями в процесі роботи. Залежно від ступеня точності виготовлення деталі, у відповідних стандартах наводяться граничні відхилення від плоскостності, прямолінійності, форми циліндричних поверхонь, радіального биття, паралельності і перпендикулярності. З підвищенням якості машин, їхньої надійності і довговічності механічні вимоги до форми деталей машин зростають.

Під хвилястістю поверхонь розуміють сукупність більш чи менш регулярно почергових підвищень чи впадин з кроком хвилі значно більшим за її висоту.

Хвилястість являє собою сукупність вершин і впадин, які періодично повторюються на поверхні, на відстані меншій, ніж у макронерівностей, і більшій, ніж у мікронерівностей.

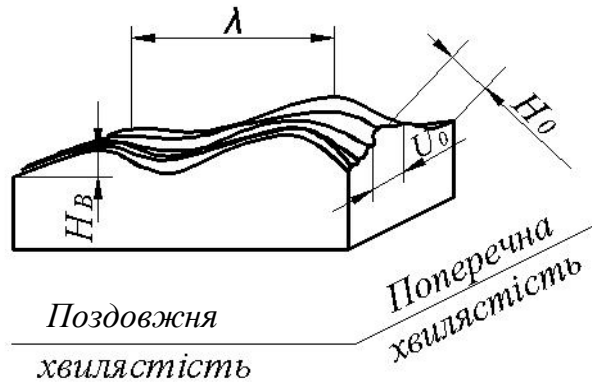


Рисунок 3.2. Схема хвилястості поверхні:
 λ – крок хвилі в поздовжньому напрямку;
 H_B – висота хвилі в поздовжньому напрямку; λ_0 – довжина хвилі в поперечному напрямку; H_0 – висота хвилі в поперечному напрямку

Форма коливань близька до синусоїди з періодом порядку 10 мм. Для хвилястості відношення кроку до висоти нерівностей змінюється від 150 до 500.

Хвилястість у напрямі головного руху при різанні називають поздовжньою, а в перпендикулярному напрямі поперечною (рис. 3.2).

Мікрогеометрія (шорсткість) – характеристика форми і розмірів поверхневих нерівностей з відносно малим кроком на базовій довжині (відношення кроку до висоти нерівностей повинно бути менше 50). Шорсткість поверхні – розмірна характеристика поверхні і регламентована ГОСТом 2789-73, ГОСТом 2309-73 та методичними вказівками у впровадження згідно з ГОСТом 2789-73. У відповідності з цими державними стандартами передбачається 6 основних параметрів, що характеризують шорсткість поверхні: 3 висотних – R_a , R_z , R_{max} , 2 крокових – S і S_m , відносна опорна довжина профілю t_p (рис. 3.3).

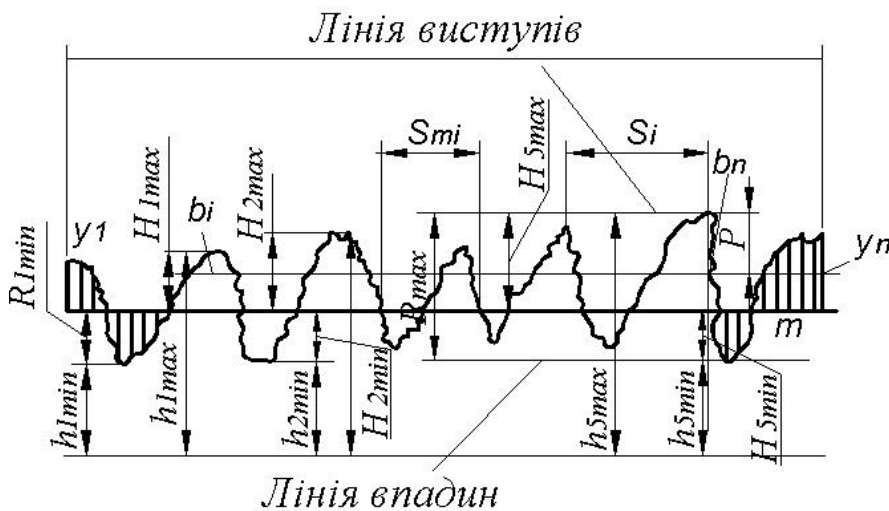


Рисунок 3.3. Вихідна шорсткість

Середнім арифметичним відхиленням профілю R_a , називають середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини l :

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{або} \quad R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx. \quad (3.1)$$

На профілограмі розміщення середньої лінії профілю визначають так, щоб площі виступів і впадин контуру профілю F по обидва боки від неї були рівні, тобто

$$F_1 + F_3 + F_5 \dots F_{n+1} = F_2 + F_4 + F_n \quad \int_0^l y(x) dx = 0. \quad (3.2)$$

Відносна однорідність мікронерівностей поверхні деталі дозволяє судити про шорсткість у даному напрямку за результатами дослідження ділянки порівняно невеликої довжини. Довжину базової лінії, що використовується для виділення нерівностей, які характеризують шорсткість поверхні, називають базовою довжиною l .

Висота нерівностей профілю по 10 точках R_z являє собою суму середніх абсолютних значень висот з п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{l=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{l=1}^5 |y_{vi}| \right), \quad (3.3)$$

де y_{pi} – висота найбільшого i -го виступу профілю;
 y_{vi} – глибина i -ї найбільшої впадини профілю.

Найбільша висота нерівностей профілю R_{max} є повною висотою профілю, тобто відстанню між лінією виступів профілю і лінією впадин профілю в межах базової довжини.

Середній крок місцевих виступів профілю S – середнє значення кроків місцевих виступів профілю в межах базової довжини:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i. \quad (3.4)$$

Середній крок нерівностей профілю S_m – середнє значення кроку нерівностей профілю по середній лінії в межах базової довжини:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}. \quad (3.5)$$

Параметри S і S_m дають уяву про відстані між характерними точками перетину профілю із середньою лінією.

Відносна опорна довжина профілю t_p – відношення опорної довжини профілю, що дорівнює сумі довжин відрізків, які відсікаються на заданому рівні в матеріалі профілю лінією, еквівалентною середній лінії в межах базової довжини до базової довжини:

$$t_p = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{l}. \quad (3.6)$$

Параметр t_p характеризує форму нерівностей профілю, даючи уяву про розподіл висоти нерівностей по рівнях січення профілю.

Параметри S і S_m в комплексі з висотними параметрами R_a і R_z дозволяють визначити, крім висоти нерівностей, і їх нахил, що має значення для антифрикційних характеристик поверхонь, які труться.

Графічне зображення реального профілю за даними вимірювань шорсткості називають профілограмою шорсткості.

Субмікрогеометрія характеризує вид нерівностей, які є геометричним відображенням структури поверхневих шарів металу і його недосконалень. Субмікроскопічний рельєф розглядається на ділянках поверхні від одного і до кількох мікрометрів. Параметри субмікрорельєфу кількісно визначаються за допомогою електронної фрактографії, зокрема, такі параметри: відносна площа поверхні, покритої плівками вторинних структур, площа ділянок і ювінільних ділянок, товщина вторинних структур, висота субмікронерівностей на плівках і ювінільних ділянках.

Вихідна поверхня характеризується наявністю розвиненого субрельєфу, утвореного в процесі фінішної технологічної обробки шліфування.

При зношуванні, в режимі структурно-енергетичної пристосованості поверхні тертя, покриття плівками вторинних структур мають слабо виражений субмікрорельєф.

Субрельєф поверхонь тертя, покритих вторинними структурами її типу, зумовлений в основному наявністю вигладжених ділянок, покритих плівками і ділянок зі зруйнованою плівкою. Субмікросорсткість вигладжених ділянок незначна.

В міру припрацювання відбувається зростання значення субмікрорельєфу, при цьому роль вихідного мікрорельєфу зменшується.

Різка різниця в масштабі величин шорсткостей, які утворюються при структурно-енергетичній пристосованості, на відміну від шорсткостей при технологічній обробці і процесах пошкодження виявляється за допомогою аналізу топографії поверхні.

3.3. Геометрія поверхні як функція процесу механічної обробки деталей машин

Виникнення макрогеометричних відхилень відбувається в основному через неточності металорізального верстата, на якому проходить обробка, відхилень при встановленні заготовок, силових і температурних деформацій системи верстат–пристрій–деталь–інструмент (ВПД) і зношування інструменту в процесі обробки деталі.

Хвилястість поверхні утворюється в результаті нерівномірності подачі при точінні й шліфуванні, неплоскостності направляючих і вимушених коливань системи верстат–пристрій–інструмент–деталь, що виникають через нерівномірність сили різання, наявність неврівноважених мас і т.д. Серед інших причин копіювання хвилястості різального інструменту, спотворення форми шліфувального круга і нерівномірності зношування його, а також похибки при русі інструменту або виробу.

Утворення мікронерівностей поверхні (шорсткості) зумовлене взаємодією різального інструменту з заготовкою, що обробляється, процесом зняття стружки. На величину мікронерівностей при обробці різальним інструментом впливають такі фактори: режими різання – подача і швидкість; пружна і пластична деформації матеріалів; геометрична форма різального інструменту; жорсткість системи верстат–пристрій–інструмент–деталь і пов'язані з нею вібрації.

Але шорсткість обробленої поверхні зумовлена не тільки геометрією процесу різання, але й пластичними деформаціями матеріалу при цьому процесі, і вібрацією інструменту. Для ілюстрації викладеного розглянемо як приклад точіння пластичного матеріалу (сталь 45) з точки зору якості поверхні, яка при цьому формується.

При швидкості різання 1...2 м/хв вуглецевих конструкційних сталей утворюється стружка зколювання (елементна стружка). Вона легко відділяється при малому тепловиділенні і без суттєвої пластичної деформації поверхні, що обробляється. Мікронерівності незначні, а форма їх впадин близька до форми вершин різання. При збільшенні швидкості різання до 20...30 м/хв змінюється характер утворення стружки і шорсткість поверхні зростає, що супроводжується підвищенням температури в зоні різання і значним тиском (кілька тисяч гігаскалей), який викликає пластичну текучість як у металі, що відокремлюється, так і в заготовці вище і нижче лінії різання (рис. 3.4).

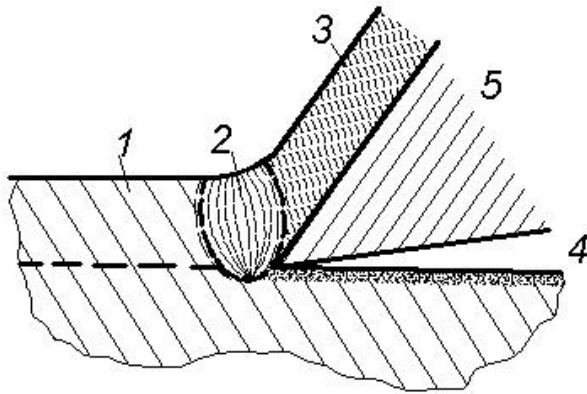


Рисунок 3.4. Утворення деформованого шару при різанні пластичного металу: 1 – основна структура металу; 2 – зона пластичної деформації; 3 – стружка; 4 – пластично деформований поверхневий шар; 5 – інструмент

Вершина наросту, виступаючи спереду леза інструменту, ріже метал, залишаючи глибокі борозни (рівчаки) на оброблюваній поверхні, а в борознах сліди досить нерівної кромки (рис. 3.5).

Час від часу вершина наросту обламується і відноситься частково стружкою, а частково втискується в оброблену поверхню, збільшуючи її шорсткість. Процес утворення наросту повторюється. Наріст має найбільшу висоту і стійкість при температурі, близькій до 200°C. У цій області конструкційні сталі мають найвищу границю міцності. Збільшення швидкості різання вище 20 м/хв призводить до збільшення теплоти, що виділяється в процесі стружкоутворення і до підвищення температури наросту. Міцність наросту зменшується, і він руйнується при меншій висоті. При швидкості різання більше 80 м/хв наріст не утворюється.

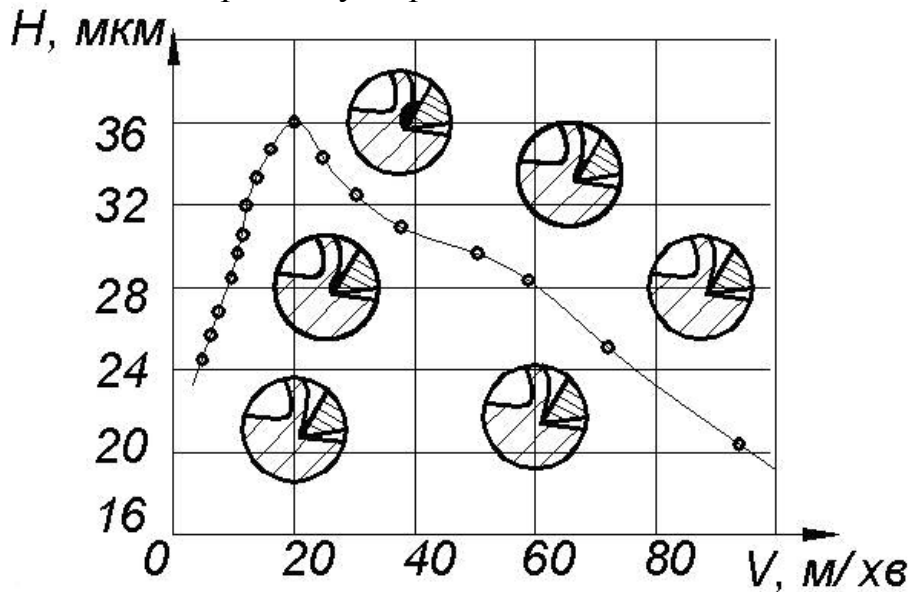


Рисунок 3.5. Висота нерівностей залежно від швидкості різання сталі 45

Відсутність наросту при різанні не означає, однак, що дійсний профіль обробленої поверхні, навіть за відсутності вібрацій, буде співпадати з теоретичним. Пластичні деформації матеріалу в зоні різання викликають додаткове збільшення висоти нерівностей. Окрім того, переміщення задньої грані інструмента по свіжоутвореній поверхні, яка ще не встигла покритися шаром окислів, супроводжується дрібними задирками, що відіграє суттєву роль в утворенні додаткових нерівностей.

Від вихідної шорсткості, яку ми отримуємо в результаті технологічної обробки деталі, значною мірою залежить шорсткість поверхні, яка утворюється під час тертя в результаті експлуатації цієї деталі.

Орієнтовні значення шорсткості поверхні, яку можна отримати в результаті того чи іншого виду механічної обробки матеріалу деталей, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Мікрогеометрія поверхні після різних видів механічної обробки

Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм	Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм
Точіння: обдирочне середнє чистове тонке	80-5 80-0,63 10-0,32 2,5-0,16	Шліфування кругами: чорнове чистове тонке	10-0,04 10-0,04 10-0,04
Розточування: обдирочне чистове тонке	80-0,63 80-0,63 2,5-0,08	Шліфування на шайбах: чорнове чистове тонке	— 5-1,25 —
Циліндричне фрезерування: обдирочне чистове	80-0,32 40-0,32	Шліфування абразивним склом: грубе чистове тонке	2,5-0,63 0,63-0,16 0,2-0,08
Торцеве фрезерування: обдирочне чистове викінчувальне швидкісне	80-1,25 40-1,25 80-0,32 2,5-0,08	Зубошліфування, хонінгування: грубе (попереднє) тонке (завершальне)	0,63-0,16 1,25-0,02 1,25-0,02
Стругання: чорнове чистове викінчувальне Свердління і зенкерування:	80-10 10-0,63 1,25-0,16 20-1,25	Мікрохонінгування, притирка: чистова тонка Полірування: чистове тонке "доведення"	0,32-0,04 0,08-0,02 1,25-0,025 1,25-0,025 1,25-0,025

Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм	Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм
Шевінгування: зубчатих коліс	0,63-0,16	Суперфінішування: чистове тонке	0,63-0,025 0,32-0,025
Зубодовбання: чорнове чистове	5-0,63 2,5-0,63	Обкатування роликками: Нарізання різьби різцем:	0,32-0,08 2,5-0,32
Шабрування різьби різцем: попереднє чистове тонке слюсарне опилення	1,0-1,25 2,5-0,16 0,32-0,08 20-0,63	ПРИМІТКА: Параметри шорсткості (один або кілька) вибирають за ГОСТом 2789-73	

3.4. Будова поверхневих шарів

В процесі технологічної обробки в поверхневих шарах деталей машин виникає дуже інтенсивна пластична деформація металу, локальні об'єми металу перебувають під впливом високих температур, фізико-хімічної дії робочих середовищ, змащувально-охолоджувальних рідин, кисню повітря.

При оцінці якості деформованої обробленої поверхні деталі розглядають дві зони: контактну (поверхневу) і підповерхневу (приповерхневу). Контактна зона безпосередньо прилягає до поверхні тертя і має глибину порядку кількох десятків або сотень тисячних мікрометрів. Ця зона характеризується специфічними механізмами пластичної деформації і орієнтованою ультрадисперсною будовою, яка зумовлює аномалію процесів адсорбції, дифузії, хімічних реакцій і руйнування. За цими прикметами контактну зону розглядають як тонкоплівковий об'єкт.

Критерієм тонкоплівкового стану служить критична товщина, нижче якої виникають аномалії властивостей, що розглядаються (механічних, хімічних, теплових, електричних, напівпровідникових, ультразвукових і т.д.), в порівнянні з "масивним" етапом. Специфіка напруженого стану і структури контактної зони є головним фактором, який зумовлює механізми структурно-енергетичної пристосовності матеріалів при терті.

Підповерхневі (приповерхневі) шари розташовані нижче контактної зони. Підповерхнева деформація може супроводжувати процеси нормального тертя, якщо деталі вузла тертя виготовлені з пластичних матеріалів, а напруження в спряженнях перевищує мікроскопічні границі текучості. Позитивний її вплив проявляється лише в деяких випадках, наприклад, у процесі припрацювання, коли за рахунок зношування поверхневих шарів дещо компенсуються відхилення від заданої макро- і мікрогеометрії, що дозволяє покращити прилягання спряжених деталей пари тертя. В умовах встановленого процесу

тертя вплив підповерхневої деформації різко відрізняється, бо вона є джерелом недопустимих процесів пошкодження робочих поверхонь деталей. Розвиток деформаційних процесів у підповерхневих шарах є найнебезпечнішим для деталей, виготовлених з матеріалів з низькою температурною рекристалізацією і, внаслідок цього, не схильних до зміцнення при деформації.

Структурні зміни на поверхнях контактування в підповерхневих шарах і в поверхневих зонах впливу оцінюють методами оптичної мікроскопії і зворотного рентгенівського знімання за методом Лауе.

Глибина поверхневого (контактного або граничного) шару і якість поверхні залежать від основного матеріалу, виду обробки, основних параметрів інструменту, режимів обробки і виду змащувально-охолоджувальної рідини.

Властивості поверхневих і при поверхневих шарів істотно відрізняються від об'ємних властивостей матеріалу. Відмінність поверхневих від і при поверхневих шарів ідеально твердого тіла від шарів, розташованих в основному об'ємі, зумовлено двома причинами: 1) несиметричністю сил, що діють на частинки, розміщені в при поверхневих; 2) некомпенсованістю зв'язків цих частинок.

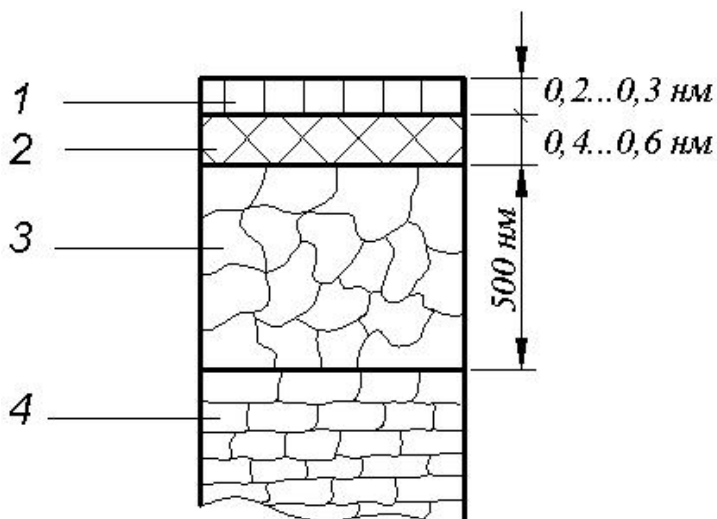


Рисунок 3.6. Структура поверхневого шару шліфованої деталі з вуглецевої сталі

Поверхневий шар неоднорідний за будовою (рис. 3.6). Він складається з адсорбованої плівки газів, вологи і змащувально-охолоджувальної рідини, яку можна усунути лише нагріванням деталі у вакуумі. Підповерхнева зона складається з кількох шарів.

Шар 2 сильно деформований, метал подрібнений, з викривленою кристалічною ґраткою кристалів. У ньому знаходяться оксиди і нітриди, порожнечі, надриви і тріщини.

Шар 3 складається з зерен сильно деформованих під дією тиску різального інструменту, в ньому містяться структурно вільний цементит, що утворюється під дією високих температур. Шар 4 – метал з вихідною структурою.

В умовах структурно-енергетичної пристосовності поверхневі шари характеризуються іншою структурою, ніж основний матеріал виробу. Перехід від вихідного стану поверхні до робочого завершується утворенням вторинних структур.

Вторинні структури першого типу мають ультрадисперсну структуру пересичених твердих розчинів окислювачів у металах і різко відрізняються від структури, складу і властивостей глибинних об'ємів металу.

Вторинні структури другого типу мають ультрадисперсну будову і являють собою хімічне з'єднання окислювачів з металами нестехеометричного складу.

Вторинні структури при граничному терті оцінюються за інтенсивністю зношування, величинами сил тертя, трибо-електрорушійної сили, що виникають при терті, вентельному ефекті й т. д.

У вторинних структурах, при їх відділенні від поверхонь тертя, проходять процеси розпаду ультрадисперсної структури. Тому склад продуктів зношування не завжди відображає дійсний склад плівок вторинних структур, які утворилися на поверхнях тертя.

3.5. Напруження в поверхневих шарах

Важливою характеристикою стану поверхневих шарів деталей машин є їх напружений стан, який є наслідком досить високих пластичних деформацій. Деформацією називається зміна розмірів і форми тіла під дією зовнішніх зусиль. Деформації поділяються на пружні та пластичні. Пружні деформації після закінчення дії прикладених сил зникають. Пластичні деформації залишаються після припинення дії прикладених сил. В основу пластичних деформацій залишаються після припинення дії прикладених сил. В основу пластичних деформацій покладено незворотні переміщення атомів металів від вихідних положень рівноваги.

Залишковими напруженнями називають напруження, що існують в тілі при відсутності зовнішньої силової дії на нього.

Залишкові напруження виникають в результаті, як технологічної обробки деталей машин, так і в процесі їх експлуатації: при зміні об'єму металу, внаслідок фазових і структурних перетворень у тонких поверхневих шарах, або в результаті теплових впливів, що спричиняють залишкову деформацію металу в локальних ділянках поверхневих шарів (рис. 3.7, табл. 3.2). Залишкові напруження утворюють рівноважну систему. Залежно від об'єму, який охоплюється цією системою, розрізняють залишкові напруження трьох родів.

Напруження першого роду – макронапруження, яке охоплює області співрозмірні з розмірами деталей, які мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі.

Напруження другого роду – мікронапруження, які розповсюджуються на окремі кристалічні зерна металу або на групу зерен.

Напруження третього роду – субмікроскопічні, які відносяться до спотворення атомної решітки кристала; орієнтація їх пов'язана зі структурою атомної ґрадки.

Напруження другого і третього роду неорієнтовані відносно осей деталі. Залишкові напруження визначаються механічними, рентгенівськими і електрофізичними методами. Для оптично прозорих матеріалів чи покриттів можна застосувати поляризаційно-оптичні методи фотопружності і фотопластичності.

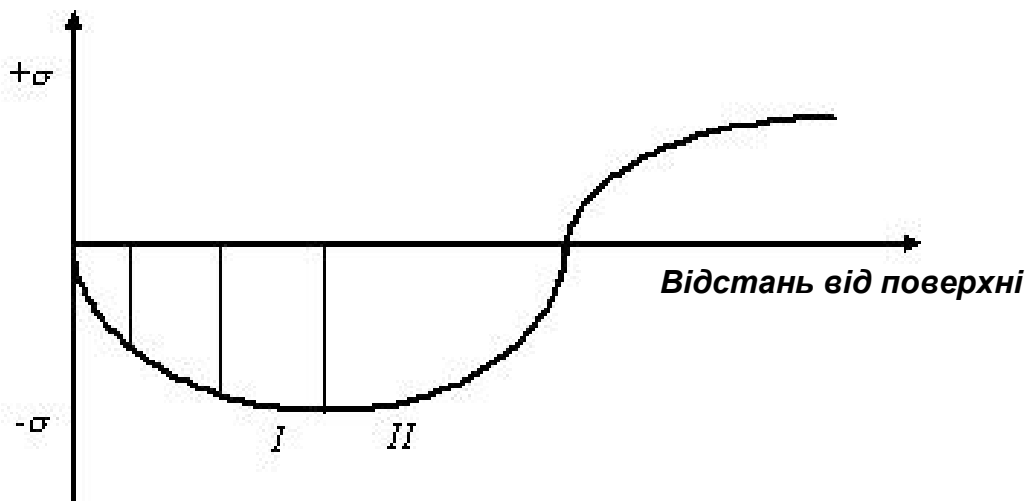


Рисунок 3.7. Зміна залишкових і робочих напружень у поверхневих шарах при зовнішньому терті: I – у процесі роботи; II – після зняття навантаження

Пластична деформація викликає зменшення щільності металу або збільшення його питомого об'єму. Пластично деформований при різанні шар не може вільно збільшуватися в об'ємі (цьому перешкоджає недеформований метал виробу), тому в зовнішньому шарі проявляються напруження стискування, а в решті об'єму – напруження розтягу.

У вузлах тертя поверхневий шар у результаті нагрівання розширюється і створюються тимчасові стискуючі напруження, які за певної температури викликають у поверхневих шарах пластичний стиск металу (рис. 3.8).

При терті металів і сплавів з метастабільною структурою виникнення напруження в поверхневих шарах може бути пов'язане не тільки з напруженнями теплового походження, але й з об'ємними (структурними) напруженнями, зумовленими фазовими перетвореннями.

Залежно від температури метал може бути в пружному і пластичному стані. В стані повзучості металу сили пружності не проявляються і деформація протікає без прагнення матеріалу до відновлення форми. За температуру t_p переходу з пружного стану в пластичний можна прийняти 450°C для вуглецевих сталей і 550°C – для легованих.

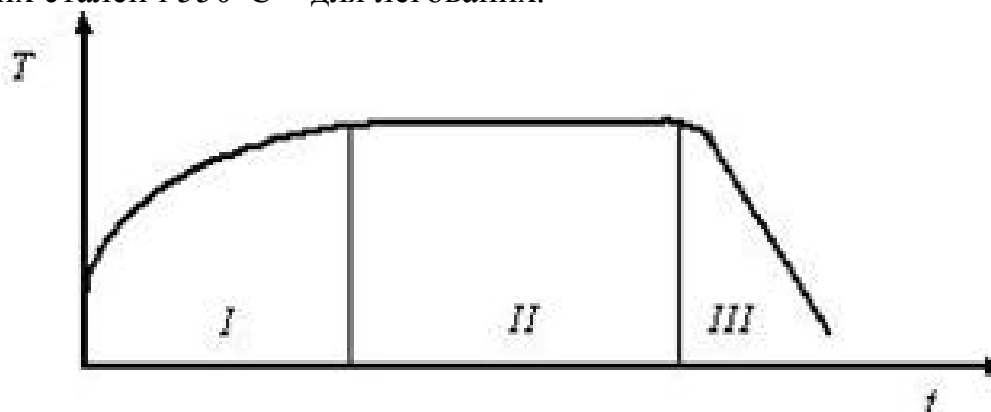


Рисунок 3.8. Зміна температури поверхневих шарів при зовнішньому терті: I – на початку роботи; II – при встановленому режимі; III – після зняття навантаження

Середня температура поверхневого шару сталі при шліфуванні складає 300...400°C, біля самої поверхні контакту – 800...850°C. Температури того ж порядку розвиваються при швидкісному точінні.

При обробці металу в його зовнішньому шарі під впливом пластичної деформації за відсутності повзучості розвиваються залишкові напруження стиску, а тепловий ефект від різання призводить до виникнення розтягуючих напружень. Так як обидва фактори діють сумісно, то знак залишкового навантаження в зовнішньому шарі залежить від того, який фактор є переважаючим. Зрозуміло, що коли температура на поверхні, яка обробляється, менша t_p , то температурні напруження є тимчасовими, після вирівнювання температури вони зникають.

Таблиця 3.2

Залишкові напруження в поверхневому шарі при механічній, термічній і термохімічній обробці деталей машин

Вид обробки	Оброблювальний матеріал	Залишкове напруження	Знак залиш. напруж.	Глибина розповсюд. залишков. напружень
1	2	3	4	5
Гартування	Вуглецева сталь	400-750	–	–
Обкатування поверхні роликми	Сталь	700-800	–	–
Азотування	Сталь Е 275	750-840	–	–
Азотування	Сталь 38ХМЮП	1200-1300	–	–
Хромування		400	–	–
Нікелювання		450	/–/	–
Покриття міддю		200	/–/	–
Кругле шліфування	Сталь 20	понад 180	/–/	0,25
Плоске шліфування	Маловуглец. сталь	350	/–/	0,35
–//–	Нержавіюча сталь	400	/–/	0,35
–//–	Сталь 45	160-180	/–/	–
Точіння	Сталь 20	880	–	–
Торцеве фрезерування	Сталь	1400-1500	–	–
Швидкісне різання з великими від'ємними кутами	Сталь 18ХНМА	900-1000	/+/	–

Вид обробки	Оброблювальний матеріал	Залишкове напруження	Знак залиш. напруж.	Глибина розповсюд. залишков. напружень
Торцеве фрезерування при швидкісному різанні 210 м/хв	Сталь 45	1000-1100	/-/	–
-/- при 610 м/хв	Сталь 45	500-600	/+/-	–
Зовнішнє кругове шліфування.	Сталь	400-1000	–	0,25-0,03
Точіння	Ст.загартована	300-400	/+/-	–
-/-	Сталь 40	400-600	/-/	0,006-0,15
Шліфування	Технічне залізо	400-1000	/+/-	0,005-0,08
-/-	Відпалена сталь	600-800	–	–
Точіння затупленим різцем	Сталь	1000	–	–
Швидкісне точіння	Сталь	–	–	–
Швидкісне точіння з переднім кінцем 30°	–	–	–	0,65
Точіння і фрезерування зі швидкісним різанням від 11-16 м/с до 210 м/с	–	–	/+/-	–
Торцеве фрезерування зі швидкісним різанням 490-610 м/с	–	–	/+/-	–

ПРИМІТКА: + – стискаючі напруження; – – розтягуючі напруження.

Пластична деформація металів зумовлює зміну мікроструктури. Безладно розташовані у вихідній структурі металу кристалічні зерна при пластичній деформації набувають однорідної орієнтації (температури). Більш глибокі зміни можливі при обробці металів методами зміцнюючої технології (наприклад, гартуванням). У результаті високого поверхневого нагріву, а також швидкого охолодження можливі фазові перетворення і структурні зміни.

3.6. Властивості поверхонь і поверхневих шарів у результаті технологічної обробки. Наклеп

При технологічній обробці поверхневі шари металу, що обробляються, різко змінюють свої властивості. У випадку холодної пластичної деформації металу підвищується його твердість. Це явище називають зміцненням металу, або наклепом. Оцінювання вихідних властивостей поверхневих шарів проводиться за допомогою вимірювання мікротвердості (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Види обробок і властивості поверхневих шарів (різання)

Вид обробки	Ступінь наклепу, поверхні Нм ·100% серцевина, Нм		Глибина наклепу, мкм	
	Середня	Найбільша	Середня	Найбільша
Точіння звичайне і швидкісне	120-150	200	30-50	200
Тонке точіння	140-180	220	20-60	-
Фрезерування торцеве	140-160	200	40-100	200
Фрезерування циліндричне	120-140	180	40-80	110
Свердління і зенкерування	160-170	-	180-200	250
Розгорткування	-	2	-	260
Протягування	150-200	-	20-75	-
Зубофрезерування і зубодовбання	160-200	-	120-150	-
Шевінгування зуба	-	-	до 100	-
Шліфування кругле: не гартована вуглецева сталь	140-160	200	30-60	-
маловуглецева сталь	125-130	-	20-40	-
гартована сталь	125-130	-	20-40	-
шліфування плоске притирка пастами	150	-	16-35	-
ГОІ	112-117	-	16-35	3-7

Застосування спеціальних методів обробки поверхонь деталей дозволяє змінювати їх фізико-хімічні і механічні властивості в потрібному напрямку (табл. 3.4).

При зміцненні поверхневих шарів деталей машин механічним наклепом зміна їх властивостей оцінюється ступенем пластичної деформації.

Таблиця 3.4

Значення твердості поверхневих шарів при різних технологічних методах зміцнення сталі

Методи зміцнення	Твердість Н
Поверхневий наклеп	300-390
Термічна обробка: гартування з відпуском	650-700
високочастотне гартування	740-760
гартування за допомогою опромінювання електронами	740-760
Хіміко-термічна обробка: цементування	570-780
азотування	1100-1200
термодифузійне хромування	1500-1600
борування	2200
ванадіювання	1800
ніобіювання	2000
Електролітичне покриття: хромування	900-1200
хромування і карбідизація	до 1800
нікелювання	600-1100
хімічне нікелювання	900-950
покриття марганцем	980-1100
фрикційно-дифузійне	1100-1300
електроіскрове	650

При хіміко-термічній обробці визначальний вплив на властивості поверхневих шарів чинить режим нагрівання й охолодження, а також дія спеціальних активних середовищ.

У випадку холодної пластичної деформації металу підвищується його твердість і границя міцності при одночасному зниженні відносного видовження і відносного поперечного звуження при розтягу.

Зміцнення поверхневого шару при обробці можна оцінити за зміною мікротвердості порівняно з вихідною. Мікротвердість падає в міру віддалення від поверхні деталі, причому, більш різко по товщині шару з роздрібненою структурою. Міцні й крихкі метали менш схильні до зміцнення, ніж маломіцні й пластичні. До того ж, температура при різанні високоміцних металів значно вища і сильніше відображається на факторі зменшення міцності. Наклеп металу під виступами нерівностей, як правило, більший, ніж під упадинами. Поверхневий шар залежно від вказаних вище обставин при точінні має товщину 0,25...2 мм, при шліфуванні – 12...75 мкм, при тонкому шліфуванні – 2...25 мкм, при поліруванні – 0,2 мкм.

Основними факторами, які викликають зміни поверхневих шарів деталей машин при експлуатації є пластичні деформації, які часто повторюються, температура, дії робочих газових і рідких середовищ зони контакту.

Оптимальна технологічна й експлуатаційна якості поверхні отримуються при виконанні таких умов:

Оптимальна технологічна якість поверхні:

- епюри напружень повинні забезпечити утворення нових поверхонь при максимальному руйнуванні й рівномірному зміцненні поверхневого шару;

- умови середовища повинні забезпечити зменшення поверхневої енергії, полегшення виходу дислокацій на поверхню, пластифікування й локалізацію деформацій у тонких поверхневих шарах;

- структурний стан поверхневого шару після обробки повинен характеризуватися однорідністю при мінімальній густині недоліків внутрішньої будови або їх нерівномірному розподілу.

Оптимальна експлуатаційна якість поверхні тертя:

- структурний стан повинен забезпечити утворення однорідного шару ультрадисперсної будови мінімальної товщини;

- поверхня повинна бути достатньо активована для протікання структурного пристосування, стійкість якого при терті зумовлюється динамічною рівновагою процесів утворення і руйнування вторинних структур, а також утворення граничного шару змазки;

- епюри напружень повинні відповідати максимально можливій деконцентрації зовнішнього навантаження поверхні металу, яка забезпечує рівномірність утворення текстур і руйнування плівок окислів.

Отримання оптимального експлуатаційного рельєфу і формування робочого стану поверхневого шару в цілому пов'язані з вихідним технологічним рельєфом і станом поверхневого шару.

3.7. Пластична деформація поверхневого шару

Невідповідність між реальною міцністю кристалу і теоретичною, розрахованою на основі оцінювання сил взаємодії між атомами кристалічної ґратки, давно встановлена. Ця невідповідність є наслідком наявності в реальних кристалах дефектів. Розрізняють точкові, лінійні, поверхневі і тривимірні дефекти кристалів.

Точкові дефекти – малі недосконалості в усіх напрямках – виникають внаслідок наявності в кристалі атомів домішок (рис. 3.9а) або утворення вакансій (рис. 3.9б), тобто порожніх місць у вузлах кристалічної решітки, не зайнятих атомами. Лінійними є недосконалості, малі у двох вимірах, відносно поширені в третьому напрямку. Поверхневі недосконалості є малими лише в одному напрямку і значними в двох інших вимірах (границі зерен, міжфазні границі, поверхні кристала). Тривимірні недосконалості – об'ємні пустоти, включення другої фази і т.д.

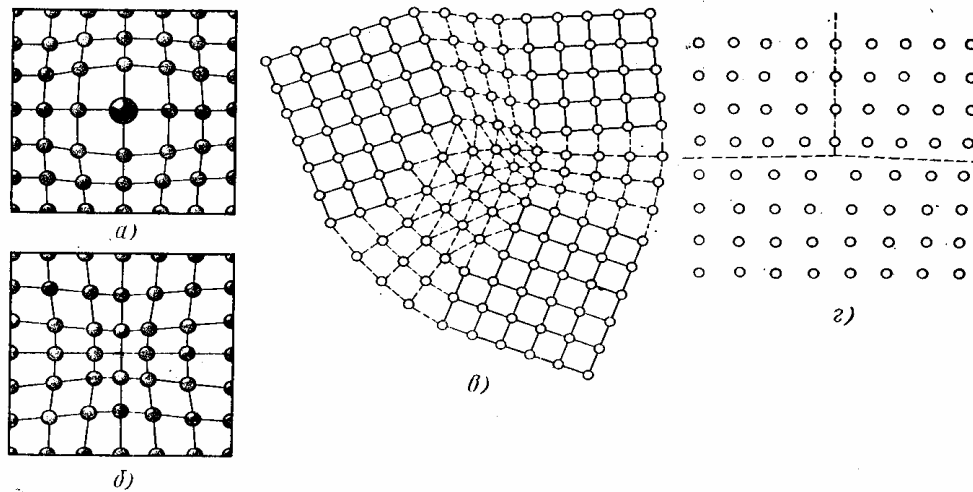


Рисунок 3.9. Дефекти кристалічної ґратки

Кристали металів зазвичай складаються з великої кількості областей розміром 1 мкм, розміщених під кутом десятої долі градуса.

Ці області з правильним розміщенням атомів називають блоками.

На границі між блоками упаковка атомів викривлена (рис.3.9в). До лінійних недосконалостей відносять дислокації (вклинювання) зайвих або недобудованих кристалічних площин (рис. 3.9г).

Ці недосконалості більшою мірою визначають механічні властивості кристала.

При теоретичних розрахунках міцності кристалів звичайно припускають, що всі атоми розміщені у відповідності з кристалічною структурою. При такій будові пластична деформація повинна бути розподілена по всьому об'єму кристалу, бо всі ділянки кристала однакові. В результаті можна було б припустити наявність одночасного ковзання паралельних площин (подібно зсуву карт у колоді). Всі атоми брали б участь у пластичній деформації, одночасно чинили б великий опір деформації.

Однак у реальних кристалах ковзання проходить по кристалографічних площинах, і пластична деформація зароджується на невеликих ділянках, поступово поширюючись по всій площині. В будь-який момент часу в ковзанні бере участь невелика кількість атомів кристалічної ґратки і, в результаті, ефективність використання сил міжатомних зв'язків виявляється дуже малою. На рис. 3.10 зображено зсув реального кристала. Перед початком ковзання кристал має правильну форму ґратки (рис. 3.10а).

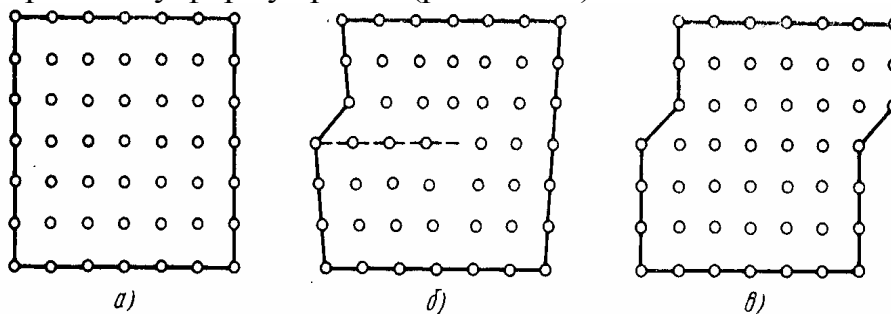


Рисунок 3.10. Схема пластичної деформації по механізму дислокації

Під дією напруги, прикладеної до однієї зі сторін кристала, утворюється зсув, при цьому в кристалі на границі виникає лінійне порушення розміщення атомів, яке Тейлор назвав дислокацією (рис.3.10б). Подальше поширення зсуву можна уявити як рух дислокації через весь кристал.

При виході дислокації на другу сторону кристала правильність будови кристалічної ґратки відновлюється, але одна половина кристала виявляється зсунутою відносно до другої на одну міжатомну відстань (рис. 3.10в). Відбувається елементарний зсув у кристалі, навколо дислокації створюється поле напруг. При пластичній деформації порушується правильність кристалічної ґратки і, внаслідок цього, подальше ковзання затруднюється. Починається ковзання по іншій площині і т.д.

Пластична деформація при різанні металів зумовлює зміну мікроструктури. Невпорядковано розміщені у вихідній структурі кристала кристалічні зерна при пластичній деформації набувають однорідної орієнтації (текстури). Більш глибокі зміни можливі при обробленні металів, що підлягають гартуванню. В результаті високого поверхневого нагріву, а також швидкого охолодження, можливі фазові перетворення і структурні зміни. У процесі шліфування гартованої і відпущеної сталі утворюється шар аустенітно-мартенситної структури із повторно гартованого металу.

Мікроскопічна неоднорідність фізико-механічних властивостей характерна для будь-якого твердого тіла. В металах вона зумовлена анізотропією кристалів. Оброблена поверхня у зв'язку з особливостями її утворення відрізняється незрівнянно більшою неоднорідністю як за хімічними, так і фізико-механічними властивостями. Крім того, вона має багато мікроскопічних дефектів у вигляді тріщин і пустот. Хоча подібні дефекти структури виникають у процесі утворення всієї маси металу, кількість їх у поверхневому шарі зростає в результаті механічної і теплової дії при обробці.

Дефекти структури можуть мати й атомний характер. Атоми кристалічної ґратки металу неперервно здійснюють безладні коливання навколо положення рівноваги з тим більшою амплітудою, чим вища температура. Для деяких атомів ця амплітуда може стати настільки значною, що атоми залишають свої місця в ґратці, порушивши тим самим кристалічний порядок. При будь-якій температурі завжди наявна деяка кількість атомів, що залишили своє стійке положення в ґратці, створивши в ній порожні місця. Ці "дірки" є дефектом будови твердого тіла, послаблюючи його міцність. Утворення дефектів у структурі може бути також викликано сторонніми домішками в металі.

Система дефектів, слабких місць поверхні деталі є основою, на якій, починаючи з найменших деформацій, розвиваються мікротріщини. Внаслідок наявності на поверхні дефектних місць природно очікувати, що руйнування при терті буде відбуватися саме в цих місцях, тобто процес зношування буде носити вибірковий характер. У міру зношування поверхні слабкі місця будуть виникати знову.

РОЗДІЛ 4

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ І КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ

4.1. Поверхнева енергія. Адгезія і когезія

Тверде тіло складається з атомів. Атоми складаються з нейтронів, протонів і електронів. Між частинками, з яких складається тверде тіло, тобто між атомами, молекулами, іонами, відбувається взаємодія, що викликають його структуру і властивості.

Для опису атомно-кристалічної будови користуються поняттям просторових або кристалічних ґраток. Кристалічні ґратки являють собою уявлювану просторову сітку, у вузлах якої розміщуються атоми (іони), що утворюють кристалічне тіло. Кристалічні тіла характеризуються упорядкованим розміщенням у просторі, а аморфні – хаотичним.

Поверхневий шар металу має велику активність. Це зумовлено тим, що всередині твердого тіла кожен атом кристала оточений іншими атомами і міцно пов'язаний з ними в усіх напрямках, а в атомів, які розміщені на поверхні, із зовнішнього боку немає "сусідів" у вигляді таких же атомів. Тому в поверхневому шарі атомів твердого тіла залишаються вільні зв'язки, наявність яких створює поблизу поверхні атомне (молекулярне) притягання. Щоб при такому несиметричному полі атом кристала був у рівновазі, розміщення атомів верхнього шару повинно бути іншим, ніж всередині кристала.

В кристалі, який розташований у рідині або який оточений яким-небудь твердим тілом, поверхневі атоми повинні перебудуватися, бо атоми або молекули зовнішнього середовища будуть взаємодіяти з поверхневим шаром кристала й зменшувати енергію зв'язку поверхневих атомів. Якщо кристал є у повітрі або в іншому газі, то силами притягання молекул газу до твердого тіла нехтують.

Поверхневі атоми внаслідок вільних зв'язків мають більшу енергію, ніж атоми всередині твердого тіла. Надлишок енергії, віднесений до одиниці поверхні, називають питомою поверхневою енергією, або просто поверхневою енергією. Повна енергія кристалу складається з внутрішньої і поверхневої енергії. Поверхнева енергія пропорційна поверхні розділу фаз, тому особливо зростає при диспергуванні твердих тіл. Вона багато в чому визначає властивості високодисперсних систем-колоїдів.

При дотиканні двох тіл поверхнева енергія зникає і може виділятися у вигляді теплоти або затрачатися на підпорядкування одного кристала іншому в кристалічній ґратці. Якщо поверхневу енергію даного кристала позначити U_n , а роботу руйнування на створення нової поверхні $2S \cdot U_s$, то $U_s = 2S \cdot U_n$, відповідно,

$$U_n = \frac{U_s}{2 \cdot S}. \quad (4.1)$$

Зобразимо контакти S між фазами 1 і 2 (рис. 4.1).

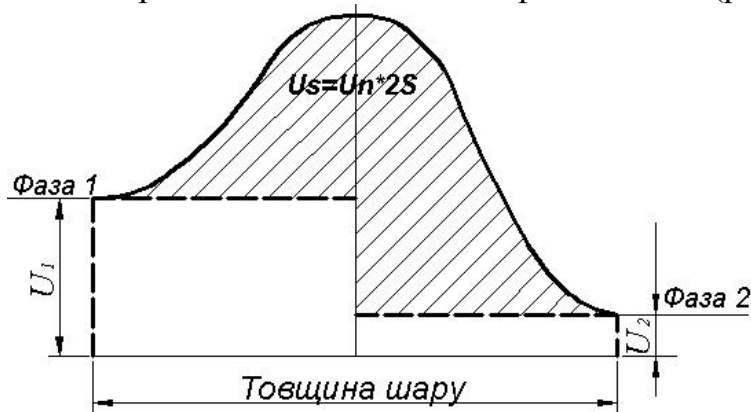


Рисунок 4.1. Згущення енергії в поверхневому шарі

При енергії U_1 і U_2 енергія всієї системи $U_1 + U_2 + U_n \cdot S$.

Тоді

$$U = \frac{(U - (U_1 + U_2))}{S} = \frac{U_s}{S}, \quad (4.2.)$$

де U_s – ущільнення енергії в поверхневому шарі, яка є результатом переважної дії активнішої фази.

Відзначимо, що різні грані кристалів мають різні U_n .

Зарядом атомів (іонів, молекул) з яких складається верхній шар тіл, що контактують між собою, створюється поле сил. Це поле експоненціально зменшується зі збільшенням відстані від поверхні і на відстані 1–2 нм від поверхні практично зникає.

Поверхнєве явище, яке полягає в зчепленні поверхонь, що контактують, у результаті взаємодії цих полів сил називаються **адгезією**.

Адгезія і когезія викликаються одними і тими ж силами, різниця полягає в напрямках їх дії. Якщо сили діють всередині тіла, то викликають когезію, якщо діють на поверхні – адгезію (рис. 4.2).

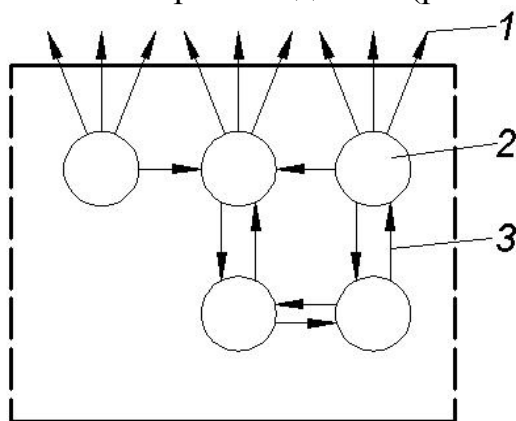


Рисунок 4.2. Сила адгезії (1) і когезії (3), елементи будови тіла (2) (атоми, молекули, іони)

Адгезійні явища мають велике значення в трибологічних дослідженнях, оскільки вони є джерелом значної частини опору тертя, особливо без мастильного середовища.

Згідно з Ф.П. Боуденом адгезія може бути ослаблена двома основними факторами: 1) наявністю оксидних або забруднених плівок; 2) впливом звільнених пружних напружень.

Сили адгезії тим більші, чим більший вплив електростатичних і електродинамічних сил у зоні контакту тіл. Це тісно пов'язано зі структурою тіл і, відповідно, їх поверхні. Чим більша реальна поверхня контакту (фактична площа контакту), тим міцніше адгезійне зчеплення.

Будь-який вплив, який призводить до відриву елементів тіла, зустрічає опір когезійних сил, а відривання або взаємне переміщення тіл, які стикаються (дотикаються) між собою, зустрічає опір адгезійних сил. При взаємному переміщенні тіл з ідеально гладкими поверхнями існував би тільки опір

адгезійних сил. Взаємне переміщення реальних шорстких поверхонь контакту зустрічає не тільки адгезійний опір, але й опір нерівностей обох поверхонь, який виникає в результаті пружних і пластичних деформацій, зрізування нерівностей, дряпання і т.д. Цей вплив врівноважується силами зчеплення при декогезії матеріалу. Таким чином, тертя є наслідком дії сил адгезії і когезії.

Коли тіла, які переміщаються одне відносно одного, стикаються своїми зовнішніми поверхнями, мова йде про зовнішнє тертя. В тому випадку, коли елементи структури тіла (атоми, молекули) переміщуються одне відносно одного, виникає внутрішнє тертя. Внутрішнє тертя має місце у рідинах, газах і твердих тілах.

4.2. Адсорбція і хемосорбція

При взаємодії поверхні твердого тіла з газовим або рідинним середовищем, молекули газової або рідинної фази приклеюються до поверхні твердого тіла плівкою. Це відбувається в результаті взаємодії ненасичених силових полів твердого тіла з силовими полями молекул газу або рідини, що дотикаються до поверхні твердого тіла. Поверхня останнього покривається плівкою речовини, що міститься в навколишньому середовищі газів, парів води, парів інших рідин, а також речовин, розчинених у рідинах і дотичних до поверхні твердого тіла. Явище приєднання молекул до поверхні міжмолекулярними (вандерваальсовими) силами називають фізичною адсорбцією, а хімічне з'єднання молекул з поверхнею – хемосорбцією.

Найбільшу здатність до адсорбції мають поверхнево-активні речовини, тобто речовини, молекули котрих орієнтуються перпендикулярно до поверхні (наприклад, органічні кислоти, спирти і смоли). Характерною особливістю поверхнево-активних речовин є неспівпадання центрів ваги позитивних і негативних зарядів у їх молекулах навіть в ізольованому стані, тобто в їх молекулах існують немов два протилежних просторово розділених заряди. Такі молекули називають полярними, і вони притягуються і утримуються поверхнею тіла (наприклад, шаром товщиною в одну молекулу).

Адсорбований шар поверхнево-активних речовин є мономолекулярним. Штучним шляхом можна утворити багатомолекулярну плівку, в якій кожен шар буде складатися з молекул з однаковою орієнтацією. Насичений адсорбований моношар утворюється щільно розміщеними молекулами, які орієнтовані паралельно одна до одної і перпендикулярно до поверхні тіла. До металу приєднуються активні кінці молекул першого ряду, до їх хвостів можуть приєднуватися хвости другого ряду, а до їх активних кінців – кінці молекул третього ряду і т.д. (кінець молекули, що приєднується до металу, подібний до маленького магніту, який називають полярним або активним. Іншу частину молекули складає так званий хвіст, наприклад, у спиртів – це гідроксид ОН, в інших речовин – група NH_2COCl та ін. Таким шляхом отримуються плівки товщиною у 1000 мономолекулярних шарів.

Взаємодію між молекулами в тангенціальному до поверхні напрямі називають поздовжньою когезією. Опір адсорбованої плівки протискуванню визначається силами поздовжньої когезії.

Молекули речовин, які адсорбовані на поверхні твердого тіла, мають здатність переміщуватися по поверхні з областей, де є їх надлишок, в місця, де їх недостатньо для повного покриття поверхні. Рухомість адсорбованих молекул залежить від виду адсорбції. При хімічній адсорбції (хемосорбції) полярні кінці молекул, зв'язуючись з поверхнею тіла, утворюють моношар, подібний до хімічної речовини. Рухомість молекул у результаті цього сильно обмежується.

Хемосорбція, на відміну від фізичної асорбції, має вибірковий характер і протікає з більшою ефективністю в місцях дефектів порушення регулярності кристалічної решітки (включеннями або "дірками"). В багатьох випадках фізична і хімічна адсорбція протікають одночасно, але одна з них є переважаючою.

Сили взаємодії між молекулами поверхнево-активних речовин і металічною підкладкою різні за природою і залежать як від природи речовин, так і від металу. Існування адсорбованого шару визначається також температурою.

Адсорбція молекул призводить до зменшення поверхневої енергії. В результаті цього, під час асорбції в навколишнє середовище виділяється деяка кількість енергії, яку називають енергією асорбції, тобто, асорбція – ізотермічний процес. Теплота фізичної адсорбції приблизно дорівнює конденсації адсорбата (як правило, менше 41,8 Дж/моль). Теплота хемосорбції може досягати 627 Дж/моль.

Інтенсивність процесу адсорбції оцінюється кількістю (об'ємом або масою) адсорбованої речовини. Процес адсорбції можна розглядати в часі, тобто визначається час, необхідний для адсорбції деякої кількості речовини.

Процес, зворотний адсорбції, тобто вивільнення адсорбованих молекул, називають десорбцією.

Тверде тіло, на якому адсорбуються молекули, називають адсорбентом. Речовина, адсорбована на адсорбенті – адсорбент.

Поверхнево-активне середовище впливає на процес деформації і руйнування твердих тіл, значно зменшуючи їх опірність деформуванню й руйнуванню в результаті фізичної адсорбції. Цей ефект встановив П.А. Ребіндер. Він названий його іменем – ефект Ребіндера або адсорбаційний ефект зменшення міцності.

Розрізняють зовнішній і внутрішній адсорбційні ефекти. Зовнішній адсорбційний ефект відбувається в результаті адсорбції поверхнево-активних речовин на зовнішній поверхні деформованого тіла, що викликає пластифікування поверхні і зниження границі текучості. При цьому, завдяки адсорбуванню шару поверхнево-активних речовин, зменшується поверхнева енергія твердого тіла, що призводить до полегшення виходу дислокацій.

Ефект Ребіндера можна продемонструвати на прикладі протискання сталеві кульки через циліндричний отвір у металічному зразку (рис. 4.3а), де надлишковий шар металу пластично деформується, утворюючи наплив перед кулькою. При протисканні кульки без змащувального матеріалу в зону деформації залучається значно більше металу, ніж у присутності активного середовища. Сили протискання при змащуванні парафіном у три рази менші, ніж у випадку відсутності змащувального матеріалу (рис. 4.3б).

Внутрішній адсорбційний ефект викликається адсорбцією поверхнево-активних речовин на внутрішніх поверхнях розділу – зародкових мікротріщинах руйнування, що виникають у процесі деформації твердого тіла. Цей ефект полягає в адсорбції атомів поверхнево-активних речовин на поверхнях мікротріщин при деформації руйнування.

Відмінною особливістю ефекту Ребіндера є те, що він проявляється тільки при сумісній дії середовища і певного напруженого стану.

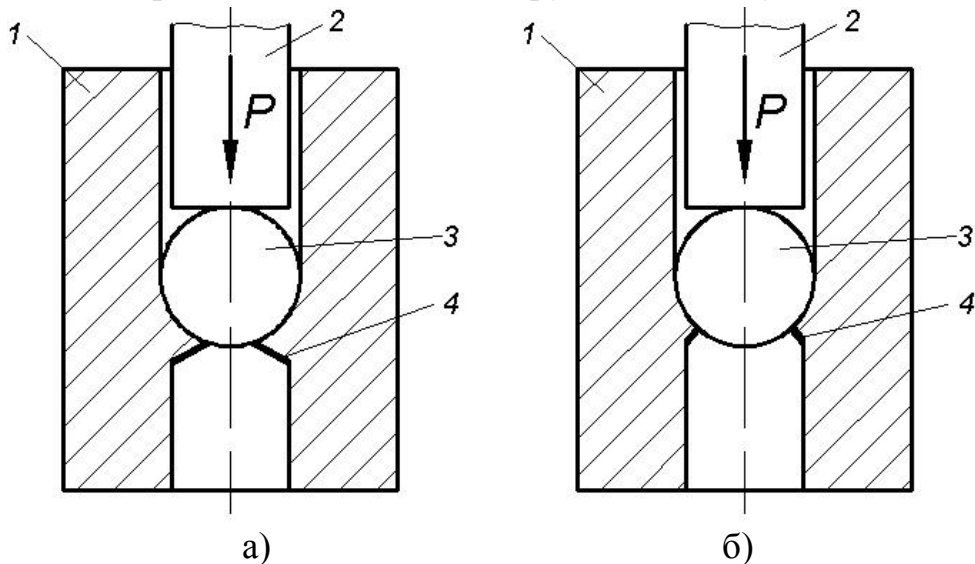


Рисунок 4.3. Наплив металу при протисканні металеві кульки без змащувального матеріалу (а) і з окисним парафіном (б): 1 – зразок, 2 – пуансон, 3 – кулька, 4 – наплив.

4.3. Взаємне контактування деталей

Поверхні твердих тіл завжди мають хвилястість і шорсткість, тому дійсний контакт при взаємному стикуванні деталей є дискретним, тобто відбувається в окремих зонах. При вивченні взаємодії поверхонь при зовнішньому терті розрізняють:

а) номінальну площу контакту (дотику) S_n – геометричне місце всіх можливих фактичних площадок контакту; вона обмежена розмірами і формою тіл, що стикуються;

б) контурну площу контакту (дотику) S_k , яка утворена деформацією локальних поверхневих об'ємів тіл; формування контурної площі зумовлене макронерівностями контактуючих поверхонь і навантаженням;

в) фактична площа контакту (дотику) S_f , яка являє собою суму малих площадок фізичного контакту тіл; фактична площа контакту є функцією геометричного обрису окремих нерівностей і навантаження, яке на нього припадає.

В роботах Б.І. Костецького і його співробітників показано, що формування фактичного (істинного) контакту суттєвим чином пов'язано з субмікрорельєфом (фізичним рельєфом), розвиток якого зумовлений внутрішньою будовою твердих тіл, його дефектами, деформаціями локальних поверхневих об'ємів металу і фізико-хімічною дією робочого середовища в зоні контакту. Схема контакту двох теоретичних поверхонь зображена на рисунку 4.4.

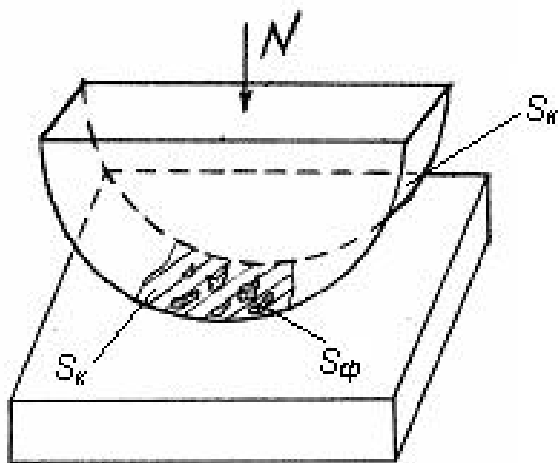


Рисунок 4.4. Три площі контакту (схема): S_n – номінальна; S_k – контурна; S_f – фактична

Контурні площадки легко визначаються при перевірці якості спряжень деталей за допомогою фарби – утворюється пляма дотику. Для плоских поверхонь, які не мають відхилень від площинності, контурна площа дорівнює номінальній.

Контурна площа контакту виникає в результаті деформаційних процесів, які зосереджені в поверхневих шарах тіл, що контактують, а тому суттєво залежить від навантаження і механічних властивостей. Контурна площа контакту є фіктивною і вводиться як проміжна ланка для переходу від номінальної площі контакту до фактичної.

Фактична площа контакту – це сума елементарних площадок контакту, що виникають у результаті деформацій окремих нерівностей.

Площа фактичного контакту залежить від мікро- і макрогеометрії поверхонь, хвилястості, фізико-механічних властивостей поверхневого шару і від навантаження. При великих навантаженнях її зростання супроводжується збільшенням розмірів площадок дотику. При знятті навантажень залежно від їх величини зникає 30...70% площадок контакту.

При всіх умовах зовнішнього тертя номінальна площа контакту завжди більша контурної, яка, як правило, більша площі фактичного контакту, тобто $S_n > S_k > S_f$.

Площа фактичного контакту навіть при дуже великих навантаженнях не перевищує 40% номінальної площі. У випадку контактування сталі по сталі при навантаженні 15 МПа, відношення площ складало 0,2 при шорсткості поверхонь $Ra = 2,5 \dots 1,25$ мкм і 0,35 при $Ra = 0,63 \dots 0,32$ мкм.

Ступінь дискретності контакту, тобто співвідношення S_f/S_n на початку роботи спряження, визначається, в основному, станом рельєфу, який утворився при викінчувальних операціях технологічної обробки поверхонь. Менший вплив здійснюють властивості матеріалів і особливості внутрішньої будови, причому, певне значення має і стан середовища в зоні тертя.

Дослідження контакту спряжених поверхонь відбувається експериментальними й аналітичними методами.

На практиці площа фактичного контакту при терті визначається за допомогою експериментальних методів. Серед найвідоміших методів площі фактичного контакту треба назвати такі.

Метод зміни електропровідності контакту. Його використовували Р. Хольм, Ф.П. Боуден, Д. Тейбор, І.В. Крагельський та інші дослідники.

Ідея дослідів Ф.П. Боудена і Д. Тейбора полягала в тому, що стискувалися два циліндри, які перетиналися і фіксували слід контакту, що утворився. Знаючи залежність величини сліду контакту від навантаження, автори встановили, що площа контакту пропорційна силі стискання в степені $\frac{1}{2}$, що співпадало з розрахунками за формулою Треска для чистого пластичного контактування. Звідси було зроблено висновок про провідну роль пластичної деформації. Вказаний метод визначення площі фактичного контакту дуже неточний і важкий у виконанні.

Метод заснований на перенесенні речовини з однієї поверхні на іншу. Згідно з цим методом одна з поверхонь покривається фарбою, а на другій, після контактування, спостерігається відбиток. Шар фарби повинен бути дуже тонким, щоб відбиток відповідав не контурній, а фактичній площі дотику, а також не спотворювати геометрію мікровиступів тіл, що контактують, і бути меншим їх середньої висоти. Візуально виявляти відбиток такого тонкого шару майже неможливо, тому використовують фарбу, яка має люмінесцентні речовини.

Метод вугільних плівок. Запропонували Н.Б. Демкін і А.А. Ланковий. На одній із деталей розпиленням в вакуумі наноситься вугільна плівка. Після нанесення плівки зразки контактують і під навантаженням підлягають незначному мікросузу, завдяки чому в місцях контакту крихка вугільна плівка руйнується. Після того, як зразки роз'єднуються, на фоні плівки чітко видно плями контакту.

Метод радіоактивних ізотопів. Розроблений в лабораторії якості поверхні Інституту машинознавства АН Росії. Одна з поверхонь, що контактують, покривається шаром радіоактивної речовини (розчин сірчанокислого натрію, який містить радіоактивний ізотоп S^{35} , і розчин хлористого цинку, який містить ізотоп Zn^{65}). При контакті активний ізотоп переноситься на неактивну поверхню, де за допомогою авторадіографії визначається розподіл ізотопу.

Оптичні методи. Засновані на тому, що одну або обидві поверхні, що контактують, виготовляють із прозорого матеріалу. До оптичних відносять відомий метод Мехау. Шорстку поверхню притискають до призми, на яку подається паралельний пучок променів світла під певним кутом (більшим від граничного). Відбувається повне внутрішнє відбиття світла, яке порушується в точках контакту. Як наслідок, у відбитому світлі точки контакту видно у вигляді темних плям на дзеркальному фоні. Метод придатний для вимірювання площі контакту шорсткої поверхні з гладкою як в статичному стані, так і при русі.

Є.М. Швецова запропонувала оптичний метод визначення площі контакту двох прозорих зразків. Через поверхню контакту двох тіл проходить перелельний пучок променів світла. В точках контакту світло проходить без заломлення, а в інших місцях воно розсіюється. Як наслідок, у точках контакту відбувається яскраве світіння плямами на сірому фоні. Метод придатний як для рухомих зразків, так і для нерухомих.

І. Дайзон і В. Хірст запропонували оптичний метод, за яким шорстка поверхня притискається до гладкої скляної пластини, що покрита срібною плівкою. В місцях контакту пластини разом зі срібною плівкою деформується, що спостерігається через пластинку в мікроскопі. За допомогою методу фазового контакту можна виявити найменші нерівності плівки і поміняти плями контакту.

4.4. Поняття про технологічний і експлуатаційний рельєф робочих поверхонь деталей

До цього моменту ми розглядали дотикання поверхонь, похибки яких зумовлені технологією обробки.

Схеми контакту поверхневих шарів після технологічної обробки і при експлуатації зображені на рис. 4.5 та 4.6.

Контактування поверхонь тіл під навантаженням, пов'язане з утворенням, унаслідок неоднорідності деформації, нового рельєфу поверхні (в першу чергу шорсткості).

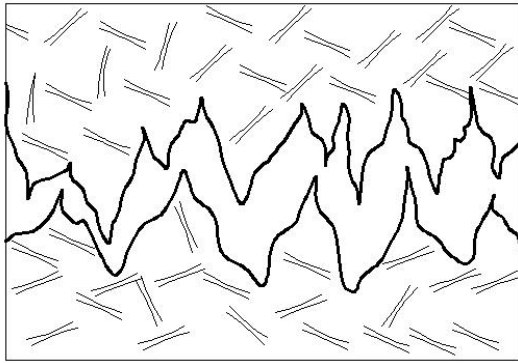


Рисунок 4.5. Схема контакту поверхонь (технологічний рельєф)

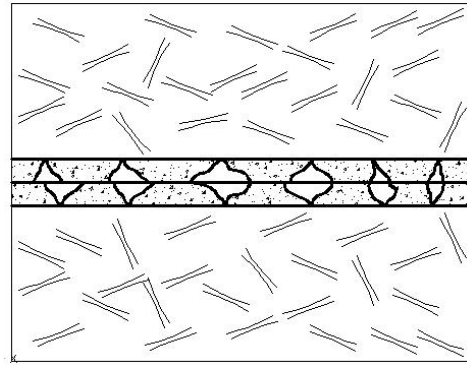


Рисунок 4.6. Схема контакту поверхонь (робочий рельєф)

Різниця цих двох випадків контактування проявляється як в геометрії контакту, так і в його фізичній природі.

Процес припрацювання, неминучий для зовнішнього тертя, викликає трансформацію всіх основних характеристик стану поверхні. Ця трансформація є причиною різниці при контактуванні.

Процес нормального тертя характеризується сталими (встановленими) значеннями основних триботехнічних, фізико-хімічних, геометричних та інших показників системи тертя. Коефіцієнт тертя f , інтенсивність зношування I , температура T і робота тертя $A_{тер}$, в умовах паралельного тертя, мають лінійні залежності від питомого тиску P . У цьому випадку контакт здійснюється як зображено на рис. 4.6.

За патологічних умов тертя (проорювання, руйнування містків зварювання і т.д.) усі характеристики контакту – триботехнічні (f , I , $A_{тер}$, T), геометричні, фізико-хімічні різко змінюються. Різниця в значеннях характеристик істотна не тільки при співставленні нормального тертя з патологічним, але й для різних форм пошкоджуваності.

Умовами нормального тертя і зносу у відповідності зі структурно-енергетичною теорією проф. Б.І.Костецького є:

1. Відсутність руйнування основного металу.
2. Локалізація пластичної деформації й руйнування в тонких поверхневих шарах вторинних структур, які утворюються при терті.
3. Динамічна рівновага механохімічних процесів утворення і руйнування вторинних структур, яка забезпечує встановлене протікання процесу.

За цих умов на контакті спряжених поверхонь виконуються такі закономірності:

– постійність величини площі $S_{плів}$, покритої захисними плівками,

$$\frac{S_{плівок}}{S_n} = const, \quad (4.3)$$

де S_n – номінальна площа контакту;

- процес руйнування і відновлення плівок автоматично регулюються;
- при порушенні динамічної рівноваги відбувається перехід від нормального тертя до недопустимих умов пошкоджуваності.

РОЗДІЛ 5

ТЕОРІЇ ТЕРТЯ

5.1. Класичні закони тертя

Леонардо да Вінчі (1452-1519) перший серед тих, хто розробив основні поняття тертя і чий праці дозволили французькому вченому Амонтону провести експерименти і сформулювати перші закони тертя. Кулон продовжив роботи Амонтона. Класичні закони тертя, які впливали із цих перших досліджень, можна сформулювати так:

- 1) сила тертя пропорційна навантаженню;
- 2) коефіцієнт тертя не залежить від уявної (номінальної) площі контакту;
- 3) статичний коефіцієнт тертя вищий кінетичного;
- 4) коефіцієнт тертя не залежить від швидкості ковзання;
- 5) коефіцієнт тертя залежить від матеріалу.

Класичні закони існували без значних змін донедавна. Однак у розвитку і досягнень науки і техніки більшість із цих законів виявилися неточними. Водночас класичні закони дають на диво повну уяву про механізм сухого тертя, особливо, якщо врахувати можливості перших дослідників.

Перший закон справедливий в усіх випадках, за винятком високих тисків, за яких фактична площа контакту по величині наближається до уявної. Зазвичай його записують у вигляді

$$F = f \cdot N, \quad (5.1)$$

де F – сила тертя;

f – коефіцієнт тертя;

N – нормальне навантаження (нормальна реакція).

Формулу прийнято називати законом Кулона і можна розглядати як визначення коефіцієнта тертя.

Решта класичних законів мають певні обмеження.

Другий закон є справедливим тільки для металічних матеріалів, які мають певну границю текучості, і не може бути використаний для пружних і в'язкопружних матеріалів.

Дія третього закону теж не розповсюджується на в'язкопружні матеріали. Фактично в наш час не існує однієї думки щодо того, чи може взагалі в'язкопружний матеріал мати коефіцієнт тертя спокою.

Четвертий закон не справедливий ні для одного матеріалу.

П'ятий закон стверджує, що коефіцієнт тертя залежить від матеріалу. Однак його можна розглядати як спостереження перших дослідників, а не як окремий закон.

5.2. Загальні теорії тертя

Нижче коротко описано деякі загальні теорії, запропоновані для пояснення природи сухого тертя.

Механічне зчеплення. В 1699 році Амонтон і де ля Гір припустили, що тертя металів можна пояснити зчепленням елементів шорстких поверхонь. Цей механізм пояснює існування тертя спокою, а також тертя руху як силу, необхідну для підйому нерівностей верхньої поверхні над нерівностями нижньої.

Молекулярне притягання. Томлінсон 1929 року і Харді 1936-го пояснили сили тертя дисипацією енергії при "вириванні" атомів одного тіла із зони притягання атомів поверхні другого тіла. Харді визначив адгезійне тертя як молекулярно-кінетичний процес руйнування зв'язків, в якому енергія витрачається на розтяг, розрив і релаксацію поверхневих і підповерхневих молекул.

В наш час механічна і молекулярна концепції зазнали значних змін: механічна – збагатилася уявою про закони пружно-пластичної деформації і руйнування, молекулярна – дослідженнями з фізики граничного шару і тонкої структури металу поверхонь, що труться.

З'явилася велика кількість так званих комбінованих теорій, основу яких складають механічна (деформаційна) уява і міркування про молекулярно-адгезійну взаємодію (розвинені в роботах І.В. Крагельського, Г.І. Єпіфанова, Г. Ернста, П. Мерченита та інших).

У роботах Б.В. Дерягіна і Є. Рабіновича висунуті теорії, в яких на першому плані стоїть атомно-молекулярна взаємодія поверхонь тертя, а механічна взаємодія враховується як результат роботи атомно-молекулярних зв'язків.

Однак велика різноманітність матеріалів, що застосовується, ускладнення умов механічного навантаження і фізико-хімічної дії середовища зробили можливим використання класичних понять про взаємодію на молекулярному рівні. Ця взаємодія стала затінитися активацією фізико-хімічних процесів, неминучих при навантаженні тертям, явищами фізичної і хімічної адсорбції, дифузії.

Природно, що при цьому і механічна взаємодія втратила своє переважаюче значення.

Електростатичні сили. Згідно з цією теорією явище стрибкоподібного руху при терті металічних поверхонь можна пояснити збудженням потоку електронів, які створюють накопичення зарядів протилежної полярності на поверхні розділення. Ці заряди утримують поверхні за рахунок електростатичного притягання.

Зварювання, зріз і проорювання. Цю теорію запропонував Ф.П. Бауден 1950 року. Високий тиск, що виникає на окремих плямах дотику, викликає місцеве зварювання і з'єднання, які таким чином утворюються, зрізуються при наступному відносному ковзанні поверхонь. При проорюванні матриці м'якшого металу нерівностями твердішого металу виникає деформаційна складова сили – тертя. Ця теорія дає задовільне фізичне пояснення тертя металів на макроскопічному рівні, водночас як у випадку еластомірів справедливою слід вважати теорії молекулярного притягання.

5.3. Структурно-енергетична теорія зовнішнього тертя

5.3.1 Основні положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя

В рамках уяви, яка існує з часів Ш.Кулона, тертя визначається як деяка взаємодія шорстких поверхонь. Більшість концепцій будуються на цьому визначенні. Водночас стало зрозуміло, що взаємодію поверхонь розглядають як фундаментальне явище.

Вирішення проблеми тертя, змащувальної дії і зношування на сучасному етапі розвитку виробництва неможливе без наукового підходу. Розроблення загальної, досить повної і несуперечної теорії тертя і зношування машин, що пов'язувала б параметри навантаження з усім комплексом механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалів і робочих середовищ при терті, стає однією із центральних проблем машинобудування.

Прискорений розвиток ідей теоретичної фізики про структури відкрили в останні десятиріччя великі можливості розроблення проблеми тертя, змащувальної дії і зношування з позицій термодинаміки і матеріалознавства.

Вчення про тертя і зношування виникло із потреби механіки і на початку розвивалося як розділ механіки. Це допускалося на ранніх етапах розвитку техніки (тихохідні машини, прості матеріали, сухе тертя). В подальшому загальний прогрес техніки, розширення й ускладнення умов тертя, розроблення і застосування нових матеріалів розкрили всю складність і багатогранність явищ тертя і зношування.

Встановлено, що поряд із механічними велике значення при терті мають фізичні, хімічні, механохімічні і теплові процеси. Виникла також необхідність спостерігати процеси тертя на всіх його стадіях: статичному контакті, початку руху, припрацюванні, стаціонарному режимі і при переході до пошкоджувальності. Стало зрозуміло, що сучасні завдання теорії тертя і зношування не можуть бути вирішені за допомогою моделей на основі таких спрощених видів взаємодії, як “механічна”, “молекулярна”, “адгезійна” і т.п., тим паче, що, не зважаючи на деяку різницю в їх назві, ці моделі залишаються за своєю суттю механічними.

При механічному підході, в якому силу тертя визначають тільки як опір деформування макронерівностей і переборення молекулярного притягання в точках дотику, проходить нехтування сучасною уявою про природу тертя. Отримані формальні вирази молекулярно-механічної теорії не є рівняннями руху поверхневого шару як суцільного середовища – в них відсутня швидкість.

Модель фрикційної втоми не містить важливих експериментальних результатів з трибохімічних і теплових явищ, фазових і структурних перетворень, інших факторів, що визначають дійсні механізми руйнування. Така модель не може бути основою вибору матеріалів для зносостійких пар тертя.

Українські вчені на чолі з професором Б.І.Костецьким уперше довели, що тертя є процесом перетворення зовнішньої механічної енергії в енергію

внутрішніх процесів, а закономірності цього перетворення визначаються структурним станом матеріалів системи тертя. Система тертя складається із упорядкованих певним чином і пов'язаних певним відношенням елементів, що відносяться до великого класу відкритих термодинамічних систем, тобто таких систем, які можуть обмінюватися із середовищем як енергією, так і речовиною.

В результаті великого комплексу систематичних досліджень із використанням сучасних методів експериментальної фізики професор Б.І. Костецький і його учні розробили основи структурно-енергетичної теорії тертя, змащення і зношування.

Різноманітність проявів тертя і зношування поділяють на дві чітко виражені ділянки – стаціонарний процес і процеси пошкоджуваності. Співвідношення різних видів взаємодії у стаціонарних процесах тертя мають певний характер, що дозволило встановити закономірності, виходячи із загальних законів руху, збереження енергії, мінімальних принципів тощо.

Підхід з позиції матеріалознавства до проблеми тертя зумовлений структурною чутливістю всіх параметрів тертя і зношування. Прикладом структурної чутливості кількісних показників тертя (сили і коефіцієнта тертя) є анізотропія коефіцієнта тертя і висока залежність його величини від структурного стану матеріалів у вузлах тертя.

Структурна чутливість показників зношування характеризується даними про питому роботу поверхневого руйнування при різних видах зношування (див. таблицю 5.1). Очевидно, що без притягнення структурних аспектів пояснити зміни величини питомої роботи руйнування на 5...6 порядків неможливо.

Таблиця 5.1.

Питома робота руйнування для різних видів зношування

Вид зношування і пошкодження	Питома робота зношування або пошкодження · 10¹⁰ Дж/м³
Нормальне механохімічне зношування	1 000 000 ... 10 000 000
Механохімічна форма абразивного зношування	10 000 ... 1000 000
Фреттінг-процес	1000 ... 10 000
Схоплення II роду	100 ... 1 000
Схоплення I роду	10 ... 100
Механічна форма абразивного зношування	1 ... 10

Одну із перших спроб енергетичного підходу до тертя зробив професор Б.І.Костецький ще в 1950 р. Енергетичний підхід пов'язаний з термодинамічною природою тертя. Тобто фундаментальні принципи трибології є у відповідності з першим і другим законами термодинаміки.

У відповідності з першим законом термодинаміки робота сил тертя $A_{тер}$ в основному перетворюється в теплоту Q і частково накопичується (поглинається) матеріалами трибосистеми (ТС) - ΔE : $A_T = Q + \Delta E$.

Насправді $A_T = Q + \Delta E_{вн} + \Delta E_n + E_\delta + E_c$, де $\Delta E_{вн}$ – зміна внутрішньої енергії; ΔE_n – приріст поверхневої енергії; E_δ – енергія зовнішнього розсіювання (дисипація); E_c – робота, затрачена на зсув і ковзання в граничному шарі; E_δ і ΔE_n – на практиці дуже малі.

Ця залежність і є основним положенням структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя, яку розробив Б.І. Костецький.

Дослідження енергетичного балансу тертя за допомогою прицезійного калориметрування дозволило встановити, що від умов тертя залежить не тільки загальна величина роботи тертя A_T , а й співвідношення між основними її складовими – кількістю енергії ΔE , що накопичується, і кількістю виділеного тепла Q . Це співвідношення характеризує працездатність трибосистеми, визначається властивостями матеріалів пари тертя M , значеннями нормального навантаження P , швидкістю відносного переміщення V , фізико-хімічними характеристиками змащувального середовища C , часом роботи пари тертя L :

$$\frac{\Delta E}{Q} = \varphi(M; P; V; C; L) \quad (5.2)$$

Основною складовою енергетичного балансу тертя є величина енергії, яка накопичується ΔE , що вносить вирішальний вклад у формування сил тертя, затрачається на утворення фаз і характер їх наступного руйнування. Аналіз закономірностей енергетичного балансу, суміщений з аналізом зміни структури, дозволяє зробити висновок, що всі процеси при терті є результатом двох основоположних явищ – активації (збільшення енергії матеріалів трибосистем) і пасивації (її зменшення).

У відповідності з другим законом термодинаміки ентропія (S) в закритих системах зростає. Однак у відкритих системах, за деяких умов взаємодії потоків енергії і речовини, проходять процеси упорядкування матерії, які відповідають зменшенню виробництва ентропії й утворенню самоорганізованих дисипативних структур (ДС). Утворення просторових і часових структур є загальною і фундаментальною властивістю матерії. Можливість утворення структур, що самоорганізуються в живій і неживій природі, обґрунтована теоретичною фізикою і має величезне значення в техніці.

Умови виникнення стійких, що самоорганізуються, дисипативних структур полягають у наступному:

1. Система термодинамічно відкрита, тобто вільно обмінюється енергією і речовиною з середовищем.

2. Динамічні рівняння системи нелінійні.
3. Відхилення від рівноваги перевищують критичні величини.
4. Мікроскопічні процеси проходять кооперативно (синергетично).

Умови самоорганізації й утворення дисипативних структур виконуються для будь-якої триботехнічної системи в певних для кожного типу трибосистем, умовах активації й пасивації.

Розглядаючи основне положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя

$$A_T = Q + \Delta E, \quad (5.3)$$

треба відзначити, що робота зовнішнього тертя ніколи повністю не переходить у теплову: $A_T \neq Q$, а енергія, що поглинається, ніколи не дорівнює нулю: $\Delta E \neq 0$.

Відношення ΔE до A_T величина непостійна і залежить від властивостей матеріалів трибосистеми й умов зовнішнього тертя:

$$\frac{\Delta E}{A_T} \neq const; \frac{\Delta E}{A_T} = \varphi(p, \vartheta, \vec{c}), \quad (5.4)$$

де p – тиск; ϑ – швидкість ковзання; \vec{c} – вектор параметрів тертя – властивостей матеріалів, середовища, температури і т.п.

Принципові схеми, що описують можливі енергетичні співвідношення для відповідних діапазонів зміни механічної дії – тиску і швидкості руху – зображено на рис. 5.1.

Розглянемо розвиток процесів тертя, зношування й поведінку основних складових енергетичного балансу, їх співвідношення у різних областях при зміні тиску (P). Ділянка I залежності f - p характеризує деяку перехідну область малих значень p , в якій ще немає умов для повної нормалізації процесу тертя. Значення питомого тиску ще недостатні для граничного зміщення й текстурування необхідних для умов пристосовності матеріалу. В перехідній області сили пов'язані з наближенням окремих ділянок поверхонь на відстанях порядку міжатомних, мають найбільшу питому вагу у формуванні сил тертя. Відношення основних складових енергетичного балансу тертя ΔE і A_T прямують до своїх мінімальних значень $\Delta E/A_T \rightarrow min$.

Ділянка II є загальною і найважливішою областю нормального зовнішнього тертя. Інтенсивність процесу трансформації і руйнування поверхонь контакту мінімальна. Такий режим тертя забезпечує протікання на межі розділу і в тонких поверхневих шарах суворо визначених певних механофізико-хімічних процесів. Пластична деформація набуває форму поверхневого текстурування. Відношення $\Delta E/A_T$ має постійне і мінімальне значення $\Delta E/A_T = min$.

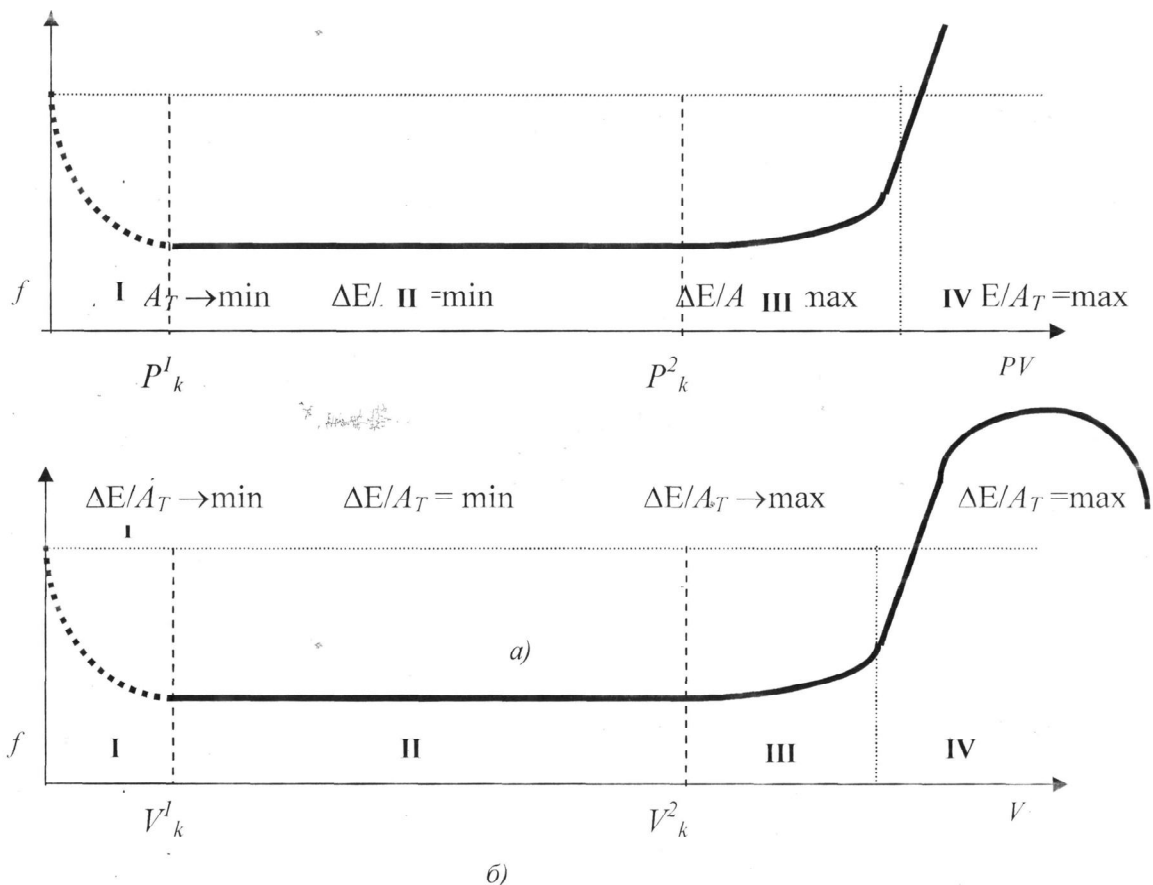


Рисунок 5.1. Енергетичні співвідношення для різних областей залежності коефіцієнта тертя від нормального тиску (а), P ; залежності коефіцієнта тертя від швидкості V (б): I – ділянки перехідної області малих значень P і V ; II – ділянки нормального зовнішнього тертя; III – ділянки порушення динамічної рівноваги; IV – ділянки розвитку патологічних процесів

Енергія поглинання ΔE затрачається на текстування й активізацію поверхневих шарів металу. Рівновага стану активізованих шарів досягається за рахунок їх насичення активною речовиною, що є в зоні тертя, і теплообміну. Основна частина роботи сил тертя в цій області перетворюється в теплоту: $A_T \cong Q$.

Для області характерні лінійні залежності коефіцієнта тертя від навантаження типу емпіричного закону Амонтона - Кулона. Відсутні суттєві зміни стану поверхневого шару, природи контакту і виду зв'язку (майже не спостерігаються).

Подальше підвищення тиску (ділянка III рис. 5.1а) викликає порушення стабільності кількісних характеристик процесу без суттєвих змін природи контакту і видів зв'язку. Деформація і пошкодження вторинних захисних структур проходять інтенсивніше, товщина текстуваного шару перевищує критичні значення, виникають процеси розпаду нестабільних структур сплавів і т.п. Залежність коефіцієнта тертя від нормального тиску відхиляється від лінійної. Співвідношення $\Delta E/A_T$ на цій ділянці непостійне і прагне до деякого максимального (критичного) значення для даних умов тертя: $\Delta E/A_T \rightarrow max$.

При подальшому підвищенні тиску величина ΔE досягає критичних значень, відбувається кількісна зміна процесу тертя, властивостей поверхневих шарів у зоні контакту і видів поверхневих зв'язків. Кінцевим результатом є виникнення патологічних режимів тертя і пошкодження поверхонь контакту. Можливі переходи до тужавіння, зминання, проорювання тощо (ділянка IV, рис. 5.1). Ці зміни, як правило, носять стрибкоподібний, різко виражений характер. Екстраполяція залежності коефіцієнта тертя від нормального тиску на ділянку IV не має змісту.

Внаслідок зміни фізичної природи контакту функція, що виражає залежність коефіцієнта тертя від параметрів зовнішнього навантаження, для різних патологічних процесів неоднозначна. Наприклад, при виникненні процесів тужавіння очевидний перехід зовнішнього тертя у внутрішній. Функція, що виражає закономірність зміни величин зовнішнього тертя, в цьому випадку, очевидно, має значний стрибок до нескінченності (зупинки руху). У випадку теплових процесів, що викликають фазові перетворення загартованих сталей або зміни кристалічної структури при терті деяких металів, слід чекати плавнішої зміни коефіцієнта тертя.

Співвідношення $\Delta E/A_T$ в області, яке розглядаємо, дорівнює деякому критичному значенню, що відповідає тому чи іншому патологічному процесу:

$$\Delta E/A_T = \max.$$

Розвиток процесів тертя відповідно до енергетичних співвідношень для випадку зміни швидкості ковзання відбувається аналогічно тому, як зображено на рис. 5.1б.

На першій (I) перехідній ділянці невстановлених процесів відношення $\Delta E/A_T$ не постійне, прагне до лінійно встановленого значення.

Ділянка II характеризується стабільними (постійними) і мінімальними значеннями співвідношення $\Delta E/A_T$. Ділянка III пов'язана з порушенням динамічної рівноваги утворення і руйнування вторинних захисних структур, відношення $\Delta E/A_T$ збільшується до деяких критичних значень. Ділянка IV ($\Delta E/A_T \rightarrow \max$) характеризує перехід до патологічних явищ, коли $\Delta E/A_T = \max$. Таким чином, при розгляді принципової залежності співвідношення енергії, що поглинається, до роботи зовнішнього тертя від параметрів навантаження можна виділити 4 області:

$$I - \Delta E/A_T \rightarrow \min; \quad II - \Delta E/A_T = \text{const}; \quad III - \Delta E/A_T \rightarrow \max; \quad IV - \Delta E/A_T = \max. \quad (2.5)$$

В четвертій області спостерігаються різкі стрибкоподібні зміни основних складових енергетичного балансу (A_T , Q , ΔE) і їх співвідношення.

Співвідношення $\Delta E/A_T$ повністю визначається процесами, що виникають при ковзаючому контакті, тобто видом взаємодії поверхонь і фрикційних зв'язків.

Таким чином, розглядаючи основні положення структурно-енергетичної теорії тертя професора Б.І. Костецького можна зробити основний висновок, що загальна закономірність процесу тертя і зношування полягають у тому, що для всіх матеріалів, відомих в техніці, існує діапазон навантажень і швидкостей, в

якому рівні значень тертя і зношування на кілька порядків нижче, аніж за межами цього діапазону. Цей діапазон може займати різне місце відносно осі навантаження або швидкостей залежно від співвідношення матеріалів і середовищ.

5.3.2. Самоорганізація при терті матеріалів

Фундаментальною фізичною основою загальної закономірності діапазону нормального тертя у відповідності зі структурно-енергетичною теорією тертя є відкрите професором Б.І. Костецьким у 1974 році універсальне явище структурної пристосованості матеріалів: утворення дисипативної структури, що має властивість мінімального виробництва ентропії.

При реалізації стану структурної пристосованості вся взаємодія твердих тіл тертя і середовища (механічні, хімічні, електричні тощо) локалізуються в тонкоплівковому об'єкті – вторинних структурах. Перебудова вихідної структури в нову фазу відбувається в напрямку максимального зміцнення, подрібнення, орієнтації в напрямку руху і насичення активними компонентами середовища. Вторинні структури екранують вихідний матеріал від механічної і фізико-механічної деструкції. Зовнішня механічна дія призводить до руйнування фази, яка екранує, але ця ж дія і процеси перенесення речовини із середовища забезпечують її регенерацію.

Основними ознаками явища структурної пристосованості матеріалів при терті, що відрізняють його від різного виду пошкоджуваності, є локалізація пластичної деформації та руйнування в тонких поверхневих шарах вторинних структур і відсутність будь-яких видів руйнування основного металу.

Вторинні структури являють собою тонкоплівковий об'єкт (товщина $BC-h = 2 \cdot 10 \dots 8 \cdot 10$ нм), який утворюється шляхом кінетичного фазового переходу (КФП), основою якого є сумісна дія деформації, нагрівання, дифузії і хімічних реакцій. За хімічним складом вторинні структури являють собою широку гаму з'єднань металу з активними компонентами середовища від перенасичених твердих розчинів до хімічних з'єднань нестехіометричного складу. Вторинні структури володіють аномалією фізичних, хімічних, механічних властивостей і не мають лінійних, поверхневих і об'ємних дефектів кристалічної будови.

Основним фактором, що визначає неминучість і механізми КФП, енергетику активації і кінетику утворення та руйнування ВС, є робота сил тертя A_T .

Спрощене уявлення про силу тертя F , як про функцію нормального навантаження, виявилось неспроможним як в теоретичному, так і в експериментальному плані.

Встановлено, що сила тертя F є не функцією нормального навантаження, а оператором процесів A_T , які виникають при тому чи іншому поєднанні значень нормального навантаження, швидкості ковзання і вектора параметрів тертя:

$$F(P) = A_T(P, \mathcal{V}, \mathcal{E}). \quad (5.6)$$

Сили тертя інтегрально відображають дії всіх факторів складного процесу тертя.

Таке уявлення про сили і роботу тертя відкриває можливості системного аналізу процесів трансформації матеріалів у зоні тертя, побудови конкретних положень і залежностей оптимізації показників тертя і зношування.

Визначаючим результатом роботи сил тертя є контактна пружно-пластична деформація, яка протікає в екстремальних умовах силового навантаження при синергетичній (кооперативній) дії дифузії, хімічних реакцій і нагріванні.

Складнонапружений стан поверхневих ультрамікроскопічних плівок зумовлений їх блокуванням підповерхневими і бічними об'ємами.

Силова взаємодія на ділянках фактичного контакту має форму багатократних короткочасних імпульсів. Розрахунки показують, що тиски на площадках фактичного контакту знаходяться в межах 100...1000 МПа, час контактування елементарних ділянок складає 0,000001...0,0001 с.

У відповідності з уявою механохімії пластична деформація призводить до утворення реакційно-активних ультрадисперсних структур.

На всіх етапах силового навантаження проходить взаємодія активованих тертям поверхневих шарів з активними компонентами середовища (адсорбція, дифузія, хімічні реакції).

В результаті синергетичної дії коефіцієнти дифузії при терті збільшуються на 5...10 порядків, хімічні реакції протікають фактично миттєво. Різко збільшується розчинність, виникають нестехіометричні хімічні сполуки.

Стає очевидним, що проблеми процесів структурної організації при терті відносяться до області "високих параметрів" стану речовини високих концентрацій енергії, великих швидкостей, високих тисків алотропних перетворень, аномальних агрегатних станів.

Виникають структурні і фазові стани, які відсутні в діаграмах рівноважних систем. Дослідження процесів вторинного структуроутворення, які виконані за допомогою електронної трансмісійної і растрової мікроскопії, рентгеноспектрального та ОЖЕспектрального аналізу, електронографії, рентгенографії і радіоактивних індикаторів, дозволили встановити, що традиційні механізми об'ємної пластичної деформації при терті металів в умовах СО трибосистем повністю виключаються. КФП призводить до нових механізмів пластичності, деформації та руйнування.

Професор Б.І. Костецький встановив існування двох типів вторинних структур і ряду їх проміжних станів.

Вторинні структури I типу являють собою пересичені аморфізовані тверді розчини кисню, сірки, фосфору та інших реагентів у металах, мають

бездислокаційну фрагментовану будову, володіють при їх утворенні аномальною пластичністю (ступінь деформації досягає дві тисячі процентів), а при виході із контакту затвердівають. Товщина ВС I типу h_{BCI} знаходиться в межах 2·10...4·10 нм, вміст реагента в межах 4...10% (для сплавів на основі заліза).

Дослідження вторинних структур (ВС) на просвітлення, суміщене з електронно-графічним аналізом, свідчить про знищення границь зерен, блоків, дислокацій, дефектів пакування, граничного подрібнення, фрагментування і орієнтації за напрямком тертя (мінімальний розмір кристалічних областей складає 2...5 нм).

Вторинні структури II типу являють собою хімічні сполуки нестехіометричного складу, як правило, з дефіцитом за реагуючим елементом. При особливо напружених умовах тертя (при різанні металів) спостерігаються нестехіометричні з'єднання з надлишком реагента. В результаті блокуючої і зміцнюючої дій нестехіометричних з'єднань хімічної фази, вторинні структури II типу мають аномально високу твердість, при терті проходить переважно пружна деформація. Товщина h_{BCII} знаходиться в межах 4·10 ... 8·10 нм, вміст реагентів у межах 10...28% (для сплавів на основі заліза).

На поверхнях тертя формується оптимальний мікрорельєф, який самовідновлюється і відповідає станам поверхневих шарів і процесам формування ВС I і II типів.

Механізм руйнування вторинних структур, форма, розміри і склад частинок зношування відповідають виявленим механізмам вторинного структуроутворення, міцності, пластичності й характеру деформації ВС.

Суттєво, що КФП до режиму структурної організації й утворення вторинних структур не є довільним, а керується мінімальними принципами. Всі взаємодії при терті в режимі СО локалізуються в тонких поверхневих плівках. Відбувається масштабний стрибок.

Мінімальний принцип можна записати так:

$$\int \frac{\Delta E(V)}{A_{тер}} dV \rightarrow \min . \quad (5.7)$$

Інтеграл поглиненої енергії ΔE , віднесений до роботи тертя $A_{тер}$ по об'єму V , що трансформується, прямує до мінімуму.

Наслідком цього принципу є умови:

$$V_{ef} \rightarrow \min ; \quad A_T/V_p \rightarrow \min ; \quad V_e/V_{ef} \rightarrow \max, \quad (5.8)$$

де V_{ef} – ефективний об'єм взаємодії; V_p – об'єм вторинних структур, що руйнується; V_e – об'єм матеріалу, що поглинув енергію E , близьку до граничної.

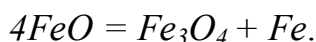
5.4. Забруднення поверхонь. Плівки на металічних поверхнях

Забруднення поверхонь тертя здійснює важливий вплив на коефіцієнт тертя. Основна частина забруднень поверхні складається з окисних шарів, які швидко утворюються на незахищених чистих металічних поверхнях.

Утворення окисних плівок на металічних поверхнях відбувається спонтанно, коли поверхня стикається з повітрям. Слідом за адсорбцією молекул кисню і водяної пари на поверхні чистого металу відбувається хімічна реакція. Кінетика росту плівки включає дифузію іонів металу через окисну плівку.

Практично всі метали окислюються. Металічні поверхні в процесі обробки дуже швидко покриваються первинною окисною плівкою. Внаслідок механічної обробки такі плівки виявляються і на благородних металах. Не дивлячись на малу товщину, плівка всього в кілька елементарних комірок кристалічної ґратки даної фази окислу за нормальної температури зупиняє подальше окислення.

Продуктами окислення можуть бути тверді розчини кисню в металі і їх хімічні з'єднання. В залізі при нормальній температурі розчиняється біля 0,05% кисню, а при 1000°C – 0,12% . Якщо окислення триває вище границі насичення, то з розчину випадають оксиди. Залізо з киснем утворює оксиди, що являють собою фази в системі O_2-Fe з різним типом кристалічної ґратки: в'юстит FeO , магнетит Fe_3O_4 і гематит Fe_2O_3 . В'юстит розчинний в залізі і стійкий при температурах вище 570°C, нижче цієї температури він розпадається на магнетит і чисте залізо.



Магнетит і гематит стійкі у діапазоні температур до точок плавлення. Плівка на залізі складається з шарів, розміщених від поверхні в середину в послідовності, що відповідає зменшенню кисню в оксиді. При температурі нижче 570°C плівка може складатись з одного шару Fe_3O_4 , зовнішнього шару Fe_2O_3 і наступного за ним шару Fe_3O_4 , або з шарів Fe_2O_3 , Fe_3O_4 і FeO , причому розпад FeO іде слідом за його утворенням.

Швидкість утворення оксидної плівки на поверхні металу вимірюється долями секунди. Для виникнення шару товщиною 1,4 нм достатньо 0,05 с. Зі збільшенням товщини ріст плівки сповільнюється.

Зовнішній шар поверхні складається також із забруднень, що потрапили на поверхню при обробці, і адсорбованих газів і парів. Товщина цієї плівки 0,1...2,5 нм. Розміщений під нею шар, що виникає під впливом атмосферного кисню, має на залізі товщину до 5 нм, на сталі до 2 нм, на алюмінію до 15 нм. Товщина граничного змащувального шару близько 20 нм.

При контактуванні двох чистих металів утворюються сильні зв'язки металу з металом. Фактично атоми однієї поверхні (у випадку однакових металів) зближуються з атомами другої на відстань, яку можна порівняти з міжатомними відстанями всередині металу. На цьому етапі пограничні атоми однаковою мірою взаємодіють із сусідніми атомами й атомами другого тіла. Відповідно, сили на поверхні подібні за величиною міжатомним силам в середині об'єму тіл, які спрягаються. На практиці існує певна невідповідність між кристалічними решітками, які стикаються, тому поверхня розділу зазвичай має недосконалість, які складають слабкі області. Ці області можуть змикатися внаслідок пластичного деформування або теплової дифузії, і в цьому випадку поверхня розподілу втрачає який-небудь фізичний зміст. Тоді адгезія відповідає міцності самого металу. Аналогічний механізм спостерігається і при стикуванні різнорідних металів, наприклад, індій і золото. Середня адгезія між різнорідними металами сильніша адгезії в середині об'єму слабшого металу (наприклад, індію), і, коли поверхні відриваються одна від одної, розділ проходить по слабкому металу, а не по початковій границі.

Відсутність сильної пограничної адгезії між металічними поверхнями можна пояснити двома причинами. Перша – наявність розлянутих вище забруднених поверхонь. Друга – відсутність пластичності контактуючих нерівностей, що призводить до їх механічного руйнування під дією дотичних напружень. Поверхневих плівок можна уникнути ретельною дегазацією у вакуумі, а втрату пластичності зміцнених з'єднань нерівностей можна компенсувати відповідним відпалом перед зняттям навантажень.

5.5. Особливості тертя в умовах вакууму

Створення нових космічних апаратів постійно потребує підвищення надійності та безвідмовності роботи вузлів тертя. Особливо це стосується пар тертя, що забезпечують роботу кулькових, роликів підшипників і підшипників ковзання, пристроїв для повороту антен і для відчинення чи зачинення ілюмінаторів, сонячних батарей, підвіски рухової установки космічних апаратів, штока газогенератора тощо. Нові проблеми з'явилися за створенням апаратів, що виконують посадку на інші планети і їхні супутники, переміщуються по них та ін. Неабияке значення має застосування вакууму в земних умовах (виплавка сталі, напилювання покриттів й інші технологічні процеси). У зв'язку з цим дослідження процесів тертя і зношування у вакуумі є актуальним і практика постійно вимагає розв'язання назрілих проблем.

Вище було показано, що поверхневі забруднення мають великий вплив на тертя металів. Встановлено, що тертя ковзання неможливе без наявності поверхневих плівок, оскільки інакше обидві поверхні миттєво зварювалися б одна з одною. Так як більшість поверхневих плівок складаються з окислів тієї

чи іншої форми, то експерименти з тертям часто проводяться у вакуумі, щоб виключити забруднюючий вплив повітря і зберегти чистоту відкритих металічних поверхонь.

Порівняння коефіцієнтів тертя на повітрі і у вакуумі для різних комбінацій металів наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Коефіцієнт тертя на повітрі і у вакуумі

Комбінація металів	Коефіцієнт тертя	
	На повітрі	У вакуумі (після усунення плівки)
Нікель-вольфрам	0,3	0,6
Нікель-нікель	0,6	4,6
Мідь-мідь	0,5	4,8
Золото-золото	0,6	4,5

Для повного усунення плівки застосовують нагрівання поверхонь в вакуумі порядку 0,0001 Па до різних високих температур залежно від матеріалів поверхонь.

Якщо замість повного видалення поверхневих плівок лише змінити їх товщину, то отримаємо цікавий результат: коефіцієнт тертя зменшується зі збільшенням товщини плівки (рис. 5.2).

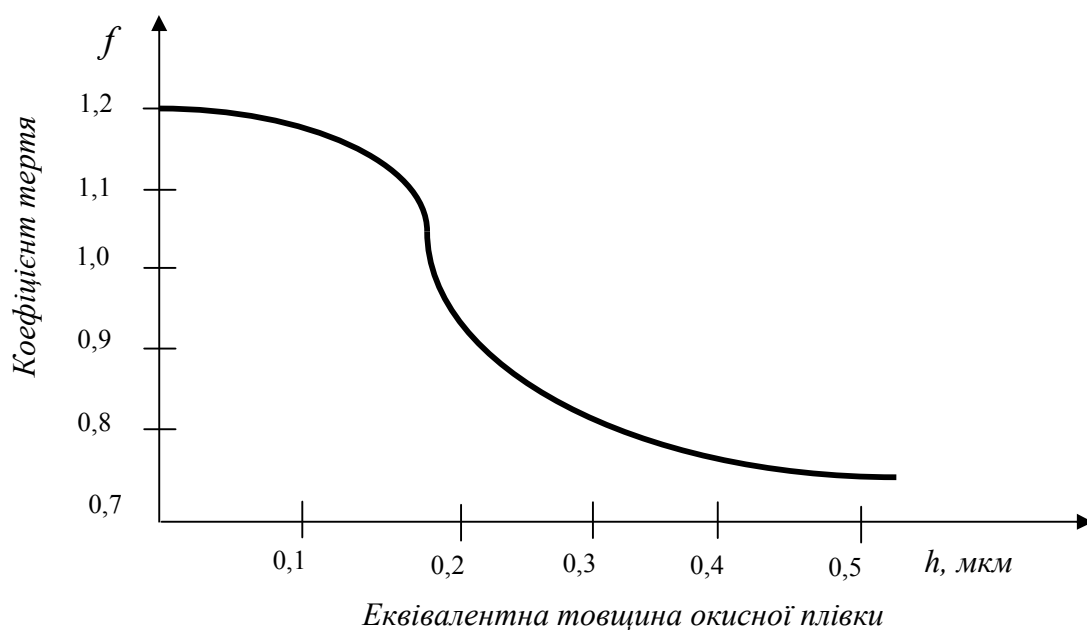


Рисунок 5.2. Співвідношення між коефіцієнтом тертя і товщиною тонких окисних плівок

Це пояснюється зменшенням сил молекулярного притягання між поверхнями. З іншого боку, окисні плівки мають більшу товщину, ніж представлені значеннями абсциси на рис. 5.2, мають явно виражену молекулярну структуру, яка може призвести до зниження або підвищення тертя зі збільшенням товщини плівки.

Вплив умов вакууму на коефіцієнт тертя ковзання металів має особливе відношення до космічних досліджень. Умови в космосі більш жорсткі, ніж можна відтворити при проведенні експерименту у вакуумі, бо крім відсутності повітря, яке сприяє утворенню забруднень у вигляді окисних плівок, в космосі прискорюється десорбція або випаровування існуючих плівок. Таким чином, відкриті поверхні в космічному просторі втрачають окисли і мастила, що створюють змащувальну дію, і холодне зварювання поверхонь тертя стає реально можливим.

5.6. Перенос металу при терті

Перенос металу з однієї поверхні пари ковзання на другу можна розглядати як частину нормального зношування.

Однак згідно з теорією зварювання–зрізу–проорювання, перенос складає також невід’ємну частку механізму тертя між металами.

В роботах Крагельського І.В. перенос металу пояснюється відокремленням частин м’якшої пари металів у результаті втоми з наступним прилипанням між поверхнями.

Перенос металу з однієї поверхні на другу може відбуватися на атомному і молекулярному рівнях. Експериментальні дослідження показали, що при ковзанні бронзи по сталі в змазці, яка складається із суміші спирту і гліцерину, стальна поверхня збагачується атомами міді, що дифузує з бронзи.

Важливе значення має перенос металу при механічній обробці, коли виникає контакт між металічними поверхнями інструменту і деталі. Дрібні продукти зношування інструменту переносяться на оброблювану поверхню. Ці частинки не бажані не тільки як домішки, але й значною мірою як джерела значної корозії. Прикладами також є перенос металу з молотка, викруток, різців, свердел і т.д. Перенос металу виключається застосуванням ефективного мастила, максимально можливим зниженням ковзання між інструментом і деталлю й підвищенням твердості інструменту.

5.7. Твердість металів

Однією з важливих властивостей металів, що протидіє тертю, зношуванню, ерозії або пластичній деформації, є твердість. Відомо ряд методів випробувань на твердість, і найбільшого розповсюдження набули значення твердості за Брінелем, Роквелом, Віккерсом, Шором і Моосом. Як правило, в поверхню металу втискується твердий індентор при відомому навантаженні і вимірюється розмір отриманого відбитка.

Індентор Віккерса являє собою квадратну піраміду з алмазу, з кутом між протилежними гранями 136° . Значення твердості за Віккерсом H_v визначається як відношення навантаження до пірамідальної площі відбитка.

У промисловій практиці для визначення твердості використовують прилад Роквела, яким за допомогою індентора визначають глибину відбитка при стандартному навантаженні. В цьому випадку використовують конічний

індентор з невеликим напівсферичним наконечником. Середній тиск p для конуса, який втискується в м'який матеріал, не залежить від навантаження. Окрім того,

$$P \cong \frac{1}{d^2}, t = \frac{d}{2} \cdot \operatorname{ctg} \theta, \quad (5.9)$$

де t – глибина відбитка індентора,

d – діаметр відбитка,

θ – половина кута при вершині конуса.

Виключаючи d з цих відношень, отримаємо

$$t \cong \frac{1}{\sqrt{P}}. \quad (5.10)$$

Тобто глибина впровадження буде меншою для твердіших матеріалів. Щоб знайти твердість за Роквелом H_R , віднімемо глибину відбитка t з постійного базового значення C , тобто

$$H_R = C - t = C - \frac{1}{\sqrt{P}}, \quad (5.11)$$

де K – постійна.

Замінюючи p значенням твердості за Віккерсом H_V , отримаємо співвідношення між H_R і H_V :

$$P_K = C - \frac{K}{\sqrt{H_V}}. \quad (5.12)$$

При визначенні твердості методом, який запропонував Брінель, застосовують твердий сферичний індентор. Звичайно для цієї мети використовують стандартні кульки від підшипника, які дешеві і мають точні розміри. Якщо сферичний індентор втискується в поверхню зміцненого металу, то тиск у провадження приблизно в три рази більший текучості металу (як у випадку індентора Віккерса), тому твердості за Брінелем і Віккерсом практично тотожні.

За методом Мооса замість упровадження індентора використовують дряпання, коли один мінерал дряпає інший, якщо твердість першого на 20% вища твердості другого. Моос запропонував шкалу, яка включає 10 мінералів від тальку до алмазу, кожен з яких дряпає попередній, але не дряпає наступний. Твердість за методом дряпання M пов'язана з твердістю за методом упровадження H співвідношенням виду

$$H = k \cdot 1,2^M. \quad (5.13)$$

Часто виявляється, що мікротвердість при малих навантаженнях має більш високі значення, ніж при великих навантаженнях. Це пояснюється тим, що поверхневі шари зразка є твердіші, ніж матеріал, який розміщений нижче. Таким чином, при малих навантаженнях фактично отримують результати, які близькі до істинної твердості поверхневого шару, в той час як при великих навантаженнях і глибшому впровадженню твердість близька до об'ємної твердості металу.

РОЗДІЛ 6 ТЕРТЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

6.1. Особливості тертя шаруватих матеріалів

Відомо, що тверді тіла, які мають пластинчасту або шарувату структуру, мають низький коефіцієнт тертя внаслідок явно виражених анізотропних властивостей. Основними матеріалами цієї групи є графіт, дисульфід молібдену, тальк, слюда, нітрид бору.

6.1.1. Особливості тертя графіту

Структура кристалічної ґратки графіту (рис. 6.1) утворена рядом паралельних площин або шарів, які знаходяться один від одного (найближчого) на відстані 0,34 нм. А в кожному шарі атоми вуглецю розміщуються у вершинах правильних шестикутників з довжиною сторони 0,14 нм. Так як сили взаємного притягання між атомами тим менші, чим більша відстань між ними, то зв'язки між атомами в шарах значно міцніші, ніж між шарами. Тому при великому опорі графіту тиск, направлений перпендикулярно шарам (площинам спаювання), а опір зрізу паралельно шарам, малий, і розщеплення завжди відбувається між шарами.

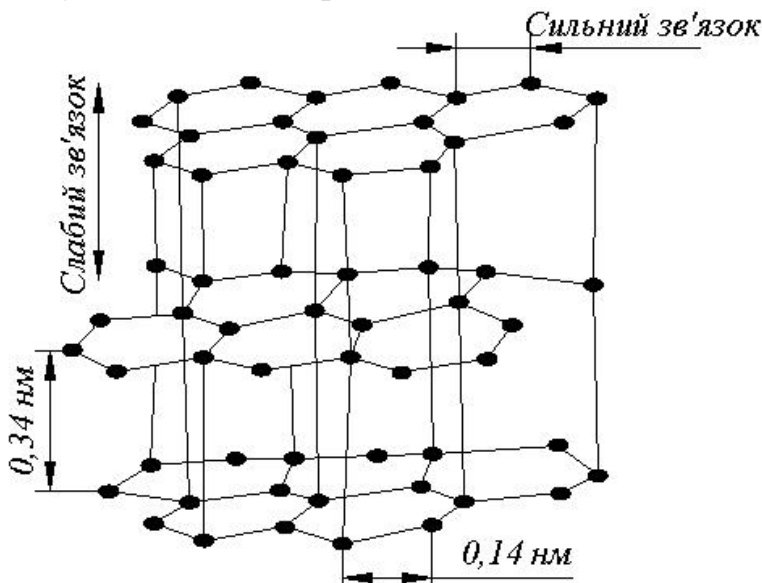


Рисунок 6.1. Будова кристалічної ґратки графіту

Коефіцієнт тертя сталі по графіту або графіту по сталі дорівнює приблизно 0,1.

Графіт є міцним на стиск (дає малу площу контакту) і слабким на зріз (забезпечує малу міцність на поверхні розділу), тому очевидно, що коефіцієнт тертя на повітрі має малі значення. Якщо з графіту шляхом нагрівання у вакуумі

усунути газ (провести дегазацію графіту) і виміряти після цього коефіцієнт тертя при кімнатній температурі, то його значення будуть у межах 0,5...0,6. Це супроводжується різким підвищенням зношування. Отриманий за рахунок дегазації високий коефіцієнт тертя зменшується з підвищенням температури поверхні (рис. 6.2).

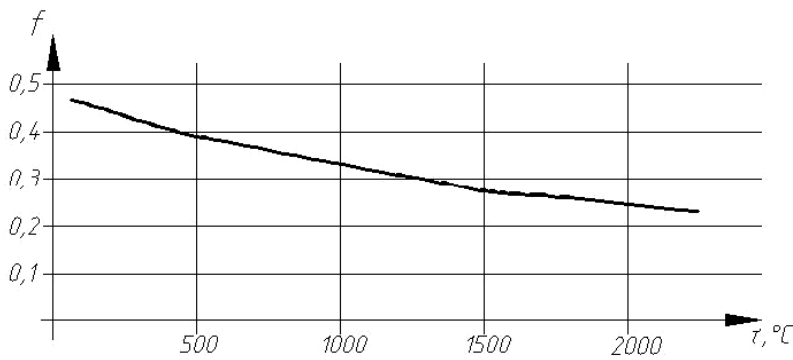


Рисунок 6.2. Залежність коефіцієнта тертя графіту від температури

Якщо отриманий таким чином чистий графіт буде покриватися поверхневими плівками кисню або водяної пари, то тертя і зношування повертаються до низьких значень. Для створення цього ефекту потрібна лише незначна кількість кисню і пари води, і вони покривають тільки краї кристалічної ґратки графіту.

6.1.2. Особливості тертя дисульфід молібдену

Дисульфід молібдену MoS_2 має шарувату молекулярну структуру, яка аналогічна структурі графіту. Окремі шари складаються або з чистого молібдену, або з чистої сірки. Сусідні шари сірки легко розщеплюються, так як міцність зв'язку між ними порівняно низька. Коефіцієнт тертя монокристалів дисульфиду молібдену на повітрі по сталі складає $\sim 0,1$. На відміну від графіту дисульфід молібдену має коефіцієнт тертя у вакуумі, який мало чим відрізняється від коефіцієнта тертя на повітрі, навіть при температурах до $800^\circ C$ (рис. 6.3). Підвищення температури вище $800^\circ C$ є недоцільним, оскільки в цих умовах дисульфід молібдену практично розкладається.

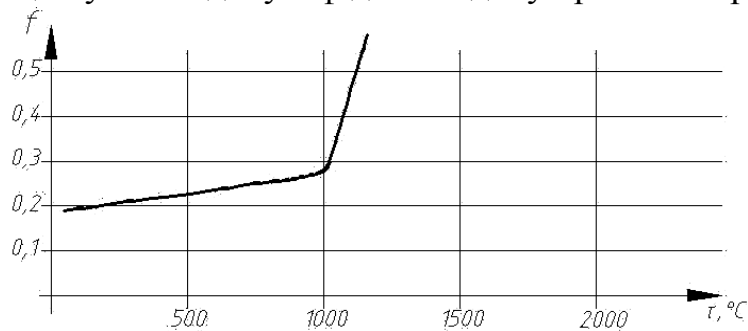


Рисунок 6.3. Залежність коефіцієнта тертя дисульфиду молібдену від температури у вакуумі

Низький коефіцієнт тертя дисульфиду молібдену у вакуумі дозволяє використовувати його в космічній техніці. При використанні MoS_2 не потрібно також газів і пари для збереження змащувальної дії.

Дисульфід молібдену використовується у вигляді по-

рошку, який додається до матеріалу-носія: пластичної суміші, яка складається з 40...70% MoS_2 у напіврідному середовищі, аерозольних дисперсійних бризків.

Другий спосіб використання – введення дисульфиду молібдену до складу деталей із металів, що спікаються. Щітки електродвигуна, виготовлені у складі MoS_2 – срібло, мають інтенсивність зносу на 2...3 порядки меншу, ніж графітові щітки. Наведена на рис. 6.4 діаграма дозволяє порівняти характеристики MoS_2 та інших присадок неполярного мінерального масла при малих швидкостях ковзання.

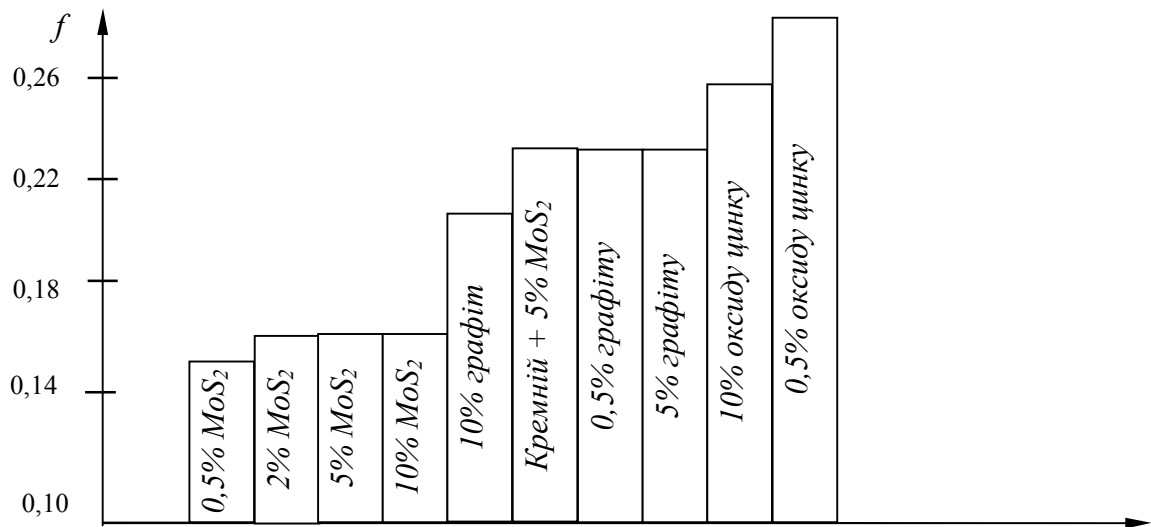


Рисунок 6.4. Порівняння коефіцієнта тертя дисульфіду молібдену та інших присадок до мінерального масла

З трьох твердих присадок MoS_2 , окису цинку і графіту, тільки дисульфід молібдену має здатність пригнічувати стрибкоподібний ріст при терті. Крім того, концентрація графіту вище 5% менш ефективна у зменшенні зносу, ніж концентрація 0,5% MoS_2 . Не дивно, що дисульфід молібдену є в наш час перспективним матеріалом для вузлів тертя і ковзання.

Дисульфід молібдену знаходить широке використання від ефективного змащування в завісах важких дверей до складних систем, які працюють у космосі. Коли перший космічний корабель з астронавтами на борту здійснив посадку на Місяці в 1969 році, фенольна смола з дисульфіду молібдену забезпечила надійність висування його регулюючих опор при температурі 157°C. Як тверде мастило дисульфід молібдену успішно використовується у двигунах внутрішнього згорання, які працюють без мастила, роликів ланцюгових приводах, пресах і вентиляторах маслопроводів. Характеристики MoS_2 перевищують характеристики графіту і фторопласту, і його, окрім традиційного використання (у вигляді порошку, пластичного мастила або дисперсії), можна наносити також плазмовим напиленням.

6.1.3. Особливості тертя слюди

Слюда являє собою широко відомий матеріал з надзвичайно явно вираженими властивостями розщеплення. Площину розщеплення можна розглядати як матрицю з окислу кремнію, в яку вкраплені поляризовані атоми калію. Якщо відбувається розщеплення, то на кожній поверхні залишається приблизно половина атомів калію, а з протилежного боку з'являється відповідне число від'ємних "дір" (рис. 6.5). Поверхнева енергія площини розщеплення слюди приблизно в 20 разів вища, ніж у графіту.



Рисунок 6.5. Схема площини розщеплення слюди

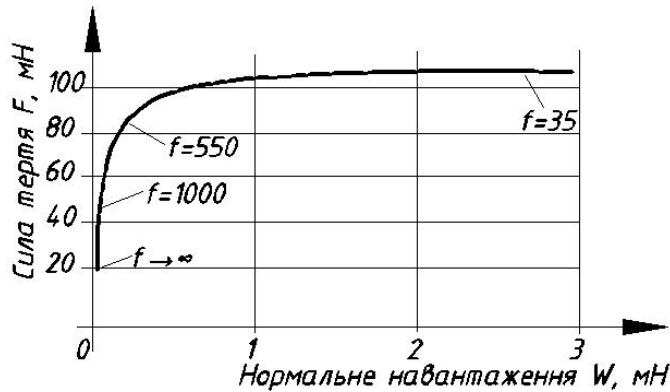


Рисунок 6.6. Залежність коефіцієнта тертя циліндричних поверхонь слюди, що перетинаються, від навантаження

Зі співвідношення між тертям і навантаженням для циліндричних поверхонь слюди бачимо, що закон Кулона-Амонтона не виконується. Процес ковзання є перервним і супроводжується відриванням невеликих "фрагментів" у вигляді лусочок від поверхні слюди (рис. 6.6). Це вказує на дуже сильну адгезію, яку можна зменшити добавкою тальку на поверхні ковзання. Це призводить до зниження коефіцієнта тертя f до значення 0,1.

6.1.4. Особливості тертя нітрид бору

Структура шаруватого нітриду бору на молекулярному рівні нагадує структуру графіту, однак природні шари мають два різних елементи. Площини розшарування графіту складаються з атомів вуглецю, а дисульфиду молібдену – тільки із сірки. У випадку нітриду бору вони мають бор і азот. Типові значення коефіцієнта тертя на повітрі складає 0,2-0,4.

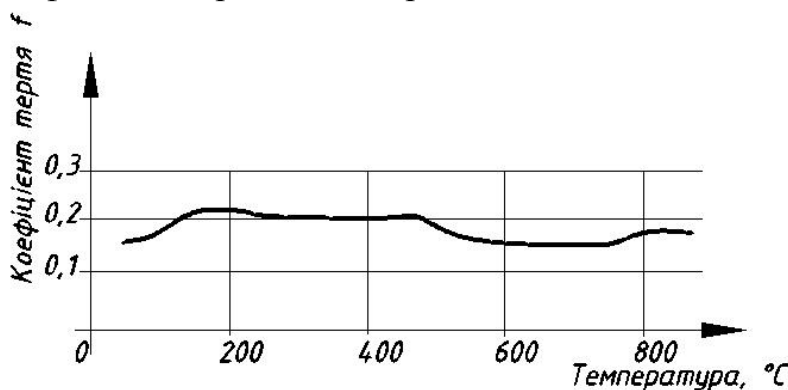


Рисунок 6.7. Залежність коефіцієнта тертя на повітрі від температури для поверхні пластини з нанесеними шарами нітриду бору і графіту

В умовах вакууму, зміна коефіцієнта тертя нітриду бору f від температури дуже близька до зміни цього коефіцієнта для дегазованого графіту (рис.6.7). Відомо, що графітні плівки забезпечують добре змащування на повітрі до 500°C, а нітрид бору – в інтервалі температур 500...900°C. Таким

чином, плівка суміші графіту і нітриду бору забезпечує ефективне змащування до 900°C.

6.2. Особливості тертя фторопласту

Фторопласт, або політетрафторетилен (ПТФЕ) відомий як порівняно твердий пластичний матеріал з незвичайно низьким коефіцієнтом тертя. В таблиці 6.1 наведено порівняння деяких фізико-механічних характеристик різних полімерів, включаючи фторопласт, і діапазон їх коефіцієнтів тертя. Крім того, в більшості випадків вказаний крайовий кут (який пов'язаний з поверхневою енергією та адгезією), який вимірюється шляхом нанесення краплі води на досліджувану поверхню (рис.6.8).

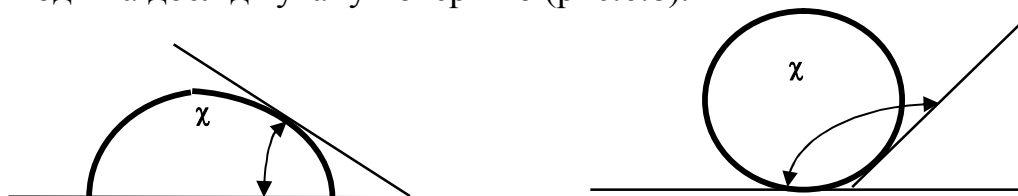


Рисунок 6.8. Крайовий кут

Таблиця 6.1

Властивості полімерів

Полімер	Звичайна назва	Об'ємна границя текучості p , МПа	Об'ємна міцність на зріз τ , МПа	Поверх-нева міцність на зріз s , МПа	Коефіцієнт тертя	Граничний кут, град.
Полівініл-хлорид	ПВХ	150	50	70	0,4-0,5	-
Полістирол	Полістирол	200	40	80	0,4-0,5	-
Поліетил-метакрилат	Оргскло	200	60	100	0,4-0,5	0
Нейлон 66	Нейлон	100	60	50	0,3	0
Поліетилен	Поліетилен	20	14	10	0,6-0,8	89
Політетрафторетилен	Фторопласт, тефлон, ПТФЕ	20	20	4	0,05-0,1	126

З таблиці бачимо, що ПТФЕ є унікальним матеріалом, який має особливо низький коефіцієнт тертя (0,05...0,1). Коефіцієнт тертя залишається низьким у всіх випадках, крім температур, близьких до температури 320°C. За низьких температур (-40°C) коефіцієнт тертя підвищується до 0,15.

Не зважаючи на досить мале тертя фторопласту до температури 300°C, він має чотири основних недоліки як матеріал для підшипників: недостатню механічну міцність, погану теплопровідність, високий коефіцієнт теплового розширення і зростання коефіцієнта тертя f до 0,3 при високих швидкостях.

Відповідно, якщо фторопласт використовувати безпосередньо як матеріал підшипника, то він буде нагріватися, розширюватися і заїдати. Тому ПТФЕ вводять у поверхню пористого матеріалу (наприклад, спеченої міді). Таким чином, отримують матеріал, який має об'ємно-механічні і теплові властивості міді, а на поверхні – фрикційні властивості фторопласту.

Для забезпечення довговічності і малого коефіцієнта тертя фторопласту рекомендується широко використовувати наповнювачі. Як наповнювач, як правило, використовують мідь, бронзу або скловолокно (15...20%). Додаючи дисульфід молібдену (5...15%) до армованого скловолокном фторопласту, отримують близький до оптимального за характеристиками тертя матеріал для підшипників сепараторів. Чистий фторопласт без домішок використовують у випадках, коли можна уникнути сильного фрикційного нагріву, наприклад, у направляючих машинах, простих механічних вузлах і т.п. При цих обмеженнях його характеристики близькі до характеристик дисульфиду молібдену. Однак, в умовах вакууму, ні один із відомих матеріалів не може за характеристиками зрівнятися з дисульфідом молібдену.

6.3. Тертя і зношування алмазу

Алмаз є найтвердішим із відомих матеріалів. Він проорює і дряпає інші тверді матеріали й кераміку і не піддається залишковій деформації. Елементарна комірка кристалічної ґратки алмазу утворена атомами вуглецю і має не більше ~ 0,1...1% домішок.

На рис. 6.9 наведено залежність коефіцієнта тертя алмазного щупа по косому січченню алмазу від нормального навантаження. Крива 2 характеризує тертя алмазу на повітрі, причому, можна відзначити чотири характерних особливості: малий коефіцієнт тертя ($f=0,05$); тертя практично однакове, якщо алмазні поверхні очищені й знежирені або покриті мінеральним маслом чи жирною кислотою; коефіцієнт тертя зростає при зменшенні навантаження; тертя залежить від навантаження.

Старанне очищення поверхонь алмазу можливе лише при нагріванні до 700°C у глибокому вакуумі. Крива 1 на рис. 6.9 показує, що після такого очищення спостерігається різке зростання коефіцієнта тертя.

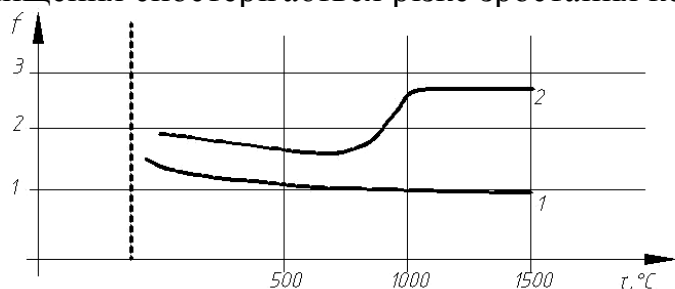


Рисунок 6.9. Тертя алмазу по металу після очищення у вакуумі: I – на повітрі (при кімнатній температурі); II – у вакуумі: 1 – алмаз–платина; 2 – алмаз–мідь

Як бачимо з рис. 6.9, коефіцієнт тертя алмазу по чистій платині у вакуумі дуже великий – 2...3 навіть при кімнатній температурі, для пар ковзання алмаз-метал – 0,4...0,6 при кімнатній температурі на повітрі і 1...3 – у вакуумі. Як наведено в таблиці 6.2,

коефіцієнт тертя алмазу більший для металів з вищими температурами плавлення.

Таблиця 6.2

Тертя і знос алмазу при ковзанні металів

Поверхня металу	Температура плавлення, °C	Знос алмазу, нг/км	Коефіцієнт тертя, (100-200 м/с)
Мідь	1083	1-2	0,05
Підшипникова сталь	1500	30-60	0,08
Хром	1615	200-500	0,10

РОЗДІЛ 7

ВИДИ ТЕРТЯ

7.1. Загальні аспекти. Класифікація видів тертя

Тертя виникає, коли два тіла, які переміщуються одне відносно одного, дотикаються своїми зовнішніми поверхнями (зовнішнє тертя), або коли елементи структури тіла (атоми, молекули) переміщуються одне відносно одного (внутрішнє тертя). Внутрішнє тертя може мати місце в рідинах, газах, твердих тілах.

Зовнішнє тертя завжди виникає при відносному русі тіл, що контактують і механічно взаємодіють. Основна характеристика сили тертя – реакція, яка перешкоджає взаємному переміщенню.

У природі спостерігаються різні види взаємодії тіл. Деякі з них, наприклад, тяжіння, електромагнетизм описуються фундаментальними законами фізики.

Тертя – результат різних видів складної взаємодії, за якої проходять механічні, фізико-хімічні, електричні та інші процеси. Їх співвідношення може бути різним залежно від характеру навантаження, властивостей матеріалів і середовищ.

Умови зовнішнього тертя різноманітні. Однак це не означає, що для визначення процесів тертя не можна отримати задовільні закономірності. В першу чергу, це стосується до таких умов, де співвідношення різних видів взаємодії має цілком визначений характер, що дозволяє встановити закономірності тертя, виходячи із загальних законів руху, збереження енергії, мінімальних принципів і т.д. Яскравим прикладом є процес тертя і зношування, типові для нормальної роботи машин.

Зовнішнє тертя в машинах, механізмах, приладах і установках – широко розповсюджене явище. Шкідливі прояви зовнішнього тертя проявляються у втратах потужності, зношуванні й пошкодженості поверхонь контакту. Корисне тертя використовується у фрикційних пристроях при передаванні руху, зусиль і роботі виконавчих органів машин.

Зовнішнє тертя є одним із основних процесів при технологічній обробці металів (різання, шліфування, тиском). Його також використовують, наприклад, при зварюванні металів (зварювання тертям, холодне зварювання зсувом).

Класифікацію основних видів тертя в машинах можна провести за ознаками, наведеними в таблиці 7.1.

За характером відносного руху розрізняють тертя ковзання і тертя кочення. Іноді обидва види тертя проявляються сумісно, коли кочення супроводжується просковзуванням, наприклад, у зубчастих або зубчасто-гвинтових передачах або між колесами і рейками.

Залежно від того, чи є відносне переміщення дотичних пар макро- або мікросміщенням, розрізняють силу тертя руху, неповну силу тертя спокою, найбільшу силу тертя спокою. Сила може виступати в узагальненому понятті й виступати як момент сил.

Сила тертя руху – сила опору при відносному переміщенні одного тіла по поверхні другого під дією зовнішньої сили, направленої тангенціально до загальної межі між цими тілами.

Найбільша сила тертя спокою – сила граничного опору відносно переміщення дотичних тіл без порушення зв'язку між ними за відсутності зміщення на контакт. Якщо прикладена до одного із тіл паралельно площині дотику сила перевищує хоча б на нескінченно малу величину силу тертя спокою, то порушується рівновага.

Неповна сила тертя спокою – сила опору, направлена протилежно до зусилля зсуву, за відсутності зміщення на контакт. Вона змінюється від нуля (за відсутності сил, що прагнуть порушити відносний спокій тіл у площині їх дотику) до найбільшого значення, коли вона переходить у силу тертя спокою.

Деформація тіл, в першу чергу нерівностей їх поверхонь, під дією зусилля зсуву і протилежної йому неповної сили тертя спокою викликає попереднє зміщення тіл, що передують їх відносному переміщенню. Попереднє зміщення мале за величиною і пропорційне прикладеній силі зсуву. Воно частково зворотне, тобто після зняття сили зсуву відбувається частково зворотнє зміщення. На ділянках фактичного контакту попереднє зміщення дорівнює нулю.

Залежно від наявності змащувального матеріалу розрізняють такі види тертя: тертя без змащувального матеріалу і тертя зі змащувальним матеріалом.

Таблиця 7.1

Класифікація видів тертя

Ознака класифікації	Вид тертя
Наявність відносного руху	Тертя спокою, тертя руху
Характер відносного руху	Тертя ковзання; тертя кочення; тертя кочення з ковзанням (просковзування)
Наявність змащувального матеріалу (мастила)	Тертя без змащувального матеріалу (сухе); тертя зі змащувальним матеріалом (рідинне, граничне)
Умова контактування з контртілом	У вузлах і з'єднаннях машин; при контактні виконавчих органів машин з робочим середовищем
Показники надійності і довговічності	Нормальні процеси тертя; патологічні процеси тертя
Область службового використання	Тертя антифрикційних з'єднань; тертя фрикційних пар

У загальному під тертям розуміють комплекс явищ у зоні контакту поверхонь двох тіл, які переміщуються одне відносно другого, в результаті чого в цій зоні виникають контактні сили. Тертя, як вказувалось вище, є наслідком сил когезії й адгезії.

Багаточисельність явищ тертя в машинах не вичерпується перерахованими видами.

Аналіз обширного матеріалу, отриманого в лабораторних умовах, і позитивного досвіду практики дозволяє виділити із усієї різновидності явищ тертя дві різко виражені області нормального і патологічного процесів тертя.

Залежність коефіцієнтів тертя від навантаження завжди містить таку ділянку, коли значення коефіцієнта тертя приблизно постійні (стабільні) і мінімальні в порівнянні зі значеннями коефіцієнтів тертя поза цією ділянкою. Назвемо цю ділянку стабільною.

Аналогічна ділянка зберігається і при залежності коефіцієнтів тертя від швидкості ковзання v . Таким чином, може бути виділена стабільна область залежності коефіцієнтів тертя від умов навантаження (тиску і швидкості ковзання).

За нормальної експлуатації машин, вузли тертя працюють виключно в стабільній області, хоча, як показує практика, ймовірність порушення нормальних умов тертя досить велика. У цих випадках спостерігаються переходи до аварійних процесів (схоплення I і II роду, мікрорізання, зминання і т.п.).

Стабільна область завжди пов'язана з певним видом трансформування та руйнування (зношування) поверхонь тертя. Цей вид трансформування визначається динамічною рівновагою і встановленням вторинних структур. У звичайних умовах експлуатації машин – це механічний процес окисного зношування.

В стабільній області умов має місце приблизна лінійна залежність між тангенціальною і нормальною реакцією. Коефіцієнт пропорційності в основному визначається механічними параметрами основного матеріалу: розсіювання (дисперсія) коефіцієнта пропорційності – значенням $\Delta E_{\text{вн}}$ енергії поглинання, що залежить від механохімічних характеристик поверхневих шарів і складу середовища. В цій області закономірно отримання емпіричних залежностей типу закону Амонтона-Кулона.

Існування стабільної області нормального тертя висуває одну з найважливіших і необхідних для практики завдань теоретичних і експериментальних досліджень. Це завдання полягає в розмежуванні умов нормального і патологічного тертя, що відповідає різним областям механічних впливів (P, V) при заданих параметрах тертя (характеристиках матеріалів, середовища); у встановленні нормального коефіцієнта тертя і його розсіювання в нормальній області; в керуванні процесами тертя і зношування за допомогою оптимального вибору характеристик матеріалів і середовищ з метою розширення діапазону механічних навантажень, за якої відбувається зношування вторинних структур і мінімізація сили тертя й швидкості зношування.

7.2. Тертя без змащувального матеріалу

Тертя без змащувального матеріалу за відсутності забруднень між поверхнями, що труться, спостерігається в гальмах, фрикційних передачах, вузлах машин текстильної, харчової, хімічної промисловостей, де змащувальний матеріал, щоб уникнути псування продукції або з міркувань безпеки недопустимий, а також у вузлах машин, які працюють в умовах високих температур, коли будь-який змащувальний матеріал не придатний.

Тертя згідно з однією з теорій, має молекулярно-механічну природу. На площадках фактичного контакту поверхонь діють сили молекулярного притягання, які проявляються на відстанях, які в десятки разів перевищують міжатомну відстань у кристалічних ґратках, і збільшуються з підвищенням температури. Молекулярні сили за наявності або відсутності проміжного в'язкого прошарку (вологи, забруднення, мастильного матеріалу і т.п.) викликають на тій чи іншій кількості ділянок адгезію. Вона можлива між металами і плівками окислів. Адгезія може бути зумовлена одночасно і дією електростатичних сил. Сили адгезії як молекулярні сили прямо пропорційні площі фактичного контакту. Прикладений тиск впливає на ці сили посередньо, через площу фактичного контакту.

Молекулярні сили як сили, перпендикулярні поверхні, здавалося б, не повинні виконувати роботу при відносному тангенціальному переміщенні поверхонь. Те саме стосується і сил адгезії, якщо зв'язок, що утворився між тілами, руйнується в місцях з'єднання. Насправді ж, відносно зміщення поверхонь за наявності взаємного притягання й адгезії супроводжується деформацією зсуву, що внаслідок неідеальної пружності матеріалу вимагає витрати енергії в необерненій формі. Зрозуміло, що потрібно прикласти більшу тангенціальну силу, якщо зв'язок між тілами порушується не в місці з'єднання, а на деякій глибині від поверхні.

Сильнішим проявом молекулярних сил є схоплювання поверхонь. Сили тертя у цьому випадку залежать від довжини зон схоплення й опору їх роз'єднанню.

Сила тертя F зумовлена механічною і молекулярною взаємодією:

$$F = a \cdot S_{\phi} + b \cdot P, \quad (7.1)$$

де a – середня інтенсивність молекулярної складової сили тертя; S_{ϕ} – фактична площа контакту; b – коефіцієнт, який характеризує механічну складову сили тертя; P – сила тиску.

Коефіцієнт тертя f – це відношення сили тертя до сили тиску. На основі формули (7.1) отримуємо

$$f = \frac{a \cdot S_{\phi}}{b \cdot P} + b. \quad (7.2)$$

Двочленні вирази видів (7.1) і (7.2) для сил тертя і коефіцієнта тертя дійсні для тертя зі змащувальним матеріалом і без нього.

Багато дослідників (Хольм, Стренг, Л'юїс та ін.) вважають, що складова

сили тертя, зумовлена пластичною деформацією (механічною взаємодією) поверхонь, інколи надто незначна (усього кілька процентів від сумарної сили тертя). Тертя металічних поверхонь у вакуумі супроводжується великим коефіцієнтом тертя (більше одиниці). Якщо ж у вакуумну камеру подати повітря, то за дуже короткий проміжок часу коефіцієнт тертя зменшується в кілька разів. За цей час кисень не в стані утворити плівку окислу, щоб загладити найменші нерівності поверхні тертя або перешкодити їх взаємному проникненню.

На основі цього можна зробити висновок, що молекулярна складова сили тертя є причиною високого значення останньої у вакуумі. Зауважимо, що при терті кочення молекулярна складова порівняно мало впливає на тертя.

Статична сила тертя залежно від тривалості нерухомого контакту збільшується до деякої границі. Сила тертя при русі залежить від швидкості ковзання поверхні, причому, залежно від тиску, твердості спряжених тіл, коефіцієнт тертя може монотонно збільшуватися, зменшуватися, переходити через максимум або мінімум.

Тертя без мастила супроводжується стрибкоподібним ковзанням поверхонь, з чим пов'язані, наприклад, вібрація автомобіля при вмиканні зчеплення, “шарпання” при гальмуванні, “виск” гальмів, вібрація різців при різанні й порушення роботи деталей, які рухаються з малою швидкістю. Серед способів боротьби зі “стрибками” при терті можна назвати: збільшення жорсткості технічної системи, підвищення швидкості ковзання, підбір матеріалів пар тертя, для яких коефіцієнт тертя незначно зростає з тривалістю нерухомого контакту і при збільшенні швидкості через мінімум не проходить.

Плівки окислів, волога і забруднення на металічних поверхнях впливають на коефіцієнт тертя з двох причин. Сили молекулярного притягання між ними можуть бути в сотню разів менші, ніж у випадку взаємодії металу на чистому контакті. Крім того, міцність окислів взагалі менша міцності основного металу, тому опір “проорюванню” і зрізуванню частинок при переміщенні, поряд з силами молекулярної взаємодії, значно зменшуються і коефіцієнт тертя падає. Товсті плівки окислів мають меншу твердість. Наявність їх призводить до підвищення площі фактичного контакту, причому, якщо це підвищення буде протікати швидше, ніж зменшення механічної складової сили тертя, то проходить збільшення сили тертя.

Особливо слід зупинитися на терті металевих поверхонь за високих температур, тобто вище температури розкладу мінеральних мастил, або температур плавлення чи розкладу твердих змащувальних матеріалів. На поверхнях тертя навіть в умовах високого розрідження створюється окисна плівка. Властивості цієї плівки відносно рівномірності покриття, щільності й міцності зв'язку з основою, а також інтенсивність її утворення залежать від складу сплаву. Плівка, за відповідного складу, зменшує силу тертя й інтенсивність зношування і захищає поверхні від корозії та безпосереднього контакту. В розрідженій атмосфері захисна дія плівки зменшується.

7.3. Тертя при граничному змащуванні

При граничному змащуванні поверхні спряжених тіл розділені шаром змащувального матеріалу дуже малої товщини (від товщини однієї молекули до 0,1 мкм). Наявність граничного шару чи граничної плівки зменшує силу тертя в порівнянні з тертям без мастила в 2...10 і зношування спряжених поверхонь у сотні разів.

Усі мастила здатні адсорбуватися на металевій поверхні. Міцність адсорбованої плівки залежить від наявності в ній активних молекул, їх якості й кількості. Хоча мінеральні змащувальні масла є механічною сумішшю неактивних вуглеводів, вони, за винятком надто чистих масел, які не були в роботі, завжди мають включення органічних кислот, смол та інших поверхнево-активних речовин. Жирні кислоти входять до складу масел рослинно-тваринного походження, а також до складу пластичних мастильних матеріалів. Тому майже всі змащувальні масла утворюють на металічних поверхнях граничну фазу кристалічної структури товщиною до 0,1 мкм, що має більш або менш міцний зв'язок з поверхневою та поздовжньою когезією. За наявності відносно товстого маслянистого прошарку між поверхнями тертя перехід від орієнтованої структури масла до неорієнтованої здійснюється стрибком.

Молекули змащувального матеріалу орієнтуються перпендикулярно до твердої поверхні, що дозволяє уявити граничну плівку у вигляді ворсу (рис. 7.1).

При взаємному переміщенні поверхонь тертя “ворсинки” немов згинаються в протилежні боки. Насправді ж відбувається зсув із перекосом квазікристалічної структури плівки.

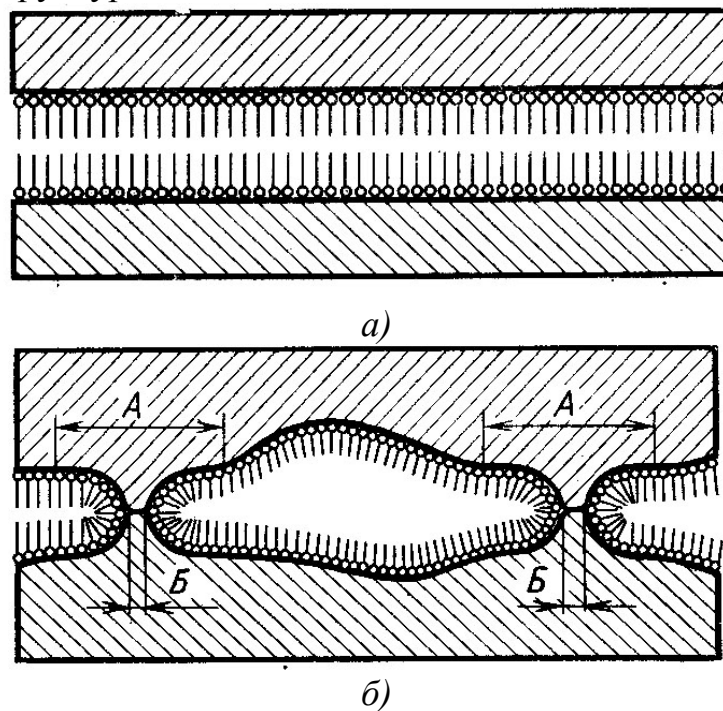


Рисунок 7.1 Схеми ковзання тіл при граничному зношуванні: а – змащування ідеальних поверхонь; б – контактування реальних поверхонь; А – ділянки, які сприймають навантаження; Б – ділянки безпосереднього контакту або контактування при твердих плівках

Опір її ковзанню в такому стані трохи підвищений. На відновлення орієнтації молекул у попереднє положення перпендикулярно поверхні тіл потрібно деякий проміжок часу, інколи дуже тривалий.

Змащувальний матеріал у граничному шарі анізотропний, в тангенціальному напрямку молекулярні шари легко згинаються і при товщині шару більше деякої критичної величини ковзають один по одному. По нормалі до твердої поверхні плівка має високий опір стисненню. Її несуча здатність обчислюється десятками тисяч кілограмів на 1 см^2 . Деформація стиску плівки дуже висока.

Механізм тертя при граничному змащуванні проявляються у такому вигляді. Під навантаженням проходять пружна і пластична деформації на площинах контакту, під якими треба розуміти ділянки найближчого прилягання поверхонь, які покриті граничною плівкою мастила, аж до мономолекулярного шару. На площинах контакту може виникнути взаємне втілення поверхні без порушення цілісності плівки мастила. Опір руху тіл при ковзанні складається з опору зсуву граничного шару і опору “проорюванню” поверхонь об’ємами, які втілилися. Крім того, на площадках контакту, які піддаються найбільш значній пластичній деформації, і в точках з високими місцевими температурами може виникнути руйнування змащувальної плівки з настанням адгезії оголених поверхонь і навіть схоплення металів на мікроділянках Б (рис. 7.1). Це викликає додатковий опір руху.

Завдяки рухомості молекул змащувального матеріалу на поверхні тертя проходить з великою швидкістю адсорбція, що надає мастильній плівці властивостей “самозаліковуватися” при місцевих її пошкодженнях. Ця здатність відіграє важливу роль у попередженні лавинного процесу схоплювання.

Гранична плівка, яка не відновлюється, в міру зростання шляху тертя зношується, мастило з плівки адсорбується на продукти зношування і виноситься з поверхні тертя. Проходить сублимація плівки як твердого тіла і видалення мастила в атмосферу. Окислення пліви сприяє дезорієнтації структури і руйнуванню її.

В’язкість мастила не впливає на процес граничного змащування. Мастило з однаковою в’язкістю, але різних марок, мають різноманітну змащувальну дію. Для оцінювання поведінки мастил при граничному змащуванні ще в 1903 році було введено поняття маслянистості й запропоновано різноманітні формулювання цього поняття. Маслянистість – це комплекс властивостей, які забезпечують ефективне граничне змащування. Маслянистість оцінюється в основному за коефіцієнтом тертя: чим він менший, тим вища маслянистість. Робляться спроби кількісно оцінити її. Маслянистість характеризує дію змащувального матеріалу при застосуванні до даного сполучення матеріалів, що труться.

В 1969 році Б.В. Дерягін, Н.М. Снідковський і А.Б. Ляшенко висунули гіпотезу, що молекули змащувального матеріалу в граничному шарі згруповані в домени. Домен олеїнової кислоти в граничному шарі містить близько 1400 молекул. Домени формуються електромагнітними силами і ніби копіюють

кристалічну будову підкладки. Встановлено, що граничні шари мають властивості напівпровідникового елемента.

Додавання в граничні шари мастила і водяних розчинів поверхнево-активних речовин збільшує товщину граничного шару і сприяє зменшенню зношування (до двох разів).

При терті з граничним змащуванням зношування деталей машин велике. Через хвилястість і шорсткість поверхонь їх контактування відбувається на дуже малих ділянках тертя. Контактні тиски мають високі значення, і тонка гранична плівка мастила не оберігає поверхні від пластичної деформації, що неминуче призводить до зношування деталей. Це є дуже серйозним недоліком граничного змащування.

Ефективність змащування, крім фактора адсорбції, залежить від хімічної взаємодії мастила і металу: жирні кислоти, вступаючи в реакцію з поверхнею металу, утворюють мило, тобто металічні солі жирних кислот, здатні внаслідок властивої їм високої когезії витримувати без руйнування значні деформації. Хімічним явищам належить важлива роль організації змащувальної дії. Це підтверджує обставина, що інертні метали і скло погано змащуються.

У зв'язку з невисокою термічною стійкістю граничної плівки, яка утворюється на металевих поверхнях звичайними мінеральними мастилами, деколи вдаються до штучного підвищення її хімічної активності. Цього досягають шляхом введення в мастило спеціальних добавок (присадок), які містять органічні з'єднання сірки, фосфору, хлору, миш'яку або сполучення цих елементів. Хоча ці присадки і міцно адсорбуються на поверхнях тертя, однак у процесі тертя їм відводиться інша роль. В умовах високих температур, які досягаються на мікроконтактах, активне з'єднання присадок розкладається і, взаємодіючи з металічними поверхнями, утворює плівки сульфїду заліза, фосфору або фосфату заліза, хлористого заліза й окислених хлоридів і т.п. Утворені плівки запобігають металічному контакту, зменшують опір тертю, запобігають подальшому локальному підвищенню температури. Плівка чинить слабкий опір зрізу, спрацьовується і відновлюється заново.

Плівка, утворена на поверхні сталі хлорованими вуглеводами, працездатна до температури 300...400°C, вище якої відбувається її розплавлення і розклад. У сульфїдів температура плавлення вища, і змащувальна здатність зберігається до температури 800°C. Нижче критичної температури плівки поводять себе як тверді змащувальні матеріали.

Очевидно, дія присадок неефективна, якщо матеріал не вступає в реакцію з активною частиною присадки. Наприклад, платина і срібло не вступають у реакцію з сіркою.

Деякі тверді тіла можуть виробляти змащувальну дію, організовуючи і підтримуючи режими тертя при граничному змащуванні. З викладеного раніше випливає, що гранична плівка повинна мати високий опір стисканню і низький опір зрізуванню. Виходячи з таких вимог, до твердих змащувальних матеріалів можна віднести деякі тіла шаруватої і пластинчастої структури, м'які метали і тонкі плівки пластичних матеріалів.

З матеріалів шаруватої структури властивості, необхідні для змащування металевих поверхонь, мають графіт, молибденіт (дисульфід молибдену MoS_2), сульфід срібла, пористий свинець, дисульфід вольфраму та інші.

Окрім тіл із шаруватою структурою всі тверді змащувальні матеріали утворюють граничний шар з необхідними якостями для опору стискуванню і зсуву (зрізування), але який не має суворо орієнтованої структури. Твердими мастилами можуть бути також м'які метали, які мають низький опір зрізуванню в корисному діапазоні температур. Для змащування використовують тверді плівки свинцю, олова й індію.

Механізм дії тонких металічних плівок, нанесених на тверду основу, за Ф.П.Боуденом такий: навантаження сприймається через плівку, яка має достатню міцність проти витискування, оберігає поверхні, що труться, від безпосереднього контактування і взаємного втілення. При відносному переміщенні поверхонь відбувається зрізування в м'якому металі. Оскільки опір зрізуванню невеликий, а площа фактичного контакту завдяки твердій підкладці мала, то й опір тертю також малий. Плівка, нанесена на м'яку підкладку, що значно деформується під навантаженням, вступає в контакт зі спряженою поверхнею на більшій площині, що збільшує силу тертя. Тому нанесення плівок м'яких металів, наприклад, на олов'яний бабіт неефективне. Доцільніше застосувати їх на свинцевистій бронзі і мідних сплавах.

З м'яких металів у якості твердих мастил можна використовувати тільки ті, які не наклепуються в межах робочих температур і не утворюють крихких твердих розчинів з металами спряжених тіл. Щоб метал не наклепувався, його робоча температура повинна бути вища температури рекристалізації. В олова, свинцю, індію температура рекристалізації нижча нормальної. Водночас олово, яке добре працює як твердий змащувальний матеріал (наприклад, між чавунними поверхнями), не придатне для нанесення на свинцевисту бронзу, бо вона дифундує з поверхні мідну основу бронзи, утворюючи тверді кристали, які викришуються з робочої поверхні. Індій хоч при нагріванні і дифундує в бронзу, з'єднуючись зі свинцем, не утворює крихких з'єднань.

Нанесені тверді плівки при багаторазових взаємних переміщеннях поверхонь швидко зношуються. Внаслідок цього їх використовують в якості покриття для припрацювання, а за одноразового контактування поверхонь – при глибокій витяжці металу.

Деякі матеріали внаслідок звичайного металургійного процесу або штучного насичення містять речовини, здатні служити твердим мастилом, наприклад, на припрацьованій поверхні конструкційного чавуну графіт розмащується, утворюючи граничний шар. Такий же шар утворюється на поверхні металу з пористих антифрикційних матеріалів, насичених мінеральними маслами, графіту і дисульфиду молибдену. В ширшому понятті граничним змащувальним матеріалом служить також політетрафторетилен, коли ним насичують пористі підшипникові матеріали. У свинцевистій бронзі, на твердій мідній основі, в який вкраплений свинець, останній при ковзанні розмащується по поверхні, покриваючи її тонкою плівкою. Ця плівка в міру зношування

сплаву відновлюється. Доріжки кочення і тіла кочення підшипника, що працюють при температурах вище 300°C , покривають інколи сріблом для попередження окислення і для використання в якості змащувального матеріалу.

Помилково думати, що сила тертя збільшується за рахунок зношування. Зазвичай цього не відбувається. Якщо зі збільшенням зношування коефіцієнт тертя підвищується, то це результат вторинних явищ, викликаних зміною шорсткості поверхні.

7.4. Тертя при рідинному змащуванні

Рідинне змащування характеризується тим, що поверхні, які труться, розділені шаром рідкого змащувального матеріалу (масла), який знаходиться під тиском. Тиск змащувального матеріалу зрівноважує зовнішнє навантаження. Шар мастила називають несучим шаром. При збільшенні його товщини більше товщини граничної плівки зменшується ступінь впливу твердої поверхні на молекули мастила, які знаходяться далеко від неї. Шари, які знаходяться на відстані більше 5 мкм від поверхні, набувають можливості вільно переміщуватися один відносно другого. При рідинному змащуванні опір руху визначається внутрішнім тертям (в'язкістю) рідини і складається з опору ковзанню шарів мастила по товщині змащувального прошарку. Цей режим тертя, з властивими йому досить малими коефіцієнтами тертя, є оптимальним для вузла тертя з точки зору втрат енергії, довговічності і зносостійкості. Сили тертя при рідинному змащуванні не залежать від природи спряжених поверхонь.

Явище тертя при рідинному змащуванні відкрив у 1883 році М.П.Петров, який створив основи теорії гідродинамічного змащування.

Існує два способи створення тиску в несучому шарі. За першим способом спеціально передбачається насос, який створює гідростатичний тиск, достатній для розділення поверхонь, які труться (рис. 7.2). Витік мастила через торці підшипника компенсується відповідною подачею насосу. За другим способом тиск у змащувальному шарі розвивається автоматично. Для цього необхідні належні конструктивні заходи і підбір марки мастила залежно від швидкості ковзання.

Згідно з обома способами створення тиску в несучому шарі розрізняють гідростатичні й гідродинамічні опори ковзання. Одні й другі є опорами тертя при рідинному змащуванні. Під опорою з рідинним змащуванням розуміють гідродинамічну опору. В побуті найбільш розповсюджені гідродинамічні.

Механізм утворення тиску в несучому шарі легко пояснити на прикладі плоскої опори (рис. 7.3). Нехай пластина А-А переміщується з деякою швидкістю U під кутом α до нерухомої підкладки Б-Б. Проміжок між пластиною і підкладкою заповнений в'язкою рідиною. Шар рідини, яка змочує пластину А-А, силами в'язкого тертя приводить у рух суміжний з ним по висоті шар. Так рух буде передаватися від одного шару до другого, за винятком шару, який змочує нерухому підкладку Б-Б.

У результаті мастило буде втягуватися в клиновий зазор, який звужується, і в ньому буде підтримуватися тиск, який буде постійним по довжині, оскільки на вхідній і вихідній кромках мастило стикається з атмосферою, де надлишковий тиск дорівнює нулю (рис.7.3б). Графіки швидкостей руху рідин у зазорі зображено на рис. 7.3а. Несуча здатність, або вантажопідйомність змащувального шару дорівнює рівнодіючій силі тиску. Такою силою можна навантажити пластину при даних її розмірах, швидкості переміщення і в'язкості масла.

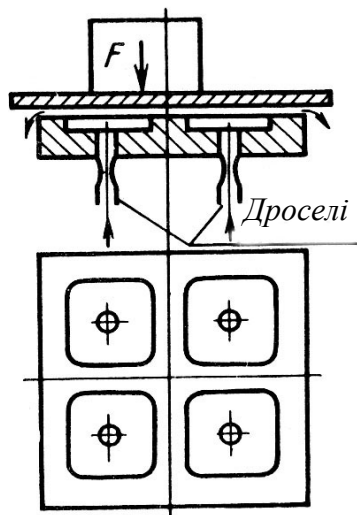


Рисунок 7.2. Схема роботи гідростатичної опори

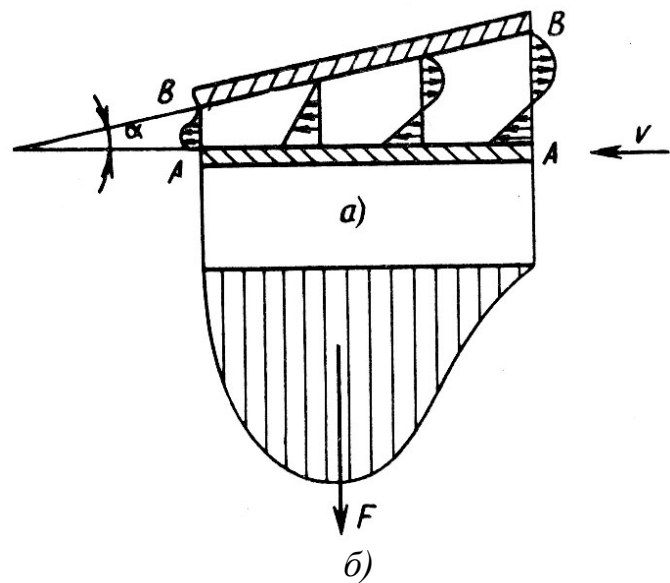


Рисунок 7.3. Схема утворення несучого шару змащування

Клиновий зазор є необхідною умовою підтримування режиму тертя при рідинному змащуванні в гідродинамічній опорі. У плоских опорах клиновий зазор створюється конструктивно, за допомогою нахилів поверхонь, як це має місце в повзунах і кільцевих опорах, чи завдяки самоустановці опорної поверхні (опорні підшипники типу підшипника Мічелла).

В опорному підшипнику ковзання діаметр отвору більший за діаметр цапфи, в результаті чого між цапфою і підшипником створюється клиновий серпоподібний зазор. При обертанні цапфи змащувальна рідина втягується силами в'язкості в зазор, який звужується, що призводить до підвищення тиску в шарі рідини. При достатній в'язкості мастильного матеріалу і швидкості на колі цапфи в шарі мастила створюється тиск, необхідний для відділення цапфи від підшипника – цапфа немов спливає на тонкому шарі мастила. Центр цапфи зміщується від початкового положення. Тиск у шарі мастила підтримується нагнітаючою дією цапфи, що обертається. Наявність підвищеного тиску в шарі мастила призводить до складної картини витікання рідини. Частина рідини, яка втягується в зазор, витискається через вихідне січення в бік, обернений напрямку обертання, і основний потік виноситься із навантаженої зони по обертанню вала, а інша частина витікає через торці підшипника.

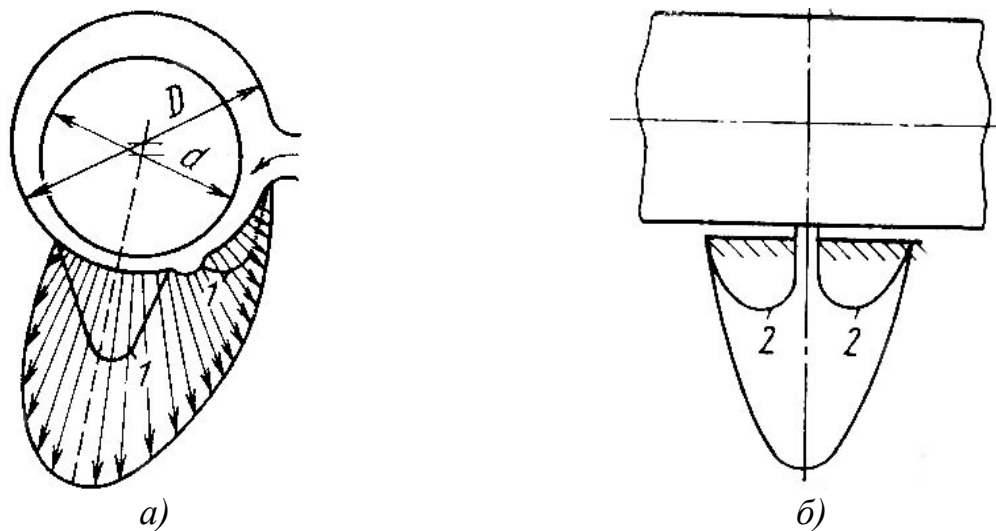


Рисунок 7.4. Розподіл тиску всередині масляного шару підшипника: а – в поперечному січенні; б – в поздовжньому січенні; 1 – при поздовжній канавці; 2 – при кільцевій канавці

На рис. 7.4 зображено положення цапфи в підшипнику при рідинному змащуванні й наведено графіки розподілу тиску в шарі мастила у поперечному січенні й по довжині.

Для здійснення рідинного змащування необхідно, щоб найменша товщина змащованого шару при гладких поверхнях, інших ідеальних умовах була не менше товщини, при якій проявляються об'ємні властивості рідини. Для шорстких поверхонь найменша товщина шару – мінімальна відстань між вершинами виступів нерівностей сполучених поверхонь.

Згідно з прикладною гідродинамічною теорією змащування в якості необхідної умови тертя при рідинному змащуванні мінімальний зазор між поверхнями має бути не менше суми середніх висот нерівностей поверхонь. Така концепція впливає з уяви, що виступи однієї поверхні контактують із впадинами сполученої поверхні. Тому, щоб не виникло зачеплення нерівностей, одне з тіл тертя має “спливати” не менше, ніж на суму середніх висот нерівностей. При визначенні найменшої допустимої (критичної) товщини змащувального шару враховують також ступінь деформації під навантаження, похибки виготовлення і монтажу деталей і можливість знаходження твердих домішок у мастилі.

Явище тертя при рідинному змащуванні в цілому складніше, ніж це впливає з гідродинамічної теорії, яка охоплює чисто механічний бік процесу. Молекули поверхнево-активних речовин, які утримуються в мастилі, адсорбуються на поверхні в мономолекулярний шар, на якому створюється граничний шар. До граничного шару приєднується зона мікротурбулентного руху, за якою йде ламінарний потік мастила (рис. 7.5).

Тертя при рідинному змащуванні можливе не тільки між поверхнями ковзання. При коченні, чи при коченні з ковзанням циліндричних і взагалі криволінійних поверхонь, що звужується з боку входу, в зазор втягується

змащувальна рідина, яка за деяких умов (навантаження, швидкості, пружних характеристик і геометрії поверхні) розділяє їх своїм шаром.

Пластичні змащувальні матеріали, як і рідинні, можуть забезпечити режим тертя, що виключає безпосередній контакт поверхонь і їх взаємне втілення. На відміну від мастил, які є в'язкими рідинами, пластичні мастильні матеріали володіють в'язкопластичними властивостями. Тому потік такого матеріалу має свої особливості.

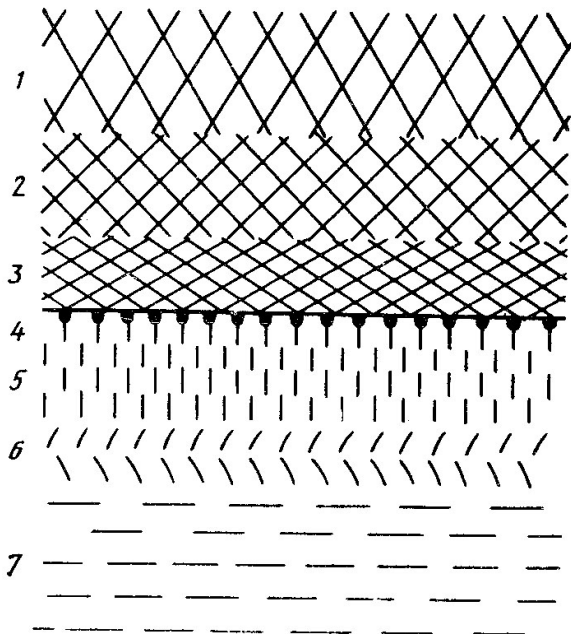


Рисунок 7.5 Схематичний розріз металічної поверхні і шару рідинного мастильного матеріалу: 1 – вихідна структура матеріалу; 2 – кристали, деформовані у напрямку обробки; 3 – подрібнені й розмащені кристали, окиси й адсорбоване масло; 4 – адсорбований моношар масла; 5 – граничний шар масла; 6 – зона мікротурбулентності; 7 – ламінарний потік

7.5. Тертя при напіврідинному змащуванні

Таке тертя має місце за наявності одночасно рідинного і граничного змащування.

Нормальне навантаження при напіврідинному змащуванні зрівноважується нормальною складовою сил взаємодії поверхонь на площадках їх контакту і силами гідродинамічного тиску в шарі мастила. Відносна доля кожної реакції залежить від навантаження, швидкості взаємного переміщення поверхонь, шорсткості, жорсткості і макрогеометрії, кількості і в'язкості мастила. Сила тертя складається з дотичної складової сил взаємодії поверхонь і опору в'язкому зсуву.

Гідродинамічна дія рідини може виникнути в двох випадках. По-перше, якщо макрогеометрія поверхонь, які контактують, така, що існує зазор, який звужується і в який мастило може затягуватися при терті, то при подачі його в достатній кількості і при відповідних параметрах режиму тертя виникає потік і створюється піднімальна сила. Але ця сила недостатня для повного сприйняття навантаження при напіврідинному змащуванні. Потік рідини обтікає ділянки взаємного контакту поверхонь.

По-друге, якщо нерівності між площадками контакту утворюють у напрямку відносного переміщення деталей місця звуження і розширення по висоті. При достатній кількості мастила між поверхнями тертя заповнені мікропорожнини звуження відіграють роль гідродинамічних мікроклинів (рис.

7.6). Гідродинамічна дія мастила на мікроклінах проявляється вже при дуже малій швидкості ковзання.

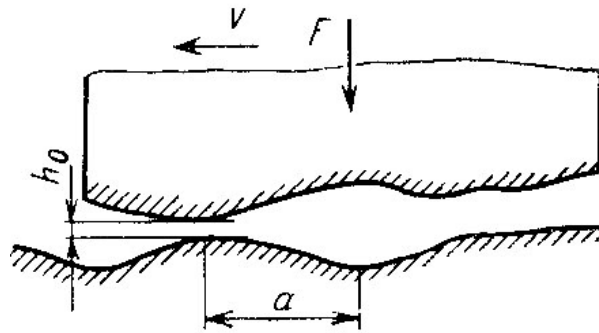


Рисунок 7.6. Схема елементарного гідродинамічного клина, створеного нерівностями поверхонь, які труться: a – довжина елементарного масляного клина; h_0 – початковий зазор між поверхнями у вершині масляного клина

Переваги змащувальних мастил перед твердими мастильними матеріалами полягає в тому, що вони можуть не тільки створювати гідродинамічний ефект за певних умов, але й служити для охолодження вузла тертя.

7.6. Режими тертя в підшипниках ковзання

Умови переходу з одного виду тертя в інший у присутності рідинного мастила розглянемо на прикладі підшипника ковзання.

Якщо кількість мастила обмежена, але достатня для утворення адсорбованого моношару і граничної плівки, то при терті первинний шар на вершинах нерівностей поверхонь швидко зношується, і тертя при граничному змащуванні перейде частково в тертя без змащувального матеріалу. Але завдяки рухомості полярно-активних молекул адсорбований моношар швидко відновлюється, внаслідок чого умови тертя покращуються. Це може призвести до коливань коефіцієнта тертя.

В результаті мастило через якийсь період спрацьовується. Якщо ж, крім витрат на утворення граничної плівки, є надлишок мастила, який достатньо заповнює впадини нерівностей, то він служить для відновлення граничної плівки, яка зношується. В цьому випадку тертя при граничному змащуванні стійке. При збільшенні подачі мастила до необхідної для створення гідродинамічного ефекту на виступах нерівностей поверхонь, чи на макрогеометричних нерівностях сполучених тіл, тертя при граничному змащуванні переходить у тертя при напіврідинному змащуванні. Останній вид тертя не залежить від швидкості ковзання поверхонь і в'язкості мастильного матеріалу.

Для прикладу розглянемо підшипник ковзання. Нехай навантаження, в'язкість мастила і геометричні параметри з'єднання зберігаються постійними. Будемо змінювати швидкість обертання цапфи. При малій швидкості ковзання поверхонь гідродинамічний ефект їх відокремлення не спостерігається, бо мастило витискується із зазора. Тертя тільки напіврідинне. При збільшенні швидкості ковзання гідродинамічні сили зростають і взаємодія поверхонь

зменшується, зрештою, при деякій швидкості відбувається повне розділення поверхонь і настає режим тертя при рідинному змащуванні. Подальше збільшення швидкості призводить до підвищення в шарі мастила, і коефіцієнт тертя збільшується. Мінімум коефіцієнта тертя відповідає початку тертя при рідинному змащуванні.

Аналогічне явище будемо спостерігати при зміні в'язкості змащувального матеріалу: при малій в'язкості мастила рідинного змащування не буде, але після досягнення згадуваного мінімуму коефіцієнта тертя збільшення в'язкості мастила підвищує опір тертю. Протилежно діє питоме навантаження: при великому тиску на опору умови для рідинного змащування несприятливі, зменшення навантаження до деякої величини призводить до "спливання" цапфи: подальше зменшення навантаження супроводжується збільшенням товщини несучого шару змащувального матеріалу і опором тертю. Таким чином, режим тертя в підшипнику визначається в'язкістю η , швидкістю ковзання ϑ і тиском P , точніше, фактором $\frac{\eta \cdot \vartheta}{P}$.

Наочну уяву про умови переходу одного режиму тертя в інший дає діаграма Герсі, в якій коефіцієнт тертя f пов'язаний з параметром $\frac{\eta \cdot \vartheta}{P}$ (рис. 7.7). Цей параметр називають характеристикою режиму підшипника. На діаграмі – лінія $a-a$, яка проходить через точку мінімуму коефіцієнта тертя. Припустимо, що підшипник працює в режимі граничного змащування і з деяких причин підвищився тиск. Тоді значення $\frac{\eta \cdot \vartheta}{P}$ зменшується, і початкова точка на діаграмі зміститься вліво і вгору. Сила P тертя зростає, температура поверхонь і мастила знизиться, і сила тертя зростає. При граничному змащуванні з підвищенням навантаження зростає температура, і гранична плівка місцями руйнується – тертя буде проходити без змащувального матеріалу. Лінія $b-b$ відокремлює область тертя при граничному змащуванні від області поверхонь, що не змащуються. Аналогічно можна встановити нестійкість коефіцієнта тертя при зменшенні швидкості в зоні тертя при граничному змащуванні і тертя поверхонь, які не змащуються, і при падінні в'язкості мастила у випадку підвищення температури.

Якщо ж режим тертя відповідає точці, розміщеній праворуч від лінії $a-a$, то у вузькому інтервалі зміни $\frac{\eta \cdot \vartheta}{P}$ сила тертя стабільна. Наприклад, короткочасне наростання швидкості ковзання поверхонь може викликати дуже сильне тепловиділення в підшипнику, в'язкість мастила і коефіцієнта тертя зменшаться, характеристика режиму встановиться.

Фактор $\frac{\eta \cdot \vartheta}{P}$ є характеристикою режимів тертя при напіврідинному і рідинному змащуванні. При інших видах тертя властивості в'язкості мастила можна не брати до уваги. Що стосується зміни коефіцієнту тертя при малих,

близьких до нуля значеннях характеристики режиму, то залежно від матеріалів деталей і середовища крива від точки, яка відповідає коефіцієнту тертя спокою (швидкість ковзання $\vartheta=0$), може монотонно спадати або зростати і, проходячи через максимум, зменшуватися до критичного режиму (мінімального коефіцієнта тертя).

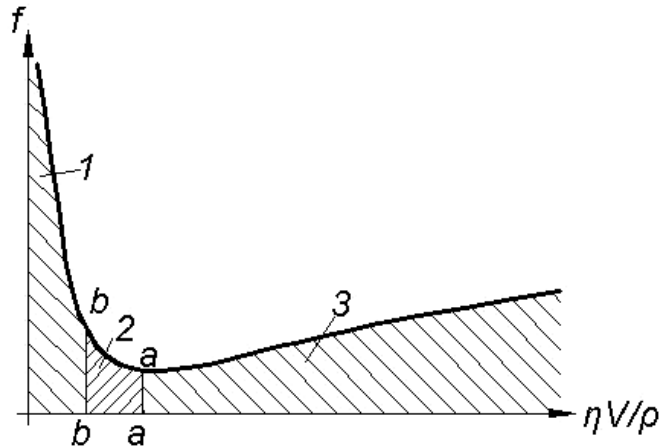


Рисунок 7.7. *Діаграма режимів тертя в підшипнику ковзання: 1 – область тертя незмащених поверхонь; 2 – область тертя при граничному і напіврідинному змащуванні; 3 – область тертя при рідинному змащуванні*

Діаграма Герсі придатна також для аналізу явищ тертя в підп'ятниках і парах тертя із зворотно-поступальним рухом. У цих парах, як бачимо з діаграми, протягом одного ходу можливі різноманітні режими тертя.

7.7. Особливості тертя кочення

Сила тертя кочення в десятки разів менша сили тертя ковзання. Наявність сили тертя кочення пояснювали раніше ковзанням сполучених поверхонь. Пізніше було встановлено, що воно впливає на силу тертя кочення. Опір коченню пояснюється деформаційними втратами в розміщеному нижче твердому тілі. За відсутності пластичної деформації тертя зумовлене гістерезисними втратами в твердому тілі.

Взаємне просковзування поверхонь можна уявити при розгляданні кочення кульки (рис.7.8). Коло АВ кульки переміщується посередині канавки, а коло CD торкається її країв. Як бачимо з рисунка, коло АВ проходить за один оберт кульки більшу відстань, аніж коло CD. Ця різниця й зумовлює ковзання поверхонь тертя.

Гістерезисні втрати при терті кочення пояснимо з допомогою рисунка 8.9.

Ще О. Рейнольдс помітив, що коли циліндр із твердого матеріалу котиться по плоскій поверхні гуми, то при кожному оберті він проходить шлях менший, ніж довжина кола циліндра. Він припустив, що гума розтягується в точці С по-іншому, ніж у точках ВD, у результаті має місце, як вже згадувалося, просковзування з відповідним розсіюванням енергії. З рис. 7.8 і 7.9 бачимо, що попереду під кулькою в точці Е утворюється заглибина, а позаду в точці А –

деформаційний матеріал повністю (при гумі), а при металах частково відновлюється під дією сил пружності або пружного гістерезису. Крім того, внаслідок залишкової пластичної деформації сили реакції позаду кульки менші, ніж сили тиску спереду неї. В результаті кулька виконує роботу деформації.

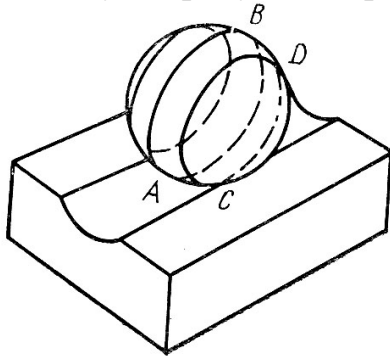


Рисунок 7.8 Кулька, яка котиться по канавці

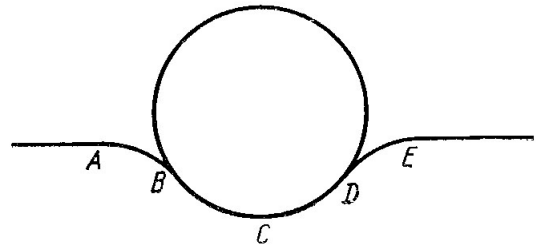


Рисунок 7.9 Кулька, яка котиться вправо по плоскій пружній основі

На поверхнях тіл кочення, як і при їх ковзанні, виникають сили зчеплення. Адгезійне зчеплення незначно впливає на сили тертя кочення (наявність граничного змащування майже не впливає на силу тертя кочення), але відіграє велику роль у зношуванні тіл кочення.

За допомогою методу радіоактивних ізотопів доведено, що при коченні кульки з сапфіру по поверхні міді відбувається деяке перенесення металу з доріжки кочення на кульку. Якщо поверхні змащені олеїною кислотою, то опір коченню кульки не змінюється, однак кількість перенесеної міді зменшується більш ніж у 4 рази.

При терті кочення у випадку твердих тіл деформації поверхонь невеликі й окисні плівки, які є на поверхнях тертя, не піддаються значному руйнуванню. Тому ковзання поверхонь проходить не по металу, а по окислах, які можуть зношуватися. Це і пояснює вплив ковзання на зношування тіл кочення.

Для припрацьованого стану поверхонь за експериментальними даними сила тертя кочення

$$F = \frac{k \cdot N^n}{D^m}, \quad (7.3)$$

де k – константа, яка залежить від матеріалу; N – навантаження на кульку; D – діаметр кульки; $n = 1,7 \dots 1,85$; $m = 1,5 \dots 1,6$.

Сила тертя підшипника кочення при високих швидкостях залежить від в'язкості мастила і може досягати значних величин. На силу тертя підшипника кочення впливає в'язкість мастила, тертя в сепараторі підшипника, розмір кульок, шорсткість поверхні та ін.

Момент тертя підшипника кочення

$$M = 0,5 \cdot F_a \cdot Q \cdot d \quad \text{або} \quad M = 0,5 \cdot F_t \cdot T \cdot d, \quad (7.4)$$

де f_a і f_m – коефіцієнти тертя при радіальному й осьовому навантаженні, віднесені до діаметра вала d ; Q і T – радіальне й осьове навантаження.

Сила тертя в підшипниках кочення збільшується у випадку технологічних і монтажних похибок, підвищених швидкостей і при терті в ущільненнях. Значення коефіцієнтів тертя в різних видах підшипників кочення знаходяться в діапазоні 0,0020,008.

7.8. Ефект аномально низького тертя

Вчені А.А.Сілін, Е.А.Духовський та інші в 1969 р. відкрили явище наднизького тертя. Коефіцієнт тертя поліетилену і пропілену при терті у вакуумі під дією потоку атомів гелію (і деяких інших елементів) зменшився на два порядки. Спочатку коефіцієнт тертя дорівнював $f=0,1...0,13$, а при ввімкненні атомного пучка густиною 10^{13} атомів на 1 см^2 з енергією 2кеВ зменшився до $f = 0,0015$. Досліди проводили за нормальної температури, швидкості ковзання – 2 м/с, тиску 20...60кПа і при розрідженні в камері $655 \cdot 10^{-6} \dots 655 \cdot 10^{-4}$ Па. Після припинення опромінення коефіцієнт тертя відновлювався до початкових значень. На полістиролі й політетрафторетилені ефект аномально низького тертя не спостерігався.

Інтенсивність зношування при наднизькому терті різко зменшується. Дослідження довели, що при опроміненні тонкий поверхневий шар речовини переходить в упорядкований стан. Цей стан характеризується малою поверхневою енергією і залишається стійким за нормальної й підвищеної температур.

Ефект може проявлятися і без опромінення, якщо речовина має шарувату кристалічну структуру (наприклад, молібденіт). Орієнтація структури такої речовини при терті у вакуумі відбувається за рахунок енергії тертя. Однак цьому процесу заважають домішки, особливо молекули води. Бомбардування прискореними частинками виганяє воду, що сприяє швидшій орієнтації речовини.

Одним з напрямів, що активно розвиваються в цей час, є створення самозмащувальних матеріалів, здатних зберігати свої властивості у високому вакуумі за температур -150 до $+450^\circ\text{C}$. У космічних апаратах як самозмащувальні матеріали використовують дисульфід молібдену, однак цілком задовольнити зростаючі вимоги якості самозмащувальних матеріалів вони не можуть. Більш перспективнішим у цьому випадку є диселенід молібдену.

Автори ефекту створили новий самозмащувальний матеріал, здатний працювати у важких і екстремальних умовах. У вакуумі при високих навантаженнях він витримує як низьку температуру, так і нагрівання до 1000°C , а при опроміненні реалізує наднизьке тертя. Матеріал випробуваний у реальних конструкціях і застосовується на підприємствах у різних галузях. Джерела опромінення можуть бути портативними, а додаткові витрати енергії для їх живлення малі в порівнянні з виграшем від зменшення втрат на тертя.

РОЗДІЛ 8

ВИДИ ЗНОШУВАННЯ І ПОШКОДЖУВАНOSTІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

8.1. Класифікація видів зношування і пошкоджуваності

Поверхні тертя деталей машин при експлуатації суттєво змінюються. Змінюються розміри і геометричні характеристики, структура, властивості і напружений стан поверхневих шарів. Ці зміни можуть мати монотонний і різко виражений стрибкоподібний характер. Вони можуть охоплювати мікро-, макро- і субмікроскопічні об'єми. Характер змін значною мірою залежить від кінематичного руху (виду тертя), умов механічного навантаження, наявності й складу середовища, виду змащування, концентрації кисню, матеріалу.

Зміни можуть бути корисними, які нормалізують зовнішнє тертя і сприяють мінімізації зношування, або призводять до недопустимих явищ різко вираженої пошкоджуваності.

Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) нагромадження його залишкової деформації під час тертя, що виявляється в поступовому змінюванні розмірів і або форми деталі, зразка. **Знос** – результат зношування, що оцінюється безпосередньою зміною розмірів або побічними (непрямими) ознаками. Розрізняють знос лінійний, який визначається зменшенням розміру по нормалі до поверхні тертя, об'ємний – зменшення об'єму і ваговий – зменшення ваги.

Окрім зміни форми і геометричних розмірів деталей або зразків, відбувається повна трансформація структури і її поверхневих шарів. Найбільш різка зміна структури і її властивостей спостерігається в початковий період роботи спряжень. При встановленому зношуванні процеси трансформації мінімізовані й зосереджені в надзвичайно тонких поверхневих шарах.

Пошкоджуваність – процес різко вираженої і нерівномірної зміни геометричного стану поверхонь тертя, структури і властивостей поверхневих шарів. **Пошкодження** – результат пошкоджуваності, що проявляється у зміні макрогеометричних характеристик, структури, властивостей і напруженого стану поверхневих шарів. Зношування і пошкоджуваність відрізняють чітко вираженими зовнішніми ознаками, механізми їх внутрішнього розвитку специфічні.

В основу класифікації видів зношування і пошкоджуваності деталей машин при терті, яку запропонував професор Б.І. Костецький, покладено такі принципи:

1. Вивчення природи процесів руйнування, що спостерігаються при роботі деталей машин.
2. Відтворення цих процесів і вивчення їх у лабораторних умовах.
3. Вивчення зношування і пошкоджуваності в процесі їх розвитку у зв'язку з критичними переходами від одних видів до інших залежно від зовнішньої механічної дії, факторів середовища і властивостей матеріалів деталей. При

цьому також враховується вплив масштабного фактора, фактора часу і характеру навантаження – статичного або динамічного.

Можливості чіткого розмежування зношування і пошкоджуваності виявляються при аналізі видів руйнування деталей різних машин (які експлуатуються в сільському господарстві, переробній і харчовій промисловості, авіації і на транспорті, металорізальному обладнанні тощо). Залежно від умов тертя, середовища і матеріалів спостерігаються певно визначені провідні (ведучі) процеси. Поряд з ними можуть існувати супутні явища, що здійснюють менш значний вплив на руйнування поверхонь. Положення про провідні й супутні процеси руйнування є фундаментальною основою класифікації видів зношування і пошкоджуваності професором Б.І. Костецьким (рис. 8.1).

З точки зору надійності роботи всі види трансформації у відповідності з класифікацією поділяють на дві великі групи – допустимі й патологічні (недопустимі). До допустимих відносять велику групу явищ, пов'язаних із процесами мінімізації пластичної деформації, активізації тонких поверхневих шарів металу, миттєвої їх взаємодії з агресивними компонентами навколишнього середовища (газовим і рідинним) і утворення рівномірно розмічених на поверхні вторинних структур, які періодично руйнуються і знову утворюються. Процес встановленого тертя і зношування в таких умовах має властивості саморегулювання.



Рисунок 8.1. Класифікація видів зношування і пошкоджуваності деталей машин

Простою і найбільш розповсюдженою різновидністю допустимого зношування є окисне (окислювальне) зношування. Воно має кілька форм, а його кількісні параметри можуть змінюватися в певних межах.

Взаємодія активованих пластичною деформацією поверхневих шарів металів з різними агресивними компонентами рідких і газових середовищ може призвести до утворення вторинних захисних структур іншого складу – на основі сірки, фосфору, азоту, вуглецю тощо. Цей загальний комплекс явищ, пов'язаних з деформацією, текстурованням поверхневих об'ємів металу, подальшою взаємодією з хімічно активними компонентами робочого середовища і руйнуванням утворених структур, складає механохімічне зношування.

До проміжних процесів руйнування можна віднести деякі форми абразивного зношування без зняття стружки і пошкодження дряпанням.

До патологічних процесів руйнування поверхонь відносять: процеси, які безпосередньо пов'язані з тертям (схоплення I і II роду, абразивне зношування з пошкодженням поверхонь контакту – зняттям мікростружки, втомне пошкодження, фретінг-процес) і побічно пов'язані з тертям (змінання, корозія, кавітація, ерозія). Патологічні явища – це своєрідні, яскраво виражені види руйнування поверхні, що виникають при порушенні нормальних умов зовнішнього тертя. Перехід до патологічних процесів відбувається стрибкоподібно при досягненні деяких критичних умов.

8.2. Механохімічне окисне зношування

Механохімічне окисне зношування – це процес поступового руйнування поверхонь тертя деталей вузлів або зразків при терті, який викликається взаємодією активних пластично деформованих (текстурованих) поверхневих шарів металу з атомами кисню, сірки, фосфору, хлору, азоту, вуглецю та іншими, що містяться в середовищі та адсорбуються на робочій поверхні. Взаємодія поверхневих шарів металу з киснем у повітрі або в мастилі, спричиняє окислювальне зношування як різновид механохімічного зношування. Окисне (окислювальне) зношування відбувається у випадку, коли на поверхнях дотику утворюються плівки окислів (твердих розчинів – вторинні структури I типу і хімічних з'єднань металу з киснем – вторинні структури II типу), які в процесі тертя руйнуються і знову утворюються. Продукти зношування складаються з окислів. Окисне зношування – встановлений стаціонарний процес динамічної рівноваги руйнування і відновлення окисних плівок вторинних структур.

При цьому виді зношування швидкість окислення ($\mathcal{G}_{ок}$) перевищує швидкість інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, тобто окислення, є переважаючим (домінуючим). Міцність плівок вторинних структур, що утворюються, забезпечує стале протікання цього виду зношування, швидкість руйнування плівок не перевищує швидкість окислення ($\mathcal{G}_{ок} > \mathcal{G}_{руйн.}$).

Спільним для вторинних структур обох основних типів є їхня поверхнева локалізація, високоміцна ультра дисперсна будова, здатність мінімізувати руйнування поверхневого шару й екранувати неприпустимі процеси схоплювання, втомленості, корозії тощо.

Окисне (окислювальне) зношування характеризує нормальні умови експлуатації вузлів тертя. Окисні процеси як супутні спостерігаються і при інших видах зношування і пошкоджуваності поверхонь тертя. Деформаційні й окислювальні процеси відбуваються в дуже тонких поверхневих шарах порядку 10...100 нм.

Найчастіше механохімічне зношування спостерігається при терті сполучених деталей, виготовлених з різних металів і сплавів на основі твердих розчинів з гетерогенною структурою або підвищеними твердістю і границею текучості. Цей вид зношування характерний для деталей шарнірно-болтових з'єднань, калібрів, металевих коліс, фрикційних передач, чашок варіаторів, тяги механізмів керування тощо.

Окисне зношування має кілька форм. Залежно від умов, виду тертя, швидкості відносного переміщення, тиску, динамічності навантаження, температури, складу середовища, механічних і хімічних властивостей матеріалів, що труться, характер та інтенсивність окисних процесів змінюється. Перша форма окисного зношування характеризується утворенням на поверхнях тертя твердих розчинів кисню і тонких евтектик його з'єднань з металом. Друга форма – утворенням хімічних з'єднань кисню з металом (для сталі – FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4). У першому випадку характерне в'язке руйнування поверхонь контакту, а в другому – в'язко-крихке.

В умовах наявності абразивного середовища окислення і руйнування поверхонь інтенсифікується внаслідок великої концентрації напружень у локальних об'ємах металу. Особливості цієї форми окисного зношування розглянуто далі.

Нормальне окисне зношування виникає при терті ковзання і кочення, при сухому терті і граничному змащуванні.

Питомі тиски при окисному зношуванні не перевищують критичних значень, за яких відбувається руйнування мастильної плівки при граничному терті, або величин, які визивають інтенсивне руйнування захисних вторинних структур окислів і контактування ювінільних поверхонь при сухому терті.

Інтенсивність зношування може бути значною, але поверхні тертя зберігають малу шорсткість. Це пояснюється тим, що окисли перешкоджають схоплюванню поверхонь. При значних температурах окислення поверхня характеризується пластичною деформацією. Тому одним із методів боротьби з окисним зношуванням є створення поверхонь тертя з високою твердістю.

Підвищення температури до певних значень сприяє утворенню і зростанню окисних плівок, а вібрації – їх руйнуванню. У випадку циклічного руйнування окислів високої твердості зношування буде носити характер абразивного.

Окисне зношування може виникати при терті металів і сплавів з різними механічними й хімічними властивостями. Основні кількісні характеристики –

інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя, за різних форм і умов окисного процесу, залежить від специфіки окисних змін.

Окисне зношування є найважливішою різновидністю механохімічного зношування, загальною особливістю якого є те, що в усіх випадках воно зумовлене механічним процесом деформації тонких поверхневих шарів і одночасною взаємодією активних деформованих шарів з агресивними компонентами середовища.

Поряд з окисним існує ряд різновидів механохімічного зношування, які відрізняються утворенням у процесі тертя сульфідних, фосфатних та інших видів плівок вторинних структур, які виконують таку ж роль, як і плівки окислів.

8.3. Абразивне зношування

Абразивним матеріалом називають мінерал природного або штучного походження, зерна якого мають достатню твердість і мають здатність різати.

Абразивне зношування і пошкоджуваність – процеси руйнування поверхонь деталей машин у результаті їх взаємодії з твердими частинками (абразивним середовищем), за наявності відносної швидкості. У ролі таких частинок виступають:

а) нерухомо закріплені тверді зерна, які входять у контакт по дотичній або під невеликим кутом до поверхні деталі;

б) не закріплені частинки, які входять у контакт з поверхнею деталі (наприклад, насипні вантажі при їх транспортуванні відповідними засобами, абразивні частинки в ґрунті при роботі сільськогосподарських машин і т.п.);

в) вільні частинки, які перебувають у зазорах спряжень деталей;

г) вільні абразивні частинки, які затягуються в потік рідиною або газом.

Абразивному зношуванню підлягають деталі сільськогосподарських машин, дорожньо-будівельних, гірничих, транспортних машин і засобів транспортування, вузли металургійного обладнання, металорізальних верстатів, шасі літаків, робочі колеса турбін, труби і насоси земснарядів, лопатки газових турбін, труби водяних економлайзерів і парових котлів, обладнання нафтової і газової промисловості, підшипники валів гребних коліс, підшипники гребних валів суден і т.п.

На процес абразивного зношування може впливати природа абразивних частинок, агресивність середовища, властивості поверхонь, що зношуються, ударна взаємодія, нагрівання та інші фактори. Загальним для абразивного зношування є механічний характер руйнування поверхні.

Абразивне зношування виникає при контактуванні з ґрунтом, рудою, вугіллям і породою, золою, попелом, пилом, які потрапляють на поверхню тертя, металічною стружкою, окисними плівками, які закріпилися на поверхні тертя або руйнування, нагаром і продуктами зношування.

Абразивні частинки можуть мати різноманітну форму і бути по-різному зорієнтовані відносно поверхні спряження. Здатність абразивного зерна

втискуватися у поверхню залежить не тільки від співвідношення його твердості, але й від геометричної форми зерна. Зерно з випуклою поверхнею або гострим ребром може бути втиснене, навіть без пошкодження, в плоску поверхню твердішого тіла. Це пояснює факт зношування металу абразивними частинками з твердістю, меншою його твердості.

Іноді твердість окисних плівок більша твердості самих металів. Вид зношування визначається характером взаємодії абразивних частинок із поверхневим шаром матеріалу. На деталях сільськогосподарських машин спостерігається абразивне зношування трьох видів, у кожному з яких є два підвиди. Існують дві чітко виражені форми прояву абразивних процесів, які відрізняються характером взаємодії частинок із поверхнею металу:

I – з переважаючим механічним руйнуванням (пластичне деформування поверхневих об'ємів, їх окислення з наступним руйнування окисних плівок). Ця форма є різновидністю механічного зношування.

II – з переважаючим механічним руйнуванням металу поверхневих шарів (проникнення абразивних частинок і руйнування поверхневих об'ємів без відокремлення частинок основного металу або зі зняттям мікростружки). Ця форма є недопустимим процесом пошкоджуваності при зовнішньому терті.

Механізм зношування відбувається у випадку, коли абразивні частинки входять у контакт із поверхнею металевої деталі по дотичній. Абразивні частинки пружно деформують метал, залишаючись цілими або руйнуються. Залежно від структури абразивного матеріалу і середовища зерна можуть втискуватися в це середовище, повернутися або навіть вийти із зони контакту, як, наприклад, частинки кварцу в ґрунті під тиском ножа грейдера. Абразивна частинка втискується в метал деталі, якщо вона має більшу твердість, ніж металічне зерно, і міцністю, достатньою для сприйняття навантаження, необхідного для втискування в метал і якщо її достатньо підтримує основа. Впроваджена частинка при русі відносно поверхні може дряпати або зрізувати мікроскопічну стружку. Різання може початися тільки при певному відношенні глибини проникнення абразива до радіуса заокруглення його граней. Дно рівчачка наклепується. Коли вся робоча поверхня наклепується, опір упровадженню підвищується. Після багатократної пластичної деформації настає крихкість матеріалу. Встановлено, що відносна зносостійкість чистих металів знаходиться в лінійній залежності з мікротвердістю.

Механізми абразивного зношування полімерних матеріалів визначають ступенем їх еластичності. У високопластичний матеріал – гуму, вулкан, поліуретановий вулканізатор та інші, абразивні частинки легко втискуються, не викликаючи пластичної деформації навіть при глибокому контакті. Абразивне зерно переміщується по поверхні. Сили тертя спереду зерна викликають стиснення, а позаду нього – розтяг. Під дією багатократних напружень на розтяг відбуваються мікрориви, частина матеріалу з поверхні виноситься з утворенням хвилеподібного рельєфу з виступів і впадин у напрямку, перпендикулярному руху абразиву.

При дослідженні зношування пластмас незакріпленим абразивом розмірами 0,075...1,5мм на пружній підкладці було встановлено:

1. Абразивні частинки розміром 0,075мм практично не викликають зношування. Відносно еластичні полімери, такі, як поліаміди, мало зношуються при розмірі зерна 0,015мм. При збільшенні розміру абразивних частинок більше 0,1мм інтенсивність зношування всіх полімерів зменшується.

2. При терті пластмас по шліфувальній шкірці зношування прямопропорційне тиску, що зберігається тільки до певної межі. У подальшому інтенсивність зношування зі зростанням тиску не збільшується.

3. Збільшення швидкості ковзання до 0,5м/с не впливає на інтенсивність зношування. Зі зменшенням швидкості інтенсивність зношування падає, а потім зростає.

Експериментально встановлено: якщо розмір абразивних частинок, які знаходяться в маслі або іншій рідині, не перевищує 5мкм, то вони адсорбують на себе продукти окислення мастила, що може зменшити інтенсивність зношування деталей. Частинки більших розмірів починають наносити шкоду. За наявності в мастилi частинок менше 5мкм швидкість зношування становить 0,3 мг/год, а при частинках 10мкм – 0,92 мг/год.

Особливу небезпеку частинки великих розмірів становлять для гідросистем, де деталі з твердих сталей працюють при малих зазорах. У гідросистемах завжди є фільтри тонкого очищення, але все ж у системах присутні частинки з розмірами більше 5мкм. Фірма “Вікерс” (Великобританія) наводить для гідросистем наступний розподіл по розмірах частинок: 0...5мкм – 39%, 5...10мкм – 18%, 10...20мкм – 16%, 20...40мкм – 18%, 40...80мкм – 9%.

Абразивні частинки, які потрапили в зазори пар тертя, беруть участь у сприйманні прикладеного навантаження і можуть, залежно від умов, вклинюватися в поверхні тертя, подрібнюватися на м'якші фракції, перекочуватися вздовж поверхні зношування, пружно і пластично деформуючи її.

Абразивні частинки можуть потрапити в робочі порожнини машин і на поверхні тертя з повітря разом із паливом і змащувальними матеріалами, а також іншими шляхами.

Із абразивних частинок, що потрапляють із повітря, найбільшу дію створюють частинки кварцу, твердість яких досягає 11...12 ГПа. Ці частинки розміром 1...30 мкм можуть тривалий час знаходитися в повітрі при його русі (в результаті вітру або руху транспорту). Повітряні фільтри двигунів автомобілів і багатьох інших машин можуть затримувати лише крупні частинки пилу. Дрібні частинки проникають у двигун разом із повітрям.

8.4. Схоплювання і заїдання поверхонь при терті

Під час роботи машин і механізмів, вузли тертя яких передають великі навантаження за високих швидкостей ковзання і температур, виникає заїдання – процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхонь тертя внаслідок схоплювання і перенесення матеріалу.

Схоплювання – явище місцевого з'єднання двох твердих тіл (металів) у результаті взаємного тертя або сумісного деформування при температурі, нижчій від температури рекристалізації. При цьому утворюються міцні кристалічні зв'язки в зонах безпосереднього контакту поверхонь. У місцях схоплювання зникає межа між тілами, що дотикаються, і відбувається зношування металів. Процеси схоплювання безпосередньо зв'язані з адгезією і когезією. Адгезія супроводжується перенесенням матеріалу і спостерігається в усіх металів під час контакту їхніх незабруднених поверхонь.

Вивченню явища схоплювання і методів боротьби з ним присвячено праці Б.І. Костецького, В.Д. Кузнецова, М.Л.Голего, І.В. Крагельського, М.О. Буше тощо. Встановлено, що на інтенсивність розвитку процесів схоплювання впливають фізичні, хімічні, механічні властивості матеріалів, геометрія поверхонь тертя, фізико-хімічні властивості середовища.

На явищі схоплювання при сумісному пластичному деформуванні металів базуються технологічні процеси холодного зварювання металів і отримання біметалів методом холодного прокатування тощо.

В умовах вакууму без газового або рідинного середовища зовнішнє тертя приводить до міцної адгезійної взаємодії двох поверхонь – їх зварювання. У зв'язку з цим з'явився технологічний процес зварювання у вакуумі, а з 1936 р. почалися роботи із забезпечення працездатності вузлів тертя, експлуатованих в умовах вакууму.

Задир – пошкодження поверхні тертя і утворення в результаті схоплювання широких і глибоких борозен (ривчаків) з витісненням металу як в сторони, так і в напрямку ковзання. На поверхнях тертя може утворитися і кілька борозен.

Розрізняють процеси схоплювання I і II родів, відмінних умовами роботи.

Схоплювання I роду – процес недопустимого пошкодження поверхонь тертя в результаті виникнення локальних металічних зв'язків, їх деформації і руйнування з відокремленням частинок металу або налипанням на поверхню контакту. При цьому виді пошкоджуваності швидкість процесу утворення металічних зв'язків перевищує швидкість інших процесів і стає переважаючим. Виникнення металічних зв'язків відбувається при інтенсивній деформації поверхневих об'ємів металу, зумовленої термічною пластичністю.

Пластична деформація в цих умовах призводить до зміни стану поверхні, руйнування плівок окислів і адсорбованих плівок мастила, виходу на поверхню ювенільних ділянок. У результаті деформації відбувається активізація металу поверхневих шарів. Унаслідок схоплювання частинки металу вириваються на одних ділянках поверхонь і налипають на інші ділянки, що призводить до зношування поверхні деталей, а в окремих випадках відбувається їх заїдання.

Заїдання – процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхні тертя внаслідок схоплювання і перенесення матеріалу.

Схоплювання I роду або холодний задир виникає при терті ковзання з малими швидкостями відносного переміщення і питомим тиском, які перевищують границі плинності (текучості) металу на ділянках фактичного контакту за відсутності шару мастила або захисних плівок окислів в умовах незначного підвищення температур, які призводять до інтенсивного пластичного деформування, руйнування й вдосконалення частинок металу з поверхонь тертя, внаслідок схоплювання металів, що являє собою процес міцного зеднання контактних ділянок сполучених поверхонь. У вакуумі, починаючи від ступеня розрідження ($1,33 \cdot 10^{-3}$), цей вид пошкоджуваності може виникати і при терті кочення. Процес схоплювання суттєво залежить від механічних і фізичних властивостей матеріалів, їх співвідношень, міцності, твердості, типу кристалічної ґратки, взаємного розчинення, електронної будови і т.п.

Схоплювання I роду або холодний задир є один з найнебезпечніших і різко виражених видів пошкоджуваності деталей машин.

У практиці роботи деталей машин цей патологічний процес зовсім небажаний. Для його усунення необхідні дані про критичні значення величин тиску, швидкості та природи процесу. Особливо небезпечні прояви атермічного схоплювання, що виникають при динамічному навантаженні поверхонь і розвитку фретінг-процесу.

Схоплювання II роду – процес недопустимого пошкодження поверхонь тертя, викликаний утворенням місцевих металічних зв'язків, їх деформацією і руйнуванням, який виражається в утворенні тріщин, намащуванні, перенесенні металу і відокремленні частинок з поверхонь тертя. Виникнення металічних зв'язків при цьому зумовлене нагріванням, пом'якшенням, деформацією і контактуванням ювінільних поверхонь. Виділення теплоти вище значень, допустимих для даних матеріалів, зумовлює їх деформацію, вихід ювінільних ділянок і наближення поверхонь на відстань міжатомних радіусів.

Схоплювання II роду, або гарячий задир, виникає й розвивається при терті ковзання за великих швидкостей відносно руху і підвищених питомих тисків, що зумовлює високий градієнт й інтенсивність зростання температури в поверхневих шарах металів та їх термічну пластичність. Термічна пластичність викликає втрату міцності, явища відпуску і плавлення. При цьому утворюються структури рекристалізації, відпуску, гартування і вторинного гартування, структурних змін і фазових перетворень, до різкої зміни механічних властивостей. Схоплювання II роду може проявлятися при сухому терті і граничному змащуванні. При граничному терті воно виникає при високих швидкостях ковзання й тиску і пов'язано з попередніми процесами десорбції мастила. Схоплювання II роду більшою мірою залежить від теплофізичних властивостей матеріалів, теплостійкості, твердості, теплоємності й теплопровідності. Воно виникає при терті металів з різними механічними властивостями. У групі сталей цей вид схоплювання найхарактерніший для загартованих матеріалів.

У практиці роботи деталей машин схоплювання II роду найчастіше виникає в тих спряженнях, робота яких пов'язана зі стійким граничним змащуванням. Ця умова порушується при припиненні регулярного підведення мастила.

8.5. Зминання

Зминання – макроскопічна об'ємна пластична деформація металу деталей машин. Воно пов'язане зі зміною форми при навантаженнях, вищих за границю текучості. Деформація і зминання можуть розповсюджуватися на весь об'єм деталей або на його значну частину. При цьому розміри деталей змінюються, але їх вага залишається постійною. Зминання деталей може виникати при терті і може бути викликане передаванням зусиль, безпосередньо не пов'язаних із коченням або ковзанням поверхонь.

Деформація мікрооб'ємів металу являє собою дуже суттєвий фактор у випадках, коли деталі виготовлені з кольорових сплавів – бронзи, латуні, бабітів, алюмінієвих сплавів. Можливі також випадки зминання сталевих деталей – бандажів, коліс залізничного транспорту і т.п. У цих випадках об'ємна деформація може бути пов'язана з перевищенням допустимих навантажень. Явище зминання слід відрізнити від пластичної деформації в тонких шарах поверхонь тертя.

8.6. Втомне зношування

Втомне руйнування виникає в деталях при терті кочення і є результатом інтенсивного руйнування поверхневих шарів металу, які знаходяться в особливих умовах напруженого стану. Основні характеристики і розвиток втомних пошкоджень визначаються процесами повторної пластичної деформації, зміцненням і зменшенням міцності поверхневих шарів, виникненням залишкових напружень і особливими явищами втоми. Руйнування поверхонь при втомних пошкодженнях характеризується виникненням мікротріщин, одиничних і групових впадин. При цьому виді руйнування швидкості процесів, які зумовлюють явища втоми металів, перевищують швидкості інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, тому процес втомного руйнування стає переважаючим.

Існують граничні величини тисків, за яких повторне багатократне прикладення зовнішнього навантаження викликає характерні зміни тонкої структури, що призводить до втомного руйнування.

Втомне руйнування спостерігається в деталях підшипників кочення, зубчастих колесах, при роботі пари ролик–шайба і багатьох інших парах, де має місце тертя кочення і кочення з ковзанням.

При певній величині проковзування втомне руйнування не розвивається, і залежно від умов ковзання виникає відповідний вид зношування.

Втомне зношування металевого антифрикційного шару підшипників ковзання вперше було помічено в 1918 на бабітових шатунних підшипниках V-

подібних авіаційних двигунів у вигляді тріщин невідомої тоді природи. Як серйозна проблема питання про опір втомі підшипникових сплавів виникло на початку 30-х років 20 століття у зв'язку з експлуатацією автомобільних дизелів і швидким розвитком дизелебудування. Зростання швидкостей ковзання на шийках колінчастих валів і навантажень на підшипники потребувало дослідження і застосування нових матеріалів підвищеної міцності. Однак і в сучасній практиці існує проблема підвищення довговічності підшипників, на які припадає найбільший процент виходу з ладу.

Втомне зношування антифрикційного шару відбувається в підшипниках, що підлягають тривалому навантаженню змінними за напрямком і величиною зусиллями. Принциповим для цього достатньо змінності одного з факторів. Наявність рідинного зношування не є перешкодою процесу. Втомні тріщини беруть початок на поверхні тертя і входять, звужуючись, у глибину шару. Розвиваючись по довжині, дрібні тріщини утворюють сітку на окремих обмежених або великих ділянках поверхні. Розкриття тріщин відбувається під дією пульсуючого тиску мастила. На пізнішій фазі тріщина, досягнувши основи антифрикційного шару, змінює свій напрямок, розповсюджуючись по стику між шаром і основою. У результаті окремі ділянки поверхневого шару відокремлюються в решти шару, а потім викришуються. Велику роль у відокремленні частинок відіграє змащувальний матеріал, який, просякнувши в тріщину, немов підриває метал над нею. Іноді тріщина не доходить до стику і просувається поблизу нього і паралельно йому. Викришування крупних кусків шару може супроводжуватися поверхневими виразками.

Опір втомі антифрикційного шару залежить від режиму роботи і конструкції підшипника, антифрикційного матеріалу, фізичних властивостей з'єднання шару з основою, жорсткості вала та ін. Недостатня жорсткість вала, корпусів і кришок підшипників може стати причиною перекосів цапф відносно підшипників і концентрації навантажень біля країв. Результатом підвищеного крайового тиску на підшипниках може бути тріщиноутворення або пластичний зсув м'якого сплаву. Конусність і овальність шийок, неправильна геометрія форми і невідповідність розмірів вкладишів (особливо тонкостінних) часто служать причиною перенапруження антифрикційного шару.

Чим більший тиск, чим більша амплітуда переміщення до стичних поверхонь, чим швидкохідніша машина, тим швидше вичерпується витривалість підшипникового матеріалу. Швидкість зростання навантаження відіграє важливу роль. Опір втомі високоолов'яних бабітів у парових поршневих машинах при важких навантаженнях вище, аніж у дизелях, які мають більші швидкості прикладання тиску.

Досить значний вплив має робоча температура підшипника на опір втомі, причому цей вплив проявляється як безпосередньо, так і через температурні напруження. Звичайна робоча температура підшипників транспортних дизелів 80...100°C, але є двигуни, в яких температура підшипників досягає 150°C. З підвищенням температури зменшуються всі показники механічної міцності,

особливо у бабітів: при температурі 100°C вони зменшуються приблизно в 2 рази в порівнянні з показниками за нормальної температури. Порівняно невелике число повторних нагрівань і охолоджень у вказаному інтервалі температури призводить іноді до появи тріщин у бабіті поблизу стику з основою вздовж по колу. Утворення тріщин або можливий наклеп сплаву в результаті циклічних термічних напружень несприятливо відображається на опорі втоми. Ці напруження можна зменшити, застосовуючи бронзовий вкладиш, а при алюмінієвому вкладиші вони майже зникають.

Олово, кадмій і цинк з гексагональною будовою кристалів володіють помітною анізотропією термічного розширення. Нерівномірність термічного розширення в різних кристалографічних напрямках не дає можливості кожному кристалу в полікристалі вільно розширюватися при підвищенні температури. Це створює основу для утворення залишкових напружень і пластичної деформації. Досліди показують, що після повторного нагрівання електрополірованих олов'яних зразків поверхня набуває шорсткості як у підшипників на олов'яній основі, що свідчить про наявність зсувів усередині матеріалу. В зразках кадмію пластична деформація проявляється у вигляді тонких ліній зсуву, число яких зростає зі збільшенням числа циклів нагрівання і в міру збільшення інтервалу температури. Фактор анізотропії термічного розширення є важливим в зменшенні опорі втоми сплаву.

Опір втомі бабітів на олов'яній основі тим більший, чим більший вміст міді і сурми, але при цьому підвищується крихкість і погіршуються антифрикційні властивості сплавів. Свинець в олов'яних бабітах є шкідливою домішкою. Уже при 0,5% Pb утворюється багата свинцем з низькою температурою плавлення фаза у вигляді сітки. Руйнування сітки призводить до викришування основних структурних складових. Сплави на кадмієвій основі в особливо важких умовах працездатніші, ніж олов'яні й свинцеві бабіти. Ще більшу опірність втомі мають мідно-свинцеві сплави при порівняно великій товщині шару (більше 2 мм).

Свинцеві бронзи із сіткою свинцю в мікроструктурі володіють високими антифрикційними властивостями, але недостатнім опором втомі. Олово, нікель і срібло в якості легуючих домішок служать для регулювання структури. З підшипникових матеріалів найбільший опір втомі має срібло.

Дуже негативним явищем у парах тертя є утворення тріщин термічного походження. Розтріскування поверхонь тертя в результаті дії температури спостерігається, наприклад, на бандажах залізничних коліс і чавунних барабанах гальмівних механізмів, гальмівних колодках, у плоских антифрикційних парах тощо. Утворення тріщин підвищує зношування поверхонь тертя: гострі кромки виконують різальну дію, а поблизу кромки відбувається викришування матеріалу. Тріщини з часом забиваються продуктами зношування, що діють як абразив. Вихід радіальних тріщин на циліндричну поверхню кілець контактних ущільнень валів, що обертаються, порушується герметичність. Основним способом боротьби з терморозтріскуванням є правильний вибір матеріалів. Чим вища

температуропровідність матеріалу, чим менше температурне розширення, чим пластичніший матеріал, тим менша вірогідність утворення в ньому тріщин. Схильними до температурного розтріскування є крихкі матеріали і матеріали, які мають малу температуропровідність – скло і кераміка, тверді сплави, загартовані сталі, сплави з великим умістом нікелю або вісмуту, які мають невисоку твердість, але володіють низькою теплопровідністю. Мало підлягають розтріскуванню вуглеграфіти, полімери типу ТТРЕ (політетрафторетилен) не підлягають розтріскуванню. Додатковими заходами боротьби з температурним розтріскуванням поверхонь тертя є їх висока точність, якість обробки і ретельне їх припрацювання.

8.7. Корозійне зношування

Корозією називають процес руйнування поверхні металу при хімічній або електрохімічній дії навколишнього середовища. Приклади корозійного руйнування металів різноманітні, бо чиста металева поверхня легко піддається хімічному впливові середовища.

Однак якщо в процесі корозії продукти її утворюють міцно зв'язану плівку, яка ізолює поверхню від корозійного середовища, то метал стає пасивним відносно нього. Процес штучного утворення тонких окисних плівок на поверхні металу для захисту його від корозії і надання виробу кращого вигляду називають пасивацією. Здатність до пасивації мають залізо, нікель, хром, алюміній та інші матеріали.

Хімічна корозія протікає при взаємодії металів із сухим газом, парою і рідкими неелектролітами. Цьому виду корозії підлягають циліндри двигунів, випускні клапани, камери згорання газових турбін, елементи парових котлів, арматура печей і т.п. Серед процесів газової корозії, як одного з різновидів хімічної, найчастіше зустрічається окислення металу при високих температурах за рахунок кисню, повітря або CO_2 , O_2 у продуктах згорання палива.

На поверхні вуглецевої сталі газова корозія проявляється у вигляді плівок окислів уже при температурі $200\text{...}300^\circ\text{C}$. З підвищенням температури приблизно до 600°C у зв'язку з утворенням під дією внутрішніх напружень тріщин у захисній плівці швидкість корозії зростає. При загальному підвищенні температури швидкість корозії швидко зростає й утворюється окалина.

Досліди з утворенням окислів на чавунах у різних газових середовищах показали, що швидкість корозії при зростанні температури від 500 до 800°C збільшується в сухих газах в $11\text{...}13$ разів, а у зволжених – у 20 разів.

На алюмінії і його сплавах захисна плівка швидко досягає найбільшої товщини при температурі $300\text{...}600^\circ\text{C}$, припиняючи процес газової корозії.

Електрохімічна корозія протікає при дії на метал рідких електролітів. Електрохімічна корозія зумовлена неоднорідністю металу в контакт з електролітами.

В деяких машинах можна спостерігати щілинну корозію, при якій корозійне пошкодження зосереджується в зазорі між поверхнями. Зазором можуть бути щілини між листами, в спряженнях і стиках, зони тріщин у металі,

а також щілини між притертими до поверхні сторонніми речовинами. Малодоступні для кисню або електроліту ділянки поверхні металу в зазорі або щілині стають анодом відносно решти поверхні, куди кисень або електроліт має вільний доступ і які стають катодом.

Щілинній корозії підлягають навіть метали, стійкі до інших видів корозії, завдяки утворенню на їх поверхнях плівок, які мають високі захисні властивості.

Пил, навіть хімічно неактивний, осідаючи на незахищену металеву поверхню або знаходячись під шаром мастильного матеріалу, викликає корозію.

Газова корозія, як електрохімічна, не є видом зношування. Корозія може проявлятися навіть при кавітаційному руйнуванні й фреттінг-корозії, в багатьох випадках протікає паралельно з ерозією, завжди її пом'якшує процес тертя, особливо тертя без змащувального матеріалу.

Корозія робочих поверхонь деталей в непрацюючих машинах зменшує зносостійкість пар тертя із таких причин:

- у непрацюючих парах тертя погіршується якість поверхні й після пуску машини знову починається процес припрацювання;
- продукти корозії діють як абразив;
- спрацювання (руйнування і витіснення) продуктів корозії, яке відбувається за дуже короткий проміжок часу, пов'язане з швидкою зміною лінійних розмірів деталей в небажаний бік.

При атмосферній корозії відбувається інтенсивне насичення воднем сталейних деталей. У сталі, насиченої воднем, спостерігається різке зниження опірності механічним навантаженням і зносостійкості. Інтенсивність насичення воднем при атмосферній корозії залежить від вологості, забруднення повітря промисловими газами, наприклад H_2S .

Корозія металу в тому чи іншому середовищі може відбуватися незалежно від того, є тертя чи немає. Сумісна дія корозії, навантаження і механічного зношування підсилює інтенсивність руйнування поверхонь деталей. Бувають випадки, коли корозія стає активною лише завдяки тертю в спряженні деталей.

У циліндропоршневій групі двигунів внутрішнього згорання спостерігається корозійно-механічне зношування. Поршневі кільця і циліндрові втулки (гільзи) двигунів, виготовлені із ливарних чавунів, за наявності електроліту утворюють гальванічні пари, які одне з одним, так і між структурними складовими чавуну – перлітом, графітом, фосфідною евтектикою, а всередині перліту – між цементитом і феритом. Окрім того, внаслідок нерівномірності температури утворюються анодні ділянки в областях з інтенсивнішим опроміненням.

Згорання в циліндрах дизелів палива з підвищеним умістом сірки збільшує інтенсивність зношування поршневих кілець і циліндрових втулок в 3–4 рази, а іноді й більше. Сірка згорає, утворює SO_2 і лише близько 7% її іде на утворення SO_3 у результаті каталітичного окислення SO_2 . Сірчаний ангідрид

SO₃ з водяними парами продуктів згорання утворює сірчану кислоту. Вплив сірки на корозію пов'язаний з явищем конденсації H₂SO₄, випаданням у конденсат концентрованої сірчаної кислоти. Одним із методів зменшення інтенсивності зношування в цьому випадку є нейтралізація кислот за допомогою лужних добавок у змащувальне масло, які випали на стінки. Є ряд емульсійних циліндрових масел, що зменшують інтенсивність. Зношування циліндропоршневої групи при роботі двигуна на паливі з підвищеним умістом сірки, але використання деяких з них супроводжується з підвищенням кородуючої здатності картерного масла відносно антифрикційного металу підшипників унаслідок потрапляння в картер циліндрового масла.

При згоранні в двигунах бензину поряд з водяною парою утворюються двоокиси вуглецю, окисли сірки, азоту і з'єднання бромів або хлору (що виділяються з тетраетилсвинцю, який входить до складу палива в якості антидетонатора). Внаслідок взаємодії з водяною парою ці продукти утворюють кислоти – вугільну, сірчану, азотну й азотисту, бромисто-водневу, соляну, які в основному виносяться з циліндра з відпрацьованими газами.

Проблема корозії підшипників виникла після впровадження в швидкохідні двигуни антифрикційних свинцевих, мідно-свинцевих і кадмієвих сплавів. Антифрикційні сплави певною мірою кородують під впливом органічних кислот, які є в маслах або які утворюються в них під час роботи. Масла, окислюючись, дають перекиси, які викликають реакції, що закінчуються утворенням органічних кислот. Дія останніх на олов'яні бабіти є порівняно слабкою, і значно сильнішою є на свинцево-миш'якові сплави і свинцеві бабіти. За деякими даними корозійна стійкість мідно-свинцевих і кадмієвих сплавів була вирішена при використанні антикорозійних присадок до мастил. Ці присадки являють собою органічні речовини, в яких містяться сірка і фосфор. Пасивація поверхні підшипника відбувається в результаті утворення на ній захисних плівок, наближені до металу шари якої пов'язані з ним хімічно, а наступні шари утримуються силами фізичної адсорбції. Плівки в процесі спрацьовуються (руйнуються) і відновлюються. Для кожної пари сплав – присадка існує певний температурний інтервал, в якому присадка найефективніша. Для більшості присадок він складає 80 ... 120°C. За більш низьких температур корозійний процес випереджає утворення плівки, а при вищій температурі підсилюється дифузія через плівку агресивних інгредієнтів масла.

Особливому різновиду корозійно-механічного зношування підлягають робочі органи технологічного обладнання харчової та переробної промисловості для переробки сировини, що містить жирні кислоти. До таких машин відносяться, наприклад, шнекові преси для виробництва олії, машини для різання, подрібнення, розпилювання і перемішування сировини на м'ясопереробних підприємствах тощо.

Жирні кислоти, поверхнево-активні речовини, з них олеїнова і стеаринова, які у великій кількості вводять до складу рослинних масел і тваринних жирів, проявляють високу активність. Адсорбуючись і проникаючи

в мікро- і субмікротріщини металевої поверхні, поверхнево-активні речовини пом'якшують поверхню, полегшують пластичне деформування в тонкому поверхневому шарі. Справа може дійти до втрати міцності і розривів під дією сили тертя. Це доповнюється корозійною дією кислот. Дослідження деталей шнек-пресів, які використовувалися для виготовлення олії соняшнику, показало, що робочі поверхні деталей, які контактували лише з мезгою і маслом, стають полірованими при значному їх зношенні. Шорсткість робочих поверхонь зменшується з $Rz=0,32 \dots 0,16$ мкм. Зношення протікає у вигляді відшарувань.

У ході технологічних процесів на підприємствах харчової, хімічної, інших галузей промисловості для перекачування кислих і лужних вод, вод з різним умістом солей і зважених частинок широко використовують відцентрові водяні насоси. Для захисту від корозії вали відцентрових насосів облицьовують захисними втулками із бронзи, сталі або чавуну, що працюють у парі тертя із сальниковою набивкою. Якщо матеріал захисних втулок не сприяє утворенню міцних плівок, то зношення буде корозійно-механічним, а інтенсивність його буде залежати від агресивності води. При транспортуванні жомових вод на цукрових заводах середній знос втулок складає $0,23 \dots 0,26$ мкм на 1000 м шляху ковзання, в той час як при транспортуванні річкової води знос захисних втулок складає лише $0,019 \dots 0,044$ мкм на 1000м шляху (при швидкості ковзання $3,38 \dots 4,13$ м/с).

8.8. Кавітаційне зношення

Кавітація означає порожнина. Кавітацією називають процес руйнування поверхонь деталей, які працюють у контакті з рідиною, що рухається зі змінною швидкістю. Кавітаційні руйнування мають локальний характер виражаються в утворенні місцевих заглибин і каверн.

Під кавітацією розуміють явище утворення в потоці рідини, що рухається по поверхні твердого тіла, порожнин у вигляді бульбашок (бульок) і "мішків", наповнених парами, повітрям або газами, розчиненими в рідині, які виділяються з неї. Це явище зумовлене тим, що у швидкісному потоці рідини при його звуженні або за наявності перешкоди на його шляху тиск може впасти до значення, яке відповідає тиску пароутворення за даної температури. При цьому, залежно від опору рідини зусиллям на розтяг, може статися розрив суцільного потоку. Порожнини, що утворюються, заповнюються парою або газами, які виділяються з рідини. Повітря, що втягується в потік, полегшує виникнення кавітації. Парогазові бульбашки, що утворилися розмірами порядку десятих долей міліметра, переміщуючись разом із потоком, потрапляють у зони високих тисків. Пара конденсується, гази розчиняються і в порожнину, що утворилася з великим прискоренням, потрапляють частинки рідини, відбувається відновлення суцільного потоку, що супроводжується ударом.

Кінозйомка показала, що кавітаційна бульбашка може вирости за $0,02$ с до 6 мм в діаметрі й повністю зруйнуватися за $0,01$ с.

При певних типах кавітації на площині в 1 см^2 протягом однієї секунди може утворитися і зруйнуватися понад 30 млн. кавітаційних бульбашок.

Кавітаційному руйнуванню підлягають трубопроводи, гідродвигуни, лопаті гідравлічних турбін і насосів, гребні гвинти, зовнішні поверхні циліндрів двигунів внутрішнього згорання і т.п.

Явище кавітації викликає вібрації, стукіт і струс, що призводить до розхитування кріпильних зв'язків, обривання болтів, зминання різі, руйнування ущільнень і втомного руйнування з'єднань.

Кавітація зменшує ККД машин і гребних валів і викликає безпосереднє руйнування поверхонь деталей у зоні її дії. Вона сприяє закупоренню розпилювачів форсунок двигунів внутрішнього згорання.

У процесі кавітаційного зношування суттєву роль відіграє корозія. Наприклад, у морській воді кавітаційне зношування набагато вище, ніж у прісній за таких же умов.

Попередити кавітацію можна, проектуючи гідромеханічну систему так, щоб у всіх точках потоку тиск не був нижчим тиску пароутворення.

Інтенсивність кавітаційного зношування залежить від температури, властивостей рідини і природи матеріалу деталей. Додавання у воду речовин, які утворюють емульсії (масла й емульгатори), зменшує поверхневий натяг і, відповідно, кавітаційне зношування. Воді температурою 50°C відповідає найбільша інтенсивність зношування.

Кавітаційна стійкість матеріалу визначається його складом і структурою. Підвищення вмісту С у вуглецевій сталі збільшує її стійкість, але, починаючи з $0,8\% \text{ C}$, вона починає падати. Нікель і хром у сталі теж підвищують її стійкість.

Гартування з нагріванням СВЧ, цементація, поверхневе зміцнення значно підвищують кавітаційну стійкість сталей. Те ж саме можна сказати і про покриття хромом. Латунь теж дуже стійка до кавітаційного зношування завдяки своїм властивостям. Добру кавітаційну стійкість мають гумові покриття.

При коливаннях твердого тіла відносно рідини або рідини відносно твердого тіла тиск у рідині на межі розподілу рідини і твердого тіла може впасти і викликати утворення кавітаційних бульбашок. Умови вібраційної кавітації (так іноді називають це явище) залежать від зовнішнього тиску на систему і насиченості рідини повітрям.

Вібраційну кавітацію можуть викликати звукові коливання, особливо ультразвукові. Звукові хвилі прискорюють окислювально-відновлювальні реакції, визначають внутрішньомолекулярні перегрупування речовин, підсилюють диспергування, прискорюють процеси мийки і знежирення поверхонь і викликають коагуляцію дрібних частин. При вібрації не виключається кавітація в тонкому змащувальному шарі між поверхнями, яка може призвести до викришування матеріалу підшипників ковзання, зубів колес і поверхонь інших деталей.

Вібраційна кавітація проявляється, наприклад, і в двигунах внутрішнього згорання, особливо на зовнішніх поверхнях гільз у результаті їх коливань від ударів поршня. Знос від кавітації зовнішньої стінки гільзи може бути в 3...4

рази більшим, ніж знос внутрішньої поверхні від дії поршневих кілець. Велику небезпеку становить при цьому кавітаційне руйнування опірних поясів гільз і блока циліндрів, що призводить до проникнення охолоджувальної рідини в порожнину циліндра і картер двигуна.

8.9. Ерозійне зношування

Явище механічної ерозії металів було відомо в техніці як руйнування поверхонь деталей машин і механізмів під дією повторюваних багатократно ударів струменя рідини або газових потоків, які викликають місцеві пошкодження. Руйнування металів під дією електричних зарядів також відносять до ерозії.

Ерозію поділяють на газову, кавітаційну, абразивну й електричну. Кожен вид ерозії має підвиди.

Ерозійна дія високошвидкісного потоку рідини, газу або пари в чистому вигляді складається з тертя суцільного потоку і його ударів по поверхні. В результаті тертя відбувається розхитування і вимивання окремих об'ємів матеріалу. Швидкість зношування в цьому випадку мала. Динамічна дія потоку або струменя є порівняно більшою. Залежно від властивостей матеріалу можливі викидання окремих об'ємів або групи зерен із несприятливою орієнтацією стосовно прикладених сил. Рідина поводить себе подібно клину, розсуваючи бокові стінки мікротріщин.

Ерозія в початковий період на гладкій поверхні розвивається повільно, але після появи вражених місць посилюється. Швидкість ерозійного зношування залежить від властивостей твердих частин, їх концентрації, швидкості руху в потоці й ступеня агресивності води.

Ерозійному зношуванню підлягають сталеві і чавунні поршневі кільця авіаційних двигунів, золотники гідравлічних агрегатів, підшипники гребних валів, що піддаються впливу води, поверхневі шари насосів, гідравлічних турбін, трубопроводів і їх арматури, центрифуг і т.п.

Ерозійне зношування в багатьох випадках було б слабкішим, якби не було в потоці сторонніх частинок. Лопатки ступенів низького тиску парових турбін за відсутності проміжного перегріву підлягають ударам крапельок води, які містяться в насиченій парі і мають швидкість потоку 300...400 м/с; не виключена також деяка роль хімічних явищ. Найкращий опір ерозійному зношуванню в цьому випадку показали лопатки із аустенітних сталей.

Якщо потік містить абразивні частинки, то зношування стає ерозійно-абразивним.

Ерозія і корозія дуже часто протікають сумісно. Корозійно-ерозійне зношування являє собою різновид корозійно-механічного зношування. Роль обох факторів залежить від співвідношення механічної і хімічної дій на матеріал.

Сумісну дію газової корозії й ерозії можна спостерігати, наприклад, у випускних клапанах високонапружених деталей двигунів і на входних кромках лопаток компресора газотурбінних двигунів. При заміні лопаток з алюмінієвих сплавів на сталеві ерозійне зношування кромки лопаток стало неактуальним.

Поверхневий шар деталей насосів, центрифуг, сит, грохотів, гідравлічних турбін, трубопроводів і їх арматури та подібних деталей машин і технологічного обладнання розмивається потоком води, який містить абразив. Швидкість ерозійно-абразивного зношування залежить від властивостей твердих частинок, їх концентрації, швидкості руху в потоці й ступеня агресивності води.

Агресивність середовища вносить особливості в процес ерозійного зношування, тому не всі закономірності абразивного процесу є справедливими для ерозійно-абразивного зношування. В цьому випадку матеріали повинні мати корозійну стійкість і опір абразивній дії. Ступінь цих якостей повинна варіюватися залежно від впливу кожного фактора. Це ж необхідно враховувати і при корозійно-ерозійному зношуванні.

Гаряча газова ерозія пластичних мас і теплозахисних покриттів в останні роки отримали назву абляції. Це явище спостерігається, наприклад, під впливом аеродинамічного нагрівання при входженні балістичного снаряда в щільні шари атмосфери або під впливом високонагрітих відпрацьованих газів при роботі ракетних двигунів. Стійкість пластмас до абляції залежить від теплопровідності. На противагу металам пластмаси повинні мати низьку теплопровідність. Деталі, відлиті під високим тиском, краще чинять опір абляції в порівнянні з деталями, відлитими при низькому тиску.

8.10. Зношування при фретінг-корозії

Фретінг – це процес руйнування сильно контактуючих між собою поверхонь пар метал–метал або метал–не метал у результаті малих коливальних відносних переміщень. Для збудження фретінг-корозії достатньо переміщень поверхонь з амплітудою 0,25 мкм. Руйнування полягає в утворенні на поверхнях, що дотикаються, дрібних виразок і продуктів корозії у вигляді плям, порошку. Цьому виду зношування піддаються не тільки вуглецеві, але й корозійностійкі сталі в парах тертя сталь–сталь (можуть бути як однойменні, так і різнойменні), сталь–олово або алюміній, а також чавун–бакеліт чи хром та інші.

Окислення у фретінг-процесі має специфічний характер, незвичний для умов нормального тертя, і протікає досить інтенсивно. Процес схоплювання, також різко виражений, спостерігається при контактуванні багатьох матеріалів. Значна інтенсифікація і схоплювання викликані динамічним характером навантаження, при якому на контактні поверхні різко збільшується градієнт деформацій і температур.

Фретінг-процес виникає при терті ковзання з дуже малим зворотно-поступальним переміщенням і динамічному навантаженні. Цьому виду руйнування підлягають різноманітні матеріали; він можливий при сухому терті і в умовах змащування.

Внаслідок малої амплітуди переміщень поверхонь контактування, пошкодження зосереджуються на невеликих ділянках дійсного контакту. Продукти зношування не можуть вийти із зони контакту, в результаті чого виникає високий тиск і збільшується їх абразивна дія на основний метал.

Таблиця 8.1

Стійкість матеріалів до фретінг-корозії за різних амплітуд коливань

Марка матеріалу нерухомого зразка	Втрата маси нерухомого зразка, мг, при амплітуді коливань, мм			
	0,03	0,08	0,15	0,3
Сталь 20	1	1,25	2,5	12,7
30ХГСА	0,5	1	1,7	9,0
18Х2Н4МА	1,8	2,1	2,0	9,1
Д16	0,4	1,4	3,5	7,7

Примітка. Матеріал рухомого зразка – сталь 30ХГСА.

Дослідження впливу амплітуди коливань поверхонь на ступінь пошкоджуваності металів при фретінг-корозії показали, що є приблизна лінійна залежність втрати маси металу від амплітуди. Виявилось, що при переході до амплітуди 0,3 мм зносостійкість сталей різко зменшується і наближається до лінійної залежності. Випробування проводили при частоті 1500 хв⁻¹, контактному тиску 12,5 МПа, без мастила (таблиця 8.1).

Підвищення контактного тиску при фретінг-корозії призводить до підвищення пошкоджень. Є дані, що між швидкістю, зношуванням і навантаженням існує прямо пропорційна залежність (таблиця 8.2).

Таблиця 8.2

Залежність зношування від навантаження при фретінг-корозії

Марка матеріалу нерухомого зразка	Втрата маси нерухомого зразка, мг, при амплітуді коливань, мм			
	0,5	1	1,5	2
Сталь 20	7,5	9,4	12,5	16,5
30ХГСА	14,2	14,8	15,1	15,5
18Х2Н4МА	10,2	11,4	14,3	16,0
Д16	7,8	12,9	14,9	25,0

Примітка. Матеріал рухомого зразка сталь 30ХГСА.

Дослідження впливу середовища на зношування при фретінг-корозії показали, що в сухому повітрі інтенсивність зношування значно вища, аніж при вологості повітря від 45 до 100%. Наявність пари води зменшує інтенсивність фретінг-корозії. В рідкій фазі інтенсивність зношування при фретінг-корозії набагато нижча, навіть у розчині їдкого натрію, не кажучи вже про дистильовану воду, втрата маси матеріалу була в кілька разів менша, ніж у середовищі атмосферного повітря.

Як і при інших видах зношування, немає універсальних засобів боротьби з фретінг-корозією. Якщо виходити з того, що взаємне мікрозміщення поверхонь не може бути виключене внаслідок пружності матеріалу, то для боротьби з фретінг-корозією слід: а) зменшити мікрозміщення; б) зменшити сили тертя; в) зосередити ковзання в проміжному середовищі.

Зменшити відносне мікрозміщення можна шляхом надання деталям відповідних конфігурацій або через підвищення сили тертя. Наприклад, застосування таких елементів розвантаження, як виточки в ступицях і підвісних конічних ступецах замість циліндричних підвищує границі витривалості валів і осей. Ці заходи зменшують не лише теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, але й просковзування.

Сили тертя можна збільшити, підвищивши тиск шляхом зменшення площі дотику деталей або підвищивши коефіцієнт тертя за рахунок збільшення шорсткості поверхонь. Дієвим методом збільшення сили тертя є нанесення на поверхню електролітичного шару міді, олова, кадмію, срібла або золота.

Зосередження ковзання або перенесення його в проміжне середовище дозволяє зменшити питому силу тертя (як відомо, для цього достатньо знизити тиск або зменшити коефіцієнт тертя). В умовах фретінг-корозії звичайні матеріали не впливають на коефіцієнт тертя, бо гранична плівка в процесі руйнування не відновлюється і швидко руйнується. Молібденіт у вигляді порошку або пасти зменшує пошкоджуваність, але з цього приводу є різні думки і тому цей захід не можна вважати універсальним. Аналогічно діють свинцеві білила або їх суміш з MoS_2 (молібденітом). Для зменшення сили тертя при фретінг-корозії застосовують фосфатування поверхонь або доцільно покривати їх парафіном. Свинцеві й індієві покриття при малому опорі зсуву відіграють роль твердих змащувальних матеріалів. Добрий опір фретінг-корозії чинять пари сталь–ПТРЕ або поліаміду, поліхлорвінілу. Дієвим заходом можуть стати гумові прокладки. Зменшити пошкоджування від фретінг-корозії можна, збільшуючи твердість однієї з деталей. При збільшенні твердості сталі зменшується взаємне впродження деталей, що знижує інтенсивність зношування. Окрім того, продукти зношування менші за розміром, їх абразивна дія слабкіша.

РОЗДІЛ 9

ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

9.1. Змащувальні матеріали. Класифікація змащувальних матеріалів

Мастила застосовують для зниження зношеності й опору тертю деталей машин. При цьому основним є зниження, а, в міру можливості, запобігання зношуваності – найважливішому фактору, що негативно впливає на довговічність машин і їх працездатність. Крім цих двох функцій, мастила мають відводити тепло із зони тертя, захищати змащені поверхні від корозійного впливу зовнішнього середовища, ущільнювати зазори між сполученими деталями, видаляти із зони тертя продукти зношеності, корозії та інші забруднення, а в окремих випадках виконувати функції, що не стосуються змащення, наприклад, передавати зусилля у гідравлічних системах.

Здатність мастила виконувати і зберігати всі ці функції якомога триваліший час визначається його експлуатаційними властивостями.

Щоб поліпшити експлуатаційні властивості мастил, у них уводять присадки. Мастило з присадками називають легованим, а його нелеговану основу – базовим мастилом.

Мастильні матеріали класифікують за агрегатним станом, видом вихідної сировини, способом здобуття та за цільовим призначенням.

За агрегатним станом мастильні матеріали розрізняють рідкі (мастила), пластичні (змащення), тверді та газоподібні, а за видом вихідної сировини – нафтові (мінеральні), тваринні, рослинні й синтетичні. Нафтові мастила поділяють на дистильовані, залишкові й компаундні.

Перелік мастил за цільовим призначенням дуже великий. Їх поділяють на мастила моторні, трансмісійні осьові, індустріальні, гідравлічні, турбінні, компресорні, електроізоляційні і технологічні для приладів.

Класифікація автомобільних мастил. Визначальними показниками вибору автомобільних мастил є в'язкість і експлуатаційні властивості.

Класифікація моторних мастил за в'язкістю

Класифікація моторних мастил за ГОСТом 17479.1. Відповідно до ГОСТу 479.117 залежно від величини кінематичної в'язкості за температури 100°C моторні мастила поділяють на 22 класи: чотири зимові (З₃–З₆), вісім літніх (Л₆–Л₂₄) і десять всесезонних (ЗЗ/8–Л₆/16). Дробові класи вказують, що за в'язкістю за температури мінус 18°C мастило відповідає класу, зазначеному в чисельнику, а за в'язкістю за температури 100°C – класу, зазначеному в знаменнику.

Класифікація в'язкості моторних мастил за SAE J 300. Відповідно до SAE J 300 моторні мастила поділяють за в'язкістю на шість зимових (DW – 25W) і вісім літніх (20—60) класів.

Для всесезонних моторних мастил упроваджено подвійне номерне позначення (наприклад, SW-30, 15W-40, 20W50 і т.д.), причому перша цифра означає відповідність зимовому класу в'язкості за низькотемпературними властивостями, а друга – відповідність літньому класу за високотемпературними.

Класифікація трансмісійних мастил за в'язкістю

Класифікація в'язкості трансмісійних мастил за ГОСТом 17479.2. Відповідно до ГОСТу 17479.2 залежно від величини кінематичної в'язкості за температури 100°C за ГОСТом 33 трансмісійні мастила поділяють на чотири класи (9,12,18,34).

Класифікація в'язкості трансмісійних мастил за SAE J 306. Відповідно до SAE J 306 трансмісійні мастила поділяють на сім класів в'язкості: чотири зимові (70W–85W) і 3 літні (90–250).

Для всесезонних моторних мастил уведено подвійне номерне позначення (наприклад, 75W-90, 85W-140 і т. д.), причому перша цифра позначає відповідність зимовому класу в'язкості за низькотемпературними властивостями, а друга – відповідність літньому класу за високотемпературними властивостями.

Інші класифікації мастила за в'язкістю

Класифікація в'язкості заAGMA. Класифікація Американською асоціацією виробників зубчастих передач (AGMA) була розроблена для редукторних мастил. Відповідно до неї мастила класифікують залежно від в'язкості, вимірюваної в універсальних секундах Сейболта SUS за температури 100°C і 210°C і наявності в мастилах протизадирних (EP) присадок.

Класифікація в'язкості за ISO. Класифікація в'язкості за ISO 3448 розроблена для індустріальних мастил, які залежно від кінематичної в'язкості за температури 40°C поділяють на 18 класів. У повному обсязі ця класифікація використовується у ГОСТі 17479.4-87 «Мастила індустріальні. Класифікація і позначення».

Класифікація базових мастил за в'язкістю. У США використовується класифікація базових мастил залежно від їх в'язкості, що вимірюється в універсальних секундах Сейболта. Мастила селективного очищення (Neutral (N) – нейтральне) класів 100 N, 150 N, 200 N, 300 N, 400 N, 500 N, 600 N і 700 N регламентуються за в'язкістю за температури 100°C, а мастила залишкові (Brightstock (Brt) – брайтсток) класів 135 Brt і 150 Brt – за в'язкістю за температури 210°C.

Класифікація моторних мастил за експлуатаційними властивостями

Класифікація моторних мастил за ГОСТом 17479.1. За цим ГОСТом, залежно від сфери застосування, моторні мастила поділяють на групи А, Б, В, Г, Д і Е (табл. 9.1).

Таблиця 9.1

Групи моторних мастил за експлуатаційним призначенням згідно з ГОСТ 17479.1-85

<i>Група мастил за експлуатаційними властивостями</i>		<i>Рекомендована сфера застосування</i>
1		2
А		Нефорсовані бензинові двигуни і дизелі
Б	Б ₁	Малофорсовані бензинові двигуни, що працюють в умовах, які призводять до утворення високотемпературних відкладень і корозії підшипників
	Б ₂	Малофорсовані дизелі
В	В ₁	Середньофорсовані бензинові двигуни, що працюють в умовах, які сприяють окиснюванню мастил й утворенню відкладень усіх видів мастильного матеріалу
	В ₂	Середньофорсовані дизелі підвищеними вимогами до антикорозійних, протизносних властивостей мастил і здатністю запобігати утворенню високотемпературних відкладень
Г	Г ₁	Високофорсовані бензинові двигуни, що працюють у важких експлуатаційних умовах, які сприяють окиснюванню мастил, утворенню відкладень усіх видів і корозії
	Г ₂	Високофорсовані дизелі без наддування або з помірним наддуванням, що працюють в експлуатаційних умовах, які сприяють утворенню високотемпературних відкладень
Д	Д ₁	Високофорсовані бензинові двигуни, що працюють в експлуатаційних умовах, важчих ніж для мастил групи Г
	Д ₂	Високофорсовані дизелі з наддуванням, що працюють у важких експлуатаційних умовах або коли застосовуване паливо вимагає використання мастил з високою нейтралізуювальною здатністю, антикорозійними і протизносними властивостями, малою здатністю до утворення усіх видів відкладень
Е	Е ₁	Високофорсовані бензинові двигуни і дизелі, що працюють в експлуатаційних умовах, важчих, ніж для мастил груп Д ₁ і Д ₂
	Е ₂	Вирізняються підвищеною диспергувальною здатністю, кращими протизносними властивостями

Позначення моторних мастил, що застосовуються в автомобілях, тракторах, тепловозах, сільськогосподарській, дорожній, судновій та іншій техніці, встановлено ГОСТом 17479.1-85 (зміни 1–3). Після прийняття зміни 3 збільшилася кількість класів в'язкості і змінились їхні границі, уведено нові групи за призначенням й експлуатаційними властивостями. При цьому трохи змінилась і термінологія.

Класифікація моторних мастил за ААІ. Стандарт Асоціації автомобільних інженерів (ААІ) Російської Федерації (СТО ААІ 003-98) установлює класифікацію моторних мастил для автомобільних двигунів, побудовану за типом відкритих класифікацій API і ACEA, установлює загальноприйняті принципи позначення мастил з указанням їх торговельної марки і регламентує загальні технічні вимоги до них.

Мастила класифікують за в'язкістю – температурними й експлуатаційними властивостями. Залежно від в'язкісних характеристик за додатних і від'ємних температур моторні мастила поділяють на класи в'язкості за 8AE1300.

Класифікація моторних мастил за ACEA. Класифікація встановлює мінімальний рівень якості моторних мастил для бензинових двигунів, а також мало- і великовантажних дизелів, прийнятних для членів ACEA.

Позначення мастил відповідно до класифікації ACEA включає ряд букв і цифр, що позначають клас і категорію, а також додаткові відомості – номер року введення або чергового видання.

Класифікація моторних мастил API. Класифікація API неодноразово переглядалася, змінювалась і доповнювалась. Принциповою основою класифікації є поділ мастил на дві категорії і ряд класів.

Категорія S (Service) – мастила для чотиритактних бензинових двигунів легкових автомобілів, мікроавтобусів і автофургонів. У порядку зростання експлуатаційних характеристик у цю категорію включено такі класи мастил: SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI.

Категорія C (Commercial) – мастила для чотиритактних і двотактних дизелів автомобілів, сільськогосподарської і дорожньо-будівельної техніки. У порядку зростання експлуатаційних характеристик включено такі класи мастил: CA, CB, CC, CD II, CE, CF, CF-2, CF-4, CG-4 і CH-4.

Цифри і позначення означають, що мастила класів CD II, CF-2 призначені для використання в двотактних дизелях, а CF-4 і CG-4 – для чотиритактних.

Класифікація моторних мастил ILSAC. Класифікація Міжнародного комітету зі стандартизації та допуску до застосування мастильних матеріалів (ILSAC) поки містять два класи мастил для чотиритактних бензинових двигунів – GF-1, GF-2. За своїми експлуатаційними властивостями ці класи майже ідентичні. Основна відмінність полягає в тому, що мастила класів OP-1 і CP-2 мають енергозберігаючі властивості. Крім того, ці мастила мають бути всесезонними, причому зимова характеристика обмежується трьома найменш в'язкими класами (OW, 5W, 10W), а літній клас може бути кожним.

Класифікація трансмісійних мастил за експлуатаційними властивостями. *Класифікація трансмісійних мастил за ГОСТом 17479.2.* Залежно від рівня експлуатаційних властивостей трансмісійні мастила поділяють на п'ять груп: ТМ 1, ТМ 2, ТМ 3, ТМ 4, ТМ 5.

Позначення мінеральних трансмісійних мастил, що застосовуються для змащування агрегатів трансмісій автомобілів, тракторів, тепловозів, сільськогосподарських, дорожніх, будівельних машин і суднової техніки, встановлено ГОСТом 17479.2-85. Позначення складається з груп знаків, перша з

яких позначається буквами ТМ (трансмiсійне мастило); друга група знаків позначається цифрами і характеризує належність до групи мастил за експлуатаційними властивостями; третя – позначається цифрами і характеризує клас кінематичної в'язкості.

Наприклад, ТМ-5-9₃ розшифровується так: ТМ – трансмісійне мастило; 5 – мастило з протизадирними присадками високої ефективності та багатофункціональної дії; 9 – клас в'язкості; 3 – мастило містить згущувальну присадку.

Класифікація трансмісійних мастил за API. Відповідно до цієї класифікації всі трансмісійні мастила залежно від рівня експлуатаційних властивостей поділяють на дев'ять класів: GL-1, GL-2, GL-3, GL-4, GL-5, GL-6, MT-1, PG-1 і PG-2. Клас GL-6 на сьогодні не використовується, оскільки класифікаційні вимоги до цих мастил застаріли. Не набули поширення класи PG-1, PG-2, введені 1988 року.

Класифікація багатофункціональних мастил для тракторів. Для експлуатації тракторів, дорожньої і будівельної техніки потрібні моторні, трансмісійні та гідравлічні мастила. Таке різноманіття типів мастил створює труднощі у процесі експлуатації техніки, тому очевидним є прагнення фахівців замінити їх одним багатофункціональним мастилом, здатним працювати в усіх агрегатах мобільної техніки і начіпних агрегатах. Вирішення цього завдання досить непросте, оскільки вимоги до різних типів мастил різні, а іноді й суперечливі. Проте завдяки досягненню компромісу створено мастила типу STOU і UUTO.

Мастила типу STOU мають бути працездатними у двигунах, агрегатах трансмісій (коробках передач, головних передачах, кінцевих передачах, гідравлічних гальмах, муфтах зчеплення) і гідравлічних пристроях для навішування знарядь, відповідати вимогам класифікацій за в'язкістю, експлуатаційними властивостями моторних і трансмісійних мастил, а також спеціальним вимогам фірм-виробників техніки.

Мастила типу UUTO повинні відповідати вимогам класифікацій за в'язкістю, експлуатаційними властивостями трансмісійних мастил і спеціальним вимогам фірм-виробників техніки. Подальшим розвитком мастил типу UUTO є мастила ERTTO на основі рослинних базових мастил, що відповідають підвищеній вимозі захисту навколишнього середовища.

9.2. Експлуатаційно-технічні вимоги до мастил. Основні властивості мастил

Великі питомі навантаження і високі температури у вузлах тертя, вплив агресивних середовищ, пари води, відпрацьованих газів і постійний контакт з киснем повітря – усе це не дуже сприятливо позначається на показниках якості мастила. Ускладнює роботу також широкий діапазон зміни температури навколишнього повітря і навантаження, за яких працюють двигуни.

Порівняно недавно функціональні властивості багатьох мастил оцінювали

насамперед за їхніми в'язкісно-температурними характеристиками і мастильною здатністю. На тепер вимоги до експлуатаційних властивостей мастил значно розширилися і підсилилися, що й зумовило введення більшої кількості показників властивостей мастил. У загальному мастила повинні мати:

1) оптимальні в'язкісно-температурні властивості, що забезпечують рухливість за низьких температур і важливі для створення міцної мастильної плівки на робочих поверхнях у широкому діапазоні температур;

2) змащувальні властивості, що забезпечують мінімізацію тертя і різних видів зношування;

3) високу стійкість до окиснювання, що запобігає значній зміні хімічного складу мастил у процесі їх роботи;

4) мийні властивості, що впливають на зниження схильності мастил до утворення різних відкладень на робочих поверхнях і в системі змащення;

5) безперебійне надходження до усіх вузлів тертя двигуна;

6) надійне охолодження тертьових деталей і відведення теплоти від вузлів тертя;

7) винесення продуктів зношування із зони тертя і захист цієї зони від проникнення в неї шкідливих домішок із зовнішнього середовища;

8) відсутність корозійної агресивності стосовно деталей двигуна, захисту від шкідливого впливу кисню повітря і парів;

9) якомога більшу хімічну стабільність, відсутність здатності до окиснювання в умовах високих температур і безпосереднього контакту з гарячими деталями і до утворення нагару, лакових плівок і липких відкладень (шламу) на внутрішніх поверхнях двигуна;

10) протипінні властивості (здатність не утворювати стійкої і повільно спадної піни);

11) мінімальну токсичність;

12) низьку вартість і широку сировинну базу.

Крім того, в мастила має бути низька випаровуваність, піноутворююча здатність й емульгованість, мастило не має чинити негативного впливу на ущільнювальні матеріали, не бути токсичним, не піддаватися біопошкодженням, не змінювати властивостей під час збереження і регенерації, легко транспортуватись і не викликати забруднень навколишнього середовища.

Такі вимоги дуже різноманітні та суперечливі, вони роблять завдання створення надійних і ефективних мастил винятково важким. Їх можна задовольнити тільки за умови, що такі мастила мають необхідні фізико-хімічні властивості, такі, наприклад, як в'язкість, температура застигання, хімічна стабільність і ряд інших.

Основні властивості мастил. В'язкість – найважливіша фізична (об'ємна) властивість мастил, оскільки її величина передусім визначає можливості рідкого змащування поверхонь тертя.

В'язкістю, або внутрішнім тертям рідини називають опірність відносному зрушенню її шарів під дією прикладеної до неї сили. Така сама сила створює в різних рідинах різні швидкості зрушення шарів, розміщених один від одного на

однаковій відстані. Таким чином, в'язкість впливає на несучу здатність мастильного шару і характеризує пошкодження мастил в експлуатації.

В'язкість може бути динамічною і кінематичною. Динамічна в'язкість, або коефіцієнт в'язкості η кількісно характеризує опір рідини зсувові її шарів. У системі СІ одиницею динамічної в'язкості є паскаль-секунда, що дорівнює динамічній в'язкості середовища, дотичне напруження якого (за ламінарної плинності й різниці швидкостей шарів, розміщених на відстані 1 м по нормалі до швидкості, яка дорівнює 1 м/с) дорівнює 1 Па. Динамічна в'язкість ньютонівських рідин є фізичною константою, що залежить тільки від температури і тиску.

Слід зазначити, що ньютонівськими рідинами називають рідини, які підпадають під закон Ньютона. Ньютонівські рідини характеризуються тим, що напруження зрушення τ у них є лінійною функцією градієнта швидкості зрушення dV_x/dy .

У мастильній техніці в'язкість мастил здебільшого виражається в одиницях кінематичної в'язкості.

Кінематична в'язкість ν являє собою відношення динамічної в'язкості η даної рідини до її густини ρ за одних і тих самих температур та атмосферного тиску:

$$\nu = \eta / \rho .$$

У системі СІ одиницею кінематичної в'язкості є квадратний метр за секунду ($\text{м}^2/\text{с}$), що дорівнює кінематичній в'язкості, за якої динамічна в'язкість середовища зі щільністю $1 \text{ кг}/\text{м}^3$ дорівнює $1 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Від в'язкості мастила залежать:

- легкість пуску двигуна в холодну погоду;
- потужність двигуна (утрата на тертя);
- зношування деталей тертя;
- витрата палива;
- витрата мастила.

Найважливішим показником якості мастила є залежність в'язкості від температури коливання, яка у широких межах у несприятливих випадках може настільки змінюватися, що умови його роботи будуть розрізнятися докорінно.

Слід зазначити, що зі зниженням температури від 100 до 50°C в'язкість мастила може збільшитися в 4–5 разів. З охолодженням моторних мастил до 0°C і тим більше до мінусових температур їх в'язкість збільшується в сотні і тисячі разів.

Залежність в'язкості від тиску. З підвищенням тиску в'язкість мастил зростає. Ступінь зміни в'язкості залежить від хімічного складу мастил і температури. Установлено такі закономірності:

- тваринні і рослинні мастила змінюють в'язкість під тиском менше, ніж мінеральні;
- мінеральні мастила з парафіністих нафт змінюють в'язкість під тиском менше, ніж мінеральні мастила зі смолистих нафт;

- з підвищенням температури мастила вплив тиску на його в'язкість зменшується.

За високого тиску в'язкість може зрости настільки, що мастило втрачає властивості рідини і перетворюється в пластичне або «квазітверде» тіло. Затвердіння вуглеводного мастила відбувається за тиску 7000 кг/см^2 , ефірного мастила – за $20\,000 \text{ кг/см}^2$, а полісилоксанових мастил різної структури – за тисків $5\,000 \dots 25\,000 \text{ кг/см}^2$.

У багатьох високонавантажених деталях, що працюють в умовах герцівського контакту (зубчасті передачі, підшипники кочення, кулачкові механізми), максимальні питомі тиски на поверхні тертя й у мастильному шарі можуть досягти кількох десятків тисяч кілограмів на квадратний сантиметр.

Залежність в'язкості мастила від температури і тиску у реальних умовах його роботи в підшипниках сприятливо впливає на працездатність цього вузла. За збільшенням навантаження на підшипник підвищується тиск у мастильному шарі і його в'язкість. У свою чергу, підвищення в'язкості призводить до збільшення гідродинамічних втрат, тепловиділення в підшипнику, температури, а потім і до зменшення в'язкості мастил. Таким чином, здійснюється авторегулювання в'язкості мастила і несучої здатності підшипника. У цьому процесі однаково важливі чутливість в'язкості до зміни тиску і температури.

Густина – це співвідношення маси тіла до його об'єму; її розмірність – г/см^3 . Густина мастила тим більша, чим вища номінальна в'язкість, однак є численні винятки, що залежать від хімічного складу мастил.

Густина мастил змінюється в межах $0,78 \dots 0,97$. Густина деяких синтетичних мастил вища за одиницю.

З підвищенням температури мастила його густина дещо зменшується в результаті теплового розширення. Зі збільшенням тиску густина мастил трохи зростає внаслідок стисливості.

Стисливість мастил, як і інших матеріалів, характеризується модулем пружності за всебічного стискування. Вимоги до стисливості різні і можуть бути навіть протилежними залежно від призначення мастила. У мастил для змащення деталей, підданих ударним навантаженням, має бути демпфувальна дія, для чого бажаний низький модуль пружності, тобто значна стисливість.

Гідравлічні мастила, що передають рух, повинні відзначатися високою густиною і, отже, мінімальною стисливістю.

Нафтові мастила мають порівняно малу стисливість, наприклад, за тиску $4\,000 \text{ кг/см}^2$ їх об'єм зменшується на $15 \dots 20\%$. Значно більша стисливість притаманна полісилоксановим (силіконовим) мастилам. Модуль пружності мастил трохи зменшується з підвищенням температури, збільшується – зі зростанням тиску.

Теплоємність. Теплові властивості мастил впливають на їхні мастильні властивості, оскільки визначають умови тепловідведення від поверхонь тертя. Очевидно, що зі збільшенням теплоємності і теплопровідності мастила дія його як охолоджувального агента поліпшується і, за інших рівних умов, може бути допущена більш висока температура в зоні контакту поверхонь тертя. Однак

значення як питомої теплоємності, так і температуропровідності різних мастил можуть коліватися залежно від сорту мастила лише у вузьких межах, тож можливості вибору тут досить обмежені.

Теплоємність різних нафтопродуктів коливається в досить вузьких межах – $1700 \dots 2500 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / [\text{с}^2 \cdot \text{град}]$ – і помітно змінюється залежно від зміни температури, зростаючи з її збільшенням. З підвищенням тиску теплоємність спочатку зменшується за тиску $200 \dots 300 \text{ МПа}$, досягаючи мінімуму, що становить $0,9$ первісного значення, а потім зростає, але досить повільно. Теплоємність нафтопродуктів зменшується зі зростанням густини, тобто зі зростанням молекулярної маси нафтопродуктів парафінового ряду. Залежність вуглеводнів ароматичного ряду обернена.

Коефіцієнт об'ємного розширення мастил є значущим для розрахунку місткості резервуарів мастильних систем. Значення цього коефіцієнта залежить від густини мастила. Зі зменшенням густини значення коефіцієнта збільшується, тому малов'язкі мастила зазвичай характеризуються більшим об'ємним розширенням, ніж мастила високої в'язкості. Коефіцієнт об'ємного розширення мастил густиною $0,82 \dots 0,96$ відповідно перебуває в межах $(91 \dots 60) \cdot 10^{-5}$.

Теплопровідність (або коефіцієнт теплопровідності) – кількість тепла в калоріях, що проходить за 1 с через площу 1 см^2 шару товщиною 1 см за різниці температур 1°C . Одиниця виміру – $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$. Для води вона становить $1,43$, нафти – $0,35$, парафіну – $0,60$.

З підвищенням температури теплопровідність мінеральних мастил і органічних рідин зменшується.

Застигання. У разі зниження температури мастила його в'язкість зростатиме до застигання. Характер і температура застигання різні залежно від типу мастил.

Одні мастила до повного затвердіння зберігають однорідність складу. Інші ж, у складі яких є утримувальні парафінові вуглеводні, застигають у результаті виділення у процесі охолодження твердої фази – кристалів парафіну, що за вищої температури містяться в мастильному матеріалі в розчиненому стані.

Зі зниженням температури кількість і розміри кристалів парафіну збільшуються, і з досягненням деякої критичної точки (що залежить від градієнта швидкості зсуву в мастильному матеріалі) відбувається структурування мастильного матеріалу – кристали зростаються в сітку, усередині якої утримуються рідкі вуглеводні. Мастильний матеріал при цьому втрачає рухливість, тобто застигає. Температура застигання мастильного матеріалу тим вища, чим більший вміст у ньому парафінових вуглеводнів з високою температурою плавлення.

Стабільність мастильних матеріалів. Під стабільністю мастильних матеріалів розуміють їх здатність зберігати без зміни властивості в процесі експлуатації й зберігання. Незворотна зміна цих властивостей у результаті окиснювання є старіння мастила. Його інтенсивність – головний фактор, що визначає термін експлуатації мастильного матеріалу в трибосистемі.

Стабільність проти старіння мастильного матеріалу залежить, крім окиснювання, також від його випаровуваності, а мастильних матеріалів, до складу яких входять полімери, – від можливої деполімеризації, тобто деструкції полімерів від механічних і термічних впливів у процесі експлуатації. Стабільність варто вважати найважливішою властивістю мастила після в'язкості, оскільки ця властивість визначає його довговічність, тобто термін експлуатації в об'єкті змащення. Найбільше на стабільність мастильного матеріалу впливають такі умови експлуатації, як температура, контакт із повітрям та ін.

Піноутворення мастильних матеріалів. Під час проходження через шестерні насоса, редуктори та інші агрегати двигуна, а також унаслідок розбризкування і збовтування мастильний матеріал насичується повітрям. Повітря в мастильному матеріалі в розчиненому вигляді може становити об'ємних часток 7...10%; у вигляді повітряно-масляної емульсії – 50...60%, більше – коли дрібні бульбашки повітря дисперговані по всій масі мастильного матеріалу; у вигляді піни – коли велика насиченість повітрям найтоншої мастильної плівки утворює на поверхні мастильного матеріалу структуру з низьким умістом мастила.

Шкідливі наслідки піноутворення полягають у тому, що:

1. У разі сильного піноутворення мастильного матеріалу піна може заповнити корпус (картер) і вибиватися назовні через ущільнення. Це призводить до зниження рівня мастила, унаслідок чого зміщуваний механізм може вийти з ладу.

2. Насичений повітрям мастильний матеріал не здатен забезпечити належну несучу здатність мастильного шару в умовах рідинного тертя, а також нормальні умови змащення за граничного тертя.

3. За циркуляційної системи змащення порушується можливість прокачування мастильного матеріалу по мастилопроводу і подача його рівномірним струменем до змащуваних поверхонь.

4. У гідравлічних передачах (об'ємних і динамічних) піноутворення мастильного матеріалу порушує режим роботи.

5. Унаслідок піноутворення мастильний матеріал насичується повітрям, що пришвидшує його окиснювання.

З підвищенням температури мастильного матеріалу піноутворення спочатку може не бути, потім розвиватися і досягти деякого максимуму, перейшовши через який його інтенсивність швидко зменшується.

Емульгування мастильного матеріалу. Повітря, розчинене в мастильному матеріалі, може сприяти утворенню емульсії, повітряно-масляної емульсії і піни. Стійкі водомасляні емульсії неприпустимі з таких причин:

1. У разі емульгування мастильного матеріалу зменшується його в'язкість, що погіршує умови для рідинного тертя.

2. Мастильний матеріал втрачає однорідність, погіршуються його мастильні властивості в умовах граничного тертя.

3. Вода в емульсії спричиняє корозію змащуваних деталей.

4. Збільшується об'єм мастильного матеріалу в картерах і резервуарах; для

підтримання необхідного рівня надлишки треба періодично видаляти, при цьому вміст води в мастильному матеріалі буде безупинно зростати.

Отже, мастила, які застосовуються в умовах можливого обводнювання, мають бути із задовільними антиемульсійними властивостями, тобто здатністю забезпечувати швидке відстоювання води і запобігати утворенню стійких емульсій.

Корозійність мастильного матеріалу. Змащування поверхонь мастильними матеріалами може спричиняти корозію металевих поверхонь. Продукти корозії, потрапляючи в мастильний матеріал, не тільки забруднюють його і зумовлюють осадження, а й можуть стимулювати окиснювання мастильного матеріалу і внаслідок абразивної дії призводити до зношеності.

Одним зі стимуляторів корозійної агресивності мастильного матеріалу є вода. Корозію спричиняють також неорганічні кислоти, що можуть потрапити в мастильний матеріал ззовні, наприклад, у двигунах внутрішнього згорання в результаті згорання пального, що містить сірку.

На міді, олові і сріблі корозію може викликати наявність у мастильному матеріалі недостатньо міцно хімічно зв'язаної сірки. Під дією активного середовища метали і їхні сплави темнішають та покриваються плівкою, товщина якої дедалі підсилюється. Надалі плівка може перетворитися в пухкий або твердий і крихкий наріст, частки якого, відокремлюючись, чинитимуть абразивну дію на поверхні тертя. З підвищенням питомого навантаження корозійна агресивність мастильного матеріалу стосовно деталей з кольорових металів підсилюється.

Липкість і змочуваність мастильного матеріалу. Липкі мастила потрібні для запобігання розбризкуванню мастила, що застосовується у недостатньо герметизованих або відкритих механізмах, особливо коли мастильний матеріал потрапляє на готову продукцію та спричиняє її псування. Основні галузі застосування мастила підвищеної липкості – текстильна, легка і харчова. Це стосується і приладових мастил, наприклад, мастил для змащення годинників, що не повинні розтікатися. Показником змочуваності (і деякою мірою, можливо, липкості) є однозначно зумовлена фізична константа – поверхневий натяг мастила. Чим він менший, тим мастило сильніше розтікається, а отже, потребує герметичніших ущільнень.

Мийні властивості мастильних матеріалів є значущими для змащення деталей, що нагріваються до температури 100...150°C і вище. У результаті інтенсивного окиснювання мастильних матеріалів за високої температури поверхні, що змащуються, можуть покриватися продуктами окиснення – осадами, лаком або нагаром.

Мастильний матеріал із задовільними мийними властивостями має запобігати цьому явищу, але не змиванням відкладень з поверхні деталей, а в результаті диспергування й утримання в мастильному матеріалі в завислому стані нерозчинних продуктів окиснення. Мийні властивості можуть виражатися також у розчиненні частини продуктів окиснення й створенні на поверхнях адсорбованих плівок, які змащуються, що ускладнює прилипання до них продуктів окиснення, які випадають з мастильного матеріалу. Мастильні

матеріали, які мають підвищену лужність, крім зазначених вище проявів миючих властивостей, здатні нейтралізувати утворювані у них кислоти, усуваючи тим самим їх корозійну агресивність.

Негорючість мастильних матеріалів важлива у разі експлуатації їх в умовах підвищеної пожежної небезпеки, викликаній випаровуваністю мастильного матеріалу і окиснюваністю, що призводить до виникнення вибухо- й пожежо-небезпечності маслоповітряної суміші у великому діапазоні температур. Відомо, що для запалення суміші необхідна висока концентрація тепла, за якої швидкість тепловиділення переважає швидкість втрат тепла. Це трапляється, коли реакційноздатна суміш стикається з джерелом нагрівання (відкритим полум'ям, електричною іскрою), що має дуже високу локальну температуру. Полум'я виникає і в разі зіткнення мастильного матеріалу з гарячою поверхнею. Чим вища температура поверхні, тим інтенсивніший процес окиснення і наступне запалення. Воно трапляється і від нагрівання суміші, але при цьому називається самозапалюванням.

Більша або менша горючість притаманна всім мастильним матеріалам, що складаються з вуглеводнів і їхніх похідних, як нафтовим, так (меншою мірою) і синтетичним. Негорючі тільки мастильні матеріали на принципово інших основах – фтор- і фторхлорвуглецеві, а також водомастильні емульсії, що застосовуються як гідравлічні рідини.

Нетоксичність мастильних матеріалів – дуже важлива властивість, що належить до експлуатаційних, оскільки визначає можливість контактування з цими матеріалами усього живого.

Екологічні властивості мастильних матеріалів необхідно розглядати з погляду не тільки впливу на організм людини, що працює з ними, а й забруднення навколишнього середовища. Забруднювальні речовини, потрапляючи в повітря, ґрунт, водойми, порушують біологічні процеси, що є основою життя й обміну живої природи з неживою. Вони можуть призвести до загибелі рослин, лісів, тваринного світу і поступового отруєння з патологічними змінами і хворобами.

Тривалий вплив на внутрішні органи навіть слідів вуглеводнів може спричинити руйнування тканин печінки, нирок та інших життєво важливих органів людини, до розвитку важких хвороб. Мастильні матеріали можуть викликати також і захворювання шкіри унаслідок як тривалого, так і часткового впливу. При цьому через постійне розчинення шкіряного жиру шкіра втрачає необхідну еластичність, у ній з'являються тріщини, в яких розвивається інфекція. Уражальна дія вуглеводних рідин значно підсилюється з підвищенням температури. У зв'язку з цим мастильні матеріали повинні бути нешкідливі для обслуговуючого персоналу і не мати неприємного запаху. Обидві ці вимоги особливо актуальні для мастильних матеріалів з присадками.

Базові мастильні матеріали – це нафтові мастила фенольного селективного очищення. Сировиною для їх виготовлення є мазут, що залишається після відгону з нафти бензиногасових і газойлевих фракцій. Мазут переганяють на мастила у вакуумі за наявності водяної пари. Розрізняють масляні дистиляти,

тобто продукти перегонки, і залишок, або напівгудрон. З дистилатів і залишку добувають відповідно дистилатні і залишкові мастила, що піддаються наступному очищенню. Широко застосовують мастильні матеріали, які являють собою суміш дистилатних і залишкових компонентів. В'язкі мастила виробляють із залишку. Технологія отримання мастила значною мірою визначає їхні експлуатаційні властивості.

Мастилам з природної сировини – нафтовим і жировим через їх походження притаманна неоднорідність хімічного складу. Більш однорідні синтетичні мастила.

Основною речовиною сучасних мастил – нафтових, жирових і значної частини синтетичних є вуглеводні різних класів і їхні похідні.

На відміну від власне вуглеводнів, молекули яких складаються тільки з атомів вуглецю і водню, їхні похідні, що входять до складу мастила, містять у молекулах також атоми кисню, а в деяких випадках атоми сірки й азоту, що впливають на мастильну ефективність мастил.

Структура молекул вуглеводнів і їхніх похідних характеризується функціональними групами атомів, що мають важливе значення для змащувальних властивостей мастил. Як такі групи треба виділити метиленову CH_2 , металну CH_3 , гідроксильну OH , карбонільну CO , карбоксильну COOH . Атомні групи CH_2 і CH_3 є чисто вуглеводними і полярно інертні, інші містять атоми кисню і мають дипольний момент, тобто полярно активні. Ця розбіжність має важливе значення для змащувальної ефективності.

Вибираючи базові мастила (основу), варто враховувати не тільки призначення товарного продукту і його особливості, а й загальні властивості мастил.

Порівняно недавно функціональні властивості багатьох мастил оцінювали насамперед за їх в'язкісно-температурними характеристиками і змащувальною здатністю. На тепер вимоги до експлуатаційних властивостей мастил значно розширились і стали жорсткішими, що і спонукало до уведення великої кількості різних показників властивостей мастила.

Вуглеводневі мастила. Вуглеводи – сполуки, що складаються з вуглецю і водню. Співвідношення між вуглецем і воднем у вуглеводах коливається в широких межах. За складом і будовою вуглеводні поділяють на: а) граничні (насичені), або парафінові, із загальною формулою $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (алкани); б) неграничні (ненасичені) із загальною формулою C_nH_{2n} (алкени) і $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ і т. д.; в) ароматичні похідні $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ (арени); г) поліметиленові, або нафтонові C_nH_{2n} (циклани).

Нафтові мастила складаються з вуглеводнів трьох основних класів: парафінових, нафтонових і ароматичних. У межах кожного класу можливі численні різновиди вуглеводнів. Дуже поширені також вуглеводні змішаного (гібридного) складу – нафтонові – парафінові, нафтоароматичні, ароматично-парафінові. Вуглеводні, що входять до базових матеріалів, можуть мати молекулярну масу від 300 до 1000 і вище.

Парафінові вуглеводні нормального і розгалуженого видів складаються з молекул у вигляді відкритих ланцюжків атомів, довжина яких визначається

кількістю атомів вуглецю. Вони представляють клас вуглеводнів, що є гомологами найпростішого вуглеводню метану – CH_4 . У разі послідовного заміщення водневих атомів метану на залишок або радикал CH_2 , названий метилом або метильною групою, виходить гомологічний ряд вуглеводнів загальної формули $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$.

Парафінові вуглеводні відомі також за назвою граничні, метанові й алкани. Вони являють собою відкриті метиленові ланцюжки з метильними групами на кінцях. Ці ланцюжки можуть бути прямими у нормальних парафінах або розгалуженими в ізопарафінах.

Парафінові вуглеводні з числом атомів вуглецю від C до C_4 за нормальної температури є газами; з числом атомів від C_5 до C_{14} – рідинами; від C_{17} і вище – твердими речовинами.

Нафтеніві вуглеводні або нафтени – клас поліметаленових циклічних вуглеців. Вони є складовою багатьох сортів мастил.

Нафтеніві вуглеводні складаються з молекул у вигляді кілець (циклів), утворених метиленовими групами CH_2 . Кількість цих груп – 5 або 6.

Нафтеніві кільця можна розглядати як замкнені метиленові ланцюжки. У вигляді такої подібності структури нафтеніві вуглеводні за своїми фізико-хімічними властивостями близькі до парафінового та іноді називаються циклопарафінами.

Значна частина цих вуглеців є поліциклічними, тобто складається з двох або трьох, рідше чотирьох, звичайно злитих (сконденсованих) кілець. Можливі комбінації з кілець з однаковим числом атомів C і змішані комбінації з кілець 5 або 6 атомів C .

Ароматичні вуглеводні – клас вуглеців, що містять бензолні ядра, які можуть бути конденсованими і мати насичені або ненасичені бічні ланцюги. До найважливіших ароматичних вуглеводнів належить бензол (C_6H_6) і його гомологи (загальна формула $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$). Вони характеризуються так само, як і нафтеніві, циклічною будовою. У кожному кільці мають 6 атомів вуглецю, але складаються не з метиленових груп CH_2 , а з груп CH . Через це кожен атом вуглецю (чотиривалентний) має один подвійний зв'язок, а молекула виявляється ненасиченою. Цим пояснюється менша стабільність і деякі інші особливості ароматичних вуглеводнів, у тому числі кращі мастильні властивості, ніж у парафінових і нафтенівих.

Вуглеводні змішаної будови. Поряд із розглянутими вище індивідуальними вуглеводнями до складу нафтових мастил входять гібридні, що звичайно навіть переважає кількість вуглеводнів змішаної будови, які являють собою різноманітні комбінації індивідуальних вуглеводнів розглянутих трьох класів. Ці «гібридні» вуглеводні можуть мати такі структури:

а) нафтеніві кільця (з 5 або 6 атомами вуглецю) з парафіновими бічними ланцюжками (кількість, довжина і розгалуженість ланцюжків можуть бути будь-якими);

б) ароматичне кільце з парафіновими бічними ланцюжками;

в) сконденсовані в різних комбінаціях ароматичні та нафтеніві кільця з парафіновими бічними ланцюжками.

Похідні вуглеводнів. У всіх мастилах поряд з розглянутими вище вуглеводнями утримується деяка кількість похідних вуглеводнів. У нафтові мастила вони переходять із сирової нафти у вигляді двох сполук, а саме: а) сірчистих; б) кисневих.

У мастилах тваринного і рослинного походження і переважної частини синтетичного походження, а також синтетичних мастилах похідні вуглеводнів складають основну речовину.

У мастилах усіх типів утворюються також різноманітні похідні вуглеводнів як продукти окиснення у процесі старіння.

Сірчисті сполуки. В усіх нафтах у різних кількостях містяться сірчисті сполуки. Особливо багато їх саме в сірчистих нафтах. До цих хімічних сполук належать: сірководень, сульфіді, сульфони, сульфооксиди, алкілсульфооксили, полісульфіді та ін. Уміст сірчистих сполук залежить від природи сирової нафти. Сірчисті сполуки зазвичай тісно зв'язані з ароматичними вуглеводнями. Вони істотно впливають на фізико-хімічні і трибологічні властивості мастильних матеріалів.

Кисневі сполуки. У свіжих нафтових продуктах кисневі сполуки можуть бути двох основних видів: 1) асфальтово-смолисті речовини; 2) нафтеніві кислоти.

Асфальтово-смолисті речовини утримуються в різних кількостях у всіх нафтах. Вони можуть бути як у процесі видобутку нафти, так і в процесі окиснювання мастильного матеріалу.

На окиснюваність мінеральних мастил киснем впливають здебільшого хімічний склад мастил, температурні умови, тривалість окиснювання, концентрація кисню, каталітична дія металів й інші речовини.

Смолам притаманна низька хімічна стабільність; окиснюючи в процесі роботи мастила, вони ущільнюються і перетворюються в асфальтени, що призводить до зміни кольору мастила.

За своїм складом смоли неоднорідні і являють собою складну суміш різних сполук. В основному вони є рідкими або напіврідкими поліциклічними сполуками з конденсованими нафтовими й ароматичними кільцями і парафіновими бічними ланцюжками. До складу кілець входять кисень, передусім сірка й азот. Уміст кисню в смолах може досягати від 2...3 до 6...10%. На відміну від смол асфальтени – тверді, крихкі речовини, що наплавляються за підвищених температур. З усіх високомолекулярних речовин вони мають найбільшу молекулярну масу (від 1600 до 6000).

Нафтеніві кислоти. Під час очищення нафтопродуктів з них виділяють нафтеніві кислоти, що являють собою карбоксильні похідні нафтенів, переважно п'ятичленних. Вони мають загальну формулу $C_8H_{2n-1}COOH$ і характерний запах. Нерозчинні у воді, але розчинні у вуглеводнях.

Нафтеніві кислоти складають основну масу кислих продуктів, що утримуються в нафтах. Вони чинять значну кородувальну дію на метали,

особливо на свинець і цинк. На чорні метали діють слабо, а на алюміній майже не діють.

Жирні кислоти – це органічні сполуки загальної формули RCOOH, де R– жирний радикал (CH₃, C₂H₅ і т. д.). Кислотні властивості жирних кислот залежать від наявності в молекулі одноатомного радикала карбоксилу.

За кількістю карбоксилів у молекулі розрізняють одноосновні, двоосновні і багатоосновні кислоти.

Насичені жирні кислоти, тобто карбонові кислоти жирного (парафінового) ряду, за своєю структурою аналогічні парафіновим вуглеводням; вони являють собою метиленові ланцюги, у яких на відміну від молекули парафінового вуглеводню одна або обидві метильні групи CH₃ замінені відповідно на одну або дві карбоксильні групи COOH. Ненасичені жирні кислоти відрізняються від насичених тим, що одна або дві метиленові групи CH₂ у них замінені ненасиченими групами CH.

Жирні кислоти (пальмітинова, стеаринова, олеїнова та ін.) і їхні похідні є важливою складовою жирних кислот. Вони утворюються також у процесі старіння нафтових мастил у складі інших продуктів окиснювання. Деякі жирні кислоти і їхні похідні (мила) застосовуються як присадки до нафтових мастил. Мила (солі жирних кислот) утворюються при взаємодії жирних кислот з металами.

Продукти окиснення мастил. У процесі взаємодії мастил з киснем утворюються продукти окиснення, кількість і хімічний склад яких залежить від початкового складу мастила, а також умов і тривалості експлуатації. Метали впливають на процеси окиснювання. Під час нагрівання мастил у тонкому шарі (100 мкм) найбільший ступінь окиснення спостерігається на поверхні маловуглецевої сталі Ст20; значно менший каталітичний вплив чинять такі сплави, як бронза, латунь, дюралюміній, неіржавійні сталі та ін.

Елементоорганічні сполуки. Як компоненти мастил використовують елементоорганічні сполуки, що є синтетичними продуктами. Їх поділяють на дві групи:

1) основи двох категорій синтетичних мастил: полісилоксанових (силіконових) і фторо- (фторо-, хлоро-) вуглецевих;

2) присадки, призначені для поліпшення експлуатаційних властивостей мастил.

Присадки здебільшого являють собою вуглеводневі сполуки, молекули яких містять атоми металів: барію, кальцію, магнію, цинку та інші і неметалевих елементів: сірки, фосфору, хлору, азоту. Менша частина присадок – це вуглеводні і їхні кисневмісні похідні (наприклад, поліізобутилен) і неорганічні сполуки (наприклад, дисульфід молібдену).

9.3. Основні види змащувальних матеріалів

Авіаційні мастильні матеріали. Авіаційні парки підприємств, що експлуатують повітряні кораблі, укомплектовані поршневіми, турбогвинтовими (ТГД) і турбореактивними (ТРД) двигунами, умови роботи мастильних

матеріалів у яких різні.

У поршневих двигунах основні вузли тертя (циліндропоршнева група) працюють за високих температур, що призводить до інтенсивного окиснювання масляної плівки на дзеркалі циліндра та інших деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ). З підвищенням температури в'язкість мастила знижується. У цих умовах працездатність деталей і вузлів ЦПГ забезпечується високов'язкими (залишковими) мастилами.

У ТГД на відміну від поршневого надійного змащування потребують зубчасті передачі редуктора й опори ротора турбокомпресора. Забезпечити їхню надійну роботу можна, застосовуючи менш в'язкі мастильні матеріали, ніж залишкові.

У ТГД основними об'єктами змащування є опори ротора, що потребують не тільки надійного змащування, а й, насамперед, охолодження. Найуспішніше справляються з цими завданнями за допомогою низьков'язких мастильних матеріалів. Виходячи з умов роботи, мастила авіаційних силових установок поділяються за типами двигуна.

Мастила турбогвинтових двигунів. У ТГД близько 80% потужності двигуна витрачається на редуктор для приведення у рух повітряного гвинта. Передавання великих потужностей через редуктор створює значні навантаження в закріпленні шестерень, причому дія цього навантаження в часі значно більша, ніж у вузлах кочення опор ротора двигуна.

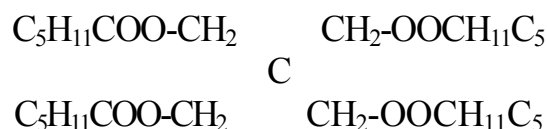
З цих причин для редуктора потрібні мастила, в'язкіші, ніж для підшипників кочення з вищою змащувальною здатністю, і кращими¹ протизадирними властивостями.

У сучасних ТГД (двигунах і редукторах) застосовуються мінеральні і синтетичні мастила. До перших належать: СМ-4,5, СМ-8, СМ-9, СМ-11,5, а до других – Б-3В.

Мінеральні мастила марок СМ являють собою суміші залишкового (СМ-20) з дистилатними мастилами (МК-8, МК-8п, МС-8п) за винятком СМ-9. Цифрами в марках сумішевих мастильних матеріалів позначений рівень кінематичної в'язкості за температури 373К.

Основні властивості мастильних матеріалів наведено в табл. 9.2.

Синтетичне мастило Б-3В являє собою складний ефір пентаеритриту і гексанової кислоти



з присадками – антиоксидною (параоксидифеніламін) і протизадирною (каптакс). Досвід використання цього мастильного матеріалу показав, що каптакс під впливом високої температури перетворюється в альтакс.

Цей процес супроводжується випаданням на фільтрах і деталях мастило-системи осаду, що складається з альтаксу, який знижує надійність роботи двигуна. Замість мастильного матеріалу Б-3В використовують матеріал ЛЗ-240 з вищою стабільністю.

Мастила турбореактивних двигунів. Одним із перших мастил ТРД був мастильний матеріал МК-8, що за своїми властивостями мало відрізнявся від трансформаторного мастила.

Таблиця 9.2

Основні властивості мастильних матеріалів ТГД і редуктора вертольотів

Показник	СМ-4,5	СМ-8	СМ-11,5	СМ-9
Густина температури за 293 К, кг/м ³ , не менше	870	870	870	—
В'язкість кінематична, мм ² /с, за температури 393К	7,0...9,0	4,3...4,7	9,5...13,5	9,0
Кислотне число, мг КОН на 1 г мастила, не більше	0,005	0,07	0,10	—
Температура спалаху в закритому тиглі, К, не менше	411	415	423	—
Уміст механічних домішок,%, не більше	Немає	Немає	Немає	0,07
Уміст води	Немає	Немає	Немає	Немає
Зольність, % (за масою), не більше	—	0,05	0,05	—
Коксівність, %, не більше	0,15	0,2	0,2	—
Температура застигання К, не вище	238	243	253	—

У 1972 р. розроблено мастильний матеріал МК-8п з вищими властивостями за рахунок уведення в мастило МК-8 0,6% (за масою) іонолу. Сьогодні, крім мастил МК-8 і МК-8п, промисловість випускає мінеральне мастило МС-8п.

Вищі індекси в'язкості, кращі низькотемпературні властивості і вищу термоокиснювальну стабільність мають синтетичні мастила (ІПМ-10, ВНП НП-50-1-4Ф).

Деякі властивості мінеральних мастил наведено в табл. 9.3.

Маркування мастильних матеріалів складається з позначень методу очищення (букви К і С після М, значення кінематичної в'язкості за 323 К (мм²/с) і наявності присадок (буква П після цифри). Мінеральне мастило МК добувають очищенням мазуту кислотно-контактним способом, а мастило МС – селективним розчинником (головним чином фенолом).

Мастило марок МК і МС використовують у двигунах, де температура мастила не перевищує 373К.

Синтетичні мастила мають вищі протизносні властивості. Верхній температурний діапазон працездатності цих мастил досягає 480К. Як присадки в синтетичні мастила в ТРД вводять іонол, неозон, бутилксиленол, трикрезилфосфат.

Слід зазначити, що трикрезилфосфат має високу токсичність.

Таблиця 9.3

Основні властивості мінеральних мастил для ТРД

Показник	Мастила МК-8, МК-8п	Мастило МС-8п
В'язкість кінематична, mm^2/m , за температури, K : 293, не більше 323, не менше	30,0 8,3	8,0
Кислотне число, $mg KOH$ на $1 g$ мастила, не більше	0,04	0,05
Температура спалаху в закритому тиглі, K , не нижче	413/408*	423
Уміст: води водорозчинних кислот і лугів механічних домішок	Немає Немає Немає	Немає Немає Немає
Густина за температури $293 K$, kg/m^3 , не більше	885	875

*Для МК-8п.

Мастила для поршневих двигунів. Для цих двигунів використовують здебільшого мастило МС-20, що виробляється фенольним очищенням гудронів малосірчистих нафт. Мастило має недостатні низькотемпературні властивості, температура застигання – $255K$. Воно містить до 0,5% за масою депресорної присадки А₃НІ, що являє собою алкілпохідні нафталіни.

У холодну пору року для поліпшення пускових властивостей перед зупиненням двигуна до нього додають (розріджують) бензин. За температур $278...268K$ до нього додають 5...6% бензину; за температури нижчої від $268K$. розбавляють технічним бензином Нефрас-С (10–12% за масою). Через недостатні пускові властивості мастил двигуни перед запуском у холодну пору року потрібно підігрівати.

Спеціальні авіаційні мастила. Мастила, призначені для допоміжних силових установок (ДСУ), турбохолодильних установок (ТХУ), гепоїдних передач, різних пристроїв і приладів, а також для внутрішньої консервації двигунів і агрегатів називають *спеціальними*, їх класифікують за призначенням. Для ДСУ використовують здебільшого ті самі мастила, що й для АСУ (ІІМ-10, ВНІ НІ 50-1Ф, 36/1КУ-А).

Для змащення важконавантажувальних зубчастих редукторів застосовують мастила ТС-гіп, МС-20 і СМ-9.

Осьові шарніри втулок несучих гвинтів вертольотів у літню пору змащують мастилом МС-20, у зимову – МС-14 за температур $268...248K$ і ВНІ НІ-25 (мастило шарнірне) – за температур $283...223K$.

9.4. Присадки до змащувальних матеріалів. Загальні відомості

У процесі роботи машин і механізмів відбуваються значні хімічні і фізичні зміни мастильних матеріалів, тобто зміна їх складу і властивостей, що впливає на експлуатаційні властивості мастильних матеріалів. Для запобігання

подібним змінам у більшість мастильних матеріалів уводять спеціальні речовини і їхні композиції. Залежно від стану і розчинності в мастильних матеріалах ці речовини отримали різну назву. Органічні мастилорозчинні продукти називають присадками, вони є найпоширенішою групою домішок до мастильних матеріалів. Тверді нерозчинні речовини, як правило, неорганічного походження, називають антифрикційними домішками.

Як присадки використовують понад 100 органічних сполук. За допомогою присадок можна підвищити стійкість мастильних матеріалів до окиснювання, абсолютне значення їх в'язкості і зменшити залежність в'язкості від температури, знизити температуру застигання (змінити плинність), підвищити їх мастильну здатність, зменшити корозію металевих поверхонь, знизити відкладання нагару на деталях двигуна тощо.

За функціональною дією присадки поділяють на антиоксидні, в'язкісні (загусні), мийні – диспергувальні, антифрикційні, протизносні, депресорні, протипінні, протизадирні, антифрикційні, захисні (інгібітори корозії, антиіржавійні) та ін.

Присадки вводять у мастильні матеріали в невеликих кількостях: від часток до кількох відсотків (у композиціях їхня загальна концентрація може доходити до 15% і більше). Виняток становлять в'язкісні присадки, які можна додавати в кількості до 20–30%.

Основні вимоги до присадок, що поліпшують мастильну здатність, залежать від їх призначення. Наприклад, протизадирні присадки мають підвищувати навантаження заїдання, протидіяти сильному руйнуванню поверхонь тертя; протизносні – ліквідувати прогресуючу зношеність поверхонь за помірних навантажень; антифрикційні – знижувати і стабілізувати тертя.

Крім того, необхідно, щоб присадки задовольняли такі вимоги:

- не погіршували фізико-хімічні властивості мастильних матеріалів;
- не чинили руйнівної дії на конструкційні матеріали;
- розчинялися в мастильних матеріалах і зберігали стабільність у розчині;
- зберігали свої властивості в умовах експлуатації за заданих температур, а також в умовах зберігання;
- не мали різкого запаху, що перешкоджатиме використанню мастильних матеріалів у закритих приміщеннях;
- не спричинювати спінювання мастильних матеріалів, не погіршувати їх деемульгувальну здатність;
- для запобігання заїданню і зниження зношеності поверхонь діяли температурно-вибірково.

Від характеру взаємодії присадок (у випадку композиції) з полярними мастильними матеріалами залежить сприйнятливість мастильних матеріалів до присадок і взаємне ослаблення (антагонізм) або посилення (синергізм) функціональної дії присадок у разі їх спільного застосування. Антагонізм або синергізм дії двох присадок залежить від їх взаємодії, на що впливають зовнішні фактори – температура, вологість. Наприклад, на взаємодію молекул

присадок впливають продукти окиснення мастильних матеріалів, вода може викликати гідроліз присадок.

Для зниження тертя і зношуваності та запобігання заїданню як присадки застосовують такі речовини:

Кисневмісні сполуки: тваринні та рослинні жири; жирні кислоти; спирти і їхні похідні; сульфоокислотні сульфанати; продукти окиснювання технічних вуглеводнів. Як присадки для зниження тертя і зношуваності найефективніші жирні кислоти і їхні ефіри (у тому числі жири). Більше вони знижують тертя й менше запобігають заїданню, тобто вони здебільшого антифрикційні.

Органічні сполуки сірки й інших елементів VI групи різного характеру: аліфатичні й ароматичні сульфіді, дисульфіді і біс-(алкіларидтію) алкани; похідні тіовугільні кислот-ксантогенати і тритіокарбонати; кисневмісні бісксантогенати; дитіолтіони; тіокислоти і їх солі; тіоспирти і їхні похідні; осірковані ненасичні вуглеводні; осірковані жири і продукти сіркування технічних вуглеводнів. За винятком маносульфідів, тіоспиртів (меркаптанів) і етиленгліколь-бісксантогенатів усі перелічені сірковмісні сполуки використовують як протизадирні присадки.

Галоїдовмісні органічні сполуки, переважно хлоровмісні: хлоровані аліфатичні вуглеводні (хлорований парафін), хлорозаміщені жирні кислоти і їхні ефіри; хлоровані оліфінові ароматичні вуглеводні, хлорований нафталін, бензол і фенол; хлоровані ацикличні вуглеводні. Хлоровмісні сполуки є типовими протизадирними агентами.

Сполуки, в які входять елементи V групи: фосфор, сурма і арсен, але в основному ефіри і солі фосфорної, фосфористої і фосфонових кислот, що є ефективними протизносними присадками.

Азотовмісні сполуки: жирні й ароматичні аміни, високомолекулярні аміді; похідні сечовини, продукти нітрування технічних вуглеводнів. Як протизношувальні агенти можна використовувати тільки аміді кислот фосфору; жирні й ароматичні аміни й аміді для цього не ефективні. Аміді використовують як антиокисники.

Різного типу сполуки металів – оксидні й сірчисті сполуки молібдену і вольфраму, колоїдне залізо та інші – використовують як протизадирні присадки. Металеві солі нафтонових і жирних кислот (свинцю, олова, сурми та ін.) застосовують для цієї мети тільки в сполученні з хімічно активними компонентами (сіркою і хлором).

Сполуки, що містять кілька активних елементів у молекулі й композиції, – сірку і хлор; сірку і фосфор (ефіри кислот фосфору, що містять сірку); фосфор і хлор; сірку, хлор і фосфор; сірку, фосфор і метали (дитіофосфати металів – цинку, стронцію, барію, сурми); сірку, фосфор і азот (амінні солі дитіокарбонати металів цинку, свинцю, сурми) – застосовують як протизадирні та протизносні присадки.

За хімічним складом присадки являють собою похідні різних органічних сполук – алкілфенолів, амінів, дитіофосфорних, дитіокарбамінових, саліцилових кислот і деяких інших речовин.

Молекули присадок складаються з однієї або кількох полярних груп і однієї або кількох неполярних. Полярні групи зумовлюють адсорбцію молекул поверхнево-активних присадок на межі між мастильним матеріалом і металом. За складом активної (полярної) групи виділяють *S*, *P*, *O*, *Cl*, *N*, *B* – присадки. Неполярні групи (алкільні радикали, нафтеніві або ароматичні кільця і їхні сполуки) визначають розчинність присадок у мастильних матеріалах.

Розглянемо основні присадки до мастильних матеріалів.

Мийні присадки (детергенти) призначені для зниження схильності мастильних матеріалів до утворення відкладень (нагару, лаку) переважно на нагрітих металевих поверхнях. Крім того, вони нейтралізують різні кислі продукти, що нагромаджуються в мастильному матеріалі.

Є три типи мийних присадок: сульфонати, феноляти і фосфонати. Найчастіше вони являють собою солі кальцію і барію, рідше застосовують солі магнію. Сьогодні сульфонати є найпоширенішими мийними присадками.

Мийні присадки застосовують переважно в двигунах внутрішнього згорання. Вони утримують вуглецеві частинки і густі продукти окиснення в мастильному матеріалі у тонкодисперсному стані у вигляді суспензії, перешкоджаючи утворенню осаду і відкладень. Мийні присадки для моторних мастильних матеріалів звичайно мають підвищену лужність для нейтралізації кислот, що утворюються унаслідок згорання палива, особливо з умістом сірки.

Депресорні присадки (депресатори) застосовують для зниження температури застоювання мастильних матеріалів, що містять парафінові вуглеводні, і поліпшення рухливості мастильних матеріалів за низьких температур. Вони перешкоджають утворенню кристалічної ґратки під час застоювання парафінів, знижуючи тим самим температуру, за якої мастильний матеріал зберігає рухливість. Слід зазначити, що в мастильних матеріалах, які не містять парафінових вуглеводнів, депресорні присадки не ефективні.

Велику частину хімічних сполук, що використовуються як депресорні присадки, становлять полімінтакрилати, поліакриламідні і продукти, здобуті конденсацією хлорованого парафіну з нафталіну або фенолом.

Диспергувальні присадки (дисперсанти) використовують для підвищення колоїдної стабільності мастильних матеріалів, утримання в їх об'ємі домішок органічного і неорганічного характеру, які нагромаджуються в процесі роботи. Це запобігає осадкоутворенню на робочих поверхнях і в мастильній системі двигунів внутрішнього згорання.

Найпоширенішими з дисперсантів є сукциніміди. У загальному випадку вони також майже не впливають на протизносні властивості мастильних матеріалів, хоча і трохи знижують їхні протизадирні характеристики, особливо в парі тертя кільце–гільза циліндра. Підвищення ефективності мастильної дії

сукцинімідів досягається введенням до їх складу різних активних елементів (S, P, Mo).

Антифрикційні протизносні та протизадирні присадки. Для поліпшення властивостей мастильних матеріалів застосовують різні присадки, основними з яких є такі: антифрикційні, що впливають на величину тертя (коефіцієнт тертя) деталей тертя; протизносні, що впливають на зменшення зношування поверхонь тертя за помірних навантажень; протизадирні, завдяки яким запобігають задиркам і заїданням поверхонь тертя в умовах великих навантажень і високих температур.

Протизносні присадки почали застосовувати в моторних мастильних матеріалах у 1935–1937 рр. Першими присадками були трикрезилфосфат і трибутилфосфат. Як протизносні присадки, а також присадки, що мають антифрикційні і протизадирні властивості, застосовують сірчані, хлористі та фосфорні сполуки різних видів, а також високомолекулярні жирні кислоти і їхні ефіри.

На сьогодні найпоширенішими також є протизносні присадки, що містять фосфор і хлорофосфорорганічні сполуки. Ефективність протизносної дії присадок визначається їх хімічною активністю і поверхневими властивостями. У зоні контакту деталей тертя фосфоровмісні присадки розкладаються з утворенням плівки фосфату заліза (FePO_4), що добре захищає деталі тертя від зношування.

Сірковмісні кисневі сполуки ефективніші за протизносною дією, ніж сполуки родинного складу, які не містять кисень. Стійкі граничні шари на металевій поверхні у випадку застосування сполук типу сульфоксидів утворюються завдяки наявності атомів сірки, що є донорами електронів. Експериментально підтверджено, що сульфоксиди великою мірою знижують зношувальність, ніж відповідні сульфіди.

З початку 1950-х років велика увага приділялася застосуванню як присадки двосірністого молібдену. Відомо, що ця присадка має досить значні протизносні та протизадирні властивості. Механізм дії присадки пов'язаний з утворенням на поверхні тертя захисних плівок.

Випробування ряду двигунів показали, що у випадку застосування дисульфиду молібдену зношувальність поршневої групи знижується на 25–30%, витрата мастильного матеріалу скорочується на 30% (у середньому). Загальне забруднення мастильного матеріалу також трохи знижується.

Протизадирні присадки почали вводити в трансмісійні мастильні матеріали наприкінці 20-х років ХХ століття у зв'язку з появою гіпоїдних передач. Першими присадками були свинцеві мастильні матеріали і сполуки з активною сіркою.

Протизадирні присадки, що являють собою органічні сполуки, які містять сірку, хлор або фосфор, реагуючи з поверхнею тертя сталевих деталей, утворюють на ній сульфідні, хлоридні та фосфатні плівки заліза з високою температурою плавлення. Ці плівки вберігають вузли тертя від заїдання.

Плівка сульфідів заліза має температуру плавлення 1193°C і запобігає заїданню за температур до 700°C, а хлориду заліза – 675°C і 300°C відповідно.

Відомі такі протизадирні присадки: ВІД-1, ОТП, сульфол, ЛЕ-6/9, ЛЗ-23К та ін.

В'язкісні (загущувальні) присадки призначені для поліпшення температурних характеристик мастильних матеріалів, тобто зменшення крутості кривих залежності в'язкості від температури (підвищення індексу в'язкості). Ці присадки дають змогу регулювати співвідношення рівнів в'язкості мастильних матеріалів за низьких і високих температур. Вони сприяють зміні товщини мастильної плівки у вузлі тертя. За цією метою застосовують загущувальні полімерні присадки, ефективність дії яких залежить від типу полімеру і його молекулярної маси. Зі збільшенням останньої мастильна дія поліпшується, що визначається насамперед підвищенням в'язкості мастильного матеріалу.

Як загущувальні присадки найефективніші поліізобутилени і поліметакрилати. Застосовують також інші високомолекулярні органічні полімерні сполуки: полівініл-алкінові ефіри, поліалкілстироли, сополімери стиrolу з олефінами.

Ефективність застосування присадок для контролю за в'язкістю залежить від особливостей мастильної основи. Сприйнятливність до загущувальних присадок базових мастильних матеріалів залежить від їх групового хімічного складу і структури. Як в'язкісні присадки застосовують різноманітні органічні сполуки.

Протипінні присадки. Основною причиною, що викликає спінювання мастильних матеріалів, є аерація. Це – небезпечне явище, унаслідок якого знижується тиск мастильного матеріалу в системі і погіршуються його протизносні властивості. За наявності мийних присадок (а вони завжди наявні в сучасних моторних мастильних матеріалах) піноутворення підсилюється. Боротьба з піноутворенням найбільш утруднена у випадку застосування високов'язкого мастильного матеріалу.

Протипінні присадки запобігають появі піни, а в разі появи забезпечують її ефективне гасіння.

Як протипінні присадки використовують полісілоксанові (силіконові) полімерні кремнієорганічні сполуки, що нерозчинні в нафтових мастильних

матеріалах і містяться в них у вигляді дисперсної фази. Механізм дії протипінної присадки ґрунтується на руйнуванні пухирців повітря, які приєднуються до них диспергованими частинками полісілоксанової рідини. Досить ефективна присадка ПМС-200А.

Припрацьовувальні присадки. У процесі роботи вузла тертя вихідний мікро- і макрорельєф, а також структура приповерхневих шарів, отримана в результаті механічної обробки або яких-небудь інших технологічних операцій, зазнають істотних змін. Як було зазначено, мікрорельєф змінюється в напрямі, що забезпечує мінімальні тертя і зношування. При цьому чистота поверхні, її шорсткість можуть змінюватись у бік поліпшення або погіршення. Аналогічні зміни відбуваються у структурі поверхневих шарів. Особливості перебігу цих процесів мають велике значення для забезпечення високої зносостійкості поверхні в експлуатаційних умовах. Тому необхідно, щоб вони відбувалися в найбажанішому напрямі та реалізовувалися якомога швидше.

Для пришвидшення процесів припрацювання використовують припрацьовувальні, або обкатні, присадки, що являють собою ПАР, які містять сірку, фосфор, хлор, жирні кислоти.

Як припрацьовувальні присадки застосовують такі: ЦІАТІМ-339, ВНІ НІ-360. Остання менш водостійка, ніж ЦІАТІМ-339, тому для підвищення її миючих властивостей додають ще сульфонатну присадку ПМФ.

Антиоксидні й антикорозійні присадки. Ці дві групи присадок розглядаються спільно, оскільки їхні функції значною мірою збігаються і розрізняються вони передусім за механізмом дії.

Антиоксидні присадки-інгібітори призначені для гальмування процесів окиснювання мастильних матеріалів у двигуні. Завдяки дії цих присадок знижується інтенсивність корозійних процесів, а також швидкість утворення різних сполук, що викликають появу в двигуні вуглецевих відхилень.

Антикорозійні присадки здійснюють здебільшого одну функцію – запобігання корозії антифрикційних сплавів через створення на поверхні деталей тертя захисної плівки. Корозійна агресивність мастильних матеріалів залежить від складу нафтових кислот і їхньої структури, а також від схильності мастильного матеріалу до утворення карбонових і оксикарбонових кислот у процесі його застосування у двигуні. Механізм дії антиокиснювальних присадок полягає в тому, що вони гальмують процес окиснювання вуглеводнів на його початковій стадії (за рахунок дезактивації утворених радикалів), і разом з тим затримують процес окиснювання на глибоких стадіях розвитку, знижуючи концентрацію гідроперекисів в окиснюваних вуглеводнях.

Сірка і фосфор, які входять до складу антикорозійних присадок, під впливом високих температур взаємодіють із металом з утворенням на поверхні деталей міцної захисної змашувальної плівки. Одночасно плівки пасивують металеві поверхні, які можуть каталізувати окиснювання мастильних матеріалів.

Отже, процес утворення плівки, як уже зазначалося, – це прояв не тільки антикорозійної, а й антиоксидної функції присадки.

Як антиоксидні присадки використовують сірчані, азотисті, фосфорні алкілфенольні сполуки, а також феноли з різними функціональними групами (амонофенол, нафтиламін, оксидофеніламін та ін.). Для підвищення стабільності турбінних, трансформаторних, приладових та інших глибокоочисних мастильних матеріалів застосовують присадки типу іонол, *n*-оксидофеніламін та ін. Для моторних мастильних матеріалів звичайно використовують діалкілдитіофосфати металів присадки ДФ-11, ЛАНІ-317, ДФ-1. Як правило, до мастильних матеріалів додають від 0,1 до 1,0% антиоксидних присадок.

Перспективними є беззольні антиокиснювальні та антикорозійні присадки. Ці присадки за ефективністю не поступаються розробленим раніше зольним присадкам. До антиокиснювальних беззольних присадок належать сполуки біофенолів і антинофенолів.

Інші види присадок. Крім розглянутих присадок, застосовують антисептичні, адгезійні та багатофункціональні присадки.

Антисептичні (біоцидні) присадки застосовують для запобігання бактеріям і грибкам у мастильних матеріалах.

Адгезійні присадки підвищують липкість і нерозтічність мастильних матеріалів. Це полярно активні речовини, наприклад тваринні, або високомолекулярні полімери і сополімери.

Багатофункціональні присадки. Більшість присадок здатні виконувати одночасно кілька різних функцій, що пов'язано з утворенням захисних плівок, що запобігають зношуванню поверхонь тертя й одночасно знижують інтенсивність перебігу корозійних процесів; вони можуть поліпшувати також і інші властивості мастильних матеріалів. Наприклад, діалкілдитіофосфати цинку і барію об'єднують властивості антизносною, антиоксидною, антикорозійною і миючою присадок.

9.5. Принцип вибору присадок до мастильних матеріалів

Різноманітні присадки і їхні композиції, які вводяться в нафтові і синтетичні мастильні матеріали у визначених, строго дозованих концентраціях, дають змогу отримувати, власне кажучи, нові продукти зі заздалегідь заданими властивостями, що зазвичай мають мало спільного з первинним мастильним матеріалом.

Як уже зазначалося, присадки, які використовуються в мастильних матеріалах, можуть виявляти синергетичні або антагоністичні властивості, що підсилюють або послабляють їх дію в основному функціональному напрямі. Наприклад, наявність детергентів впливає на ефективність дії дитіофосфатів цинку або протизносних присадок. Сумісність у мастилах різних функціональних присадок наведено в табл. 9.4. Впливає на ефективність дії присадок і склад основи.

Таблиця 9.4

Сумісність у мастилах присадок різного функціонального призначення

№ з/п	Тип присадки	1	2	3	4	5	6	7	8
1	В'язкісні (згущувальні)		+	0	0	0	+	0	-
2	Депресорні			0	0	0	0	0	0
3	Детергентно-диспергувальні				+	+	-	-	-
4	Антиоксидні					+	+	0	0
5	Антикорозійні						-		0
6	Протизносні							+	0
7	Протизадирні								0
8	Протипінні								

Примітка: «+» – синергізм, «-» – антагонізм, «0» – відсутність взаємодії.

Дедалі більшого поширення набувають маслорозчинні ПАР (дитіофосфати, дитіокарбонати та ін.), що містять легувальні елементи – мідь, нікель, кобальт, хром і найчастіше молібден. Такі присадки, які отримали назву *модифікаторів* тертя, створюють на поверхні металу багат шарові адсорбційно-хемосорбційні плівки «сендвичевої структури» із проникненням легувальних елементів у поверхню зони тертя.

Вибір присадок і необхідність уведення їх у мастильні матеріали залежить від виду зміщуваних вузлів тертя, умов їх роботи, а також від процесів, що проходять на поверхнях тертя і лімітують їх працездатність. Дуже важливо, що підбираючи присадки до мастильних матеріалів для змащення машин і механізмів, використовують статистичні дані про характер пошкоджень пар тертя, про довговічність і причини виходу з ладу устаткування в різних галузях промисловості. Неправильний вибір присадки може викликати підвищене зношування або погіршення фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів. Тому перш ніж визначити вимоги до присадок, необхідно ретельно вивчити режими тертя і види пошкоджень робочих поверхонь.

У загальному випадку вибору присадок до мастильних матеріалів, крім складу і властивостей самої присадки (наявність домішок, стабільність під час збереження), варто враховувати хімічний склад мастильного матеріалу, концентрацію присадки і її сумісність із присадками іншої функціональної дії, технологію введення присадок (послідовність, температуру та інші фактори) і умови застосування мастильного матеріалу (температуру, питомі тиски, контакт із різними металами, тривалість роботи і т. ін.).

РОЗДІЛ 10

ТРИБОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

10.1. Антифрикційні матеріали

10.1.1. Вимоги до антифрикційних матеріалів

Антифрикційні матеріали призначені для виготовлення підшипників (опір) ковзання, що широко застосовуються в сучасних машинах і приладах завдяки стійкості до вібрацій, безшумності роботи, невеликим габаритам.

Основними властивостями антифрикційних матеріалів варто вважати антифрикційність і опір втомленості.

Антифрикційність – це здатність матеріалу забезпечувати низький коефіцієнт ковзання, незначні втрати на тертя і малу швидкість зношування сполучених деталей. Крім того, кожен матеріал у конкретних умовах роботи має бути, наприклад, стійким проти окиснювання за підвищених температур, мати високий опір корозії під час роботи в агресивних середовищах і т. ін. Ці матеріали мають працювати в широкому діапазоні швидкостей ковзання (від 0,001 до 100 м/с і більше), навантажень (від 1 м до 25 МПа і більше), температур до 100°C і більше.

Наведені відомості не дають змоги створити універсальний антифрикційний матеріал, здатний працювати у вузлах тертя різного призначення. Тож постає потреба в розробленні різноманітних матеріалів тертя для конкретних заданих умов роботи.

На тепер налічується безліч вузлів тертя, у яких застосовуються антифрикційні матеріали – циліндричні й кулькові підшипники, підп'ятники, вкладиші, напрямні, що ковзають, струмознімачі, торцеві й бічні ущільнення, шарнірні пристрої, поршневі кільця та ін.

Антифрикційні матеріали працюють у найрізноманітніших умовах, а саме: за граничного тертя, у вакуумі, тертя без змащення, еластогідродинамічного тертя, за підвищених температур, високих швидкостей, великих навантажень, у різних агресивних середовищах (воді, кислотах, лугах, розплавлених металах, розпечених газах), інертних газах та ін.

Основні вимоги до антифрикційних матеріалів такі:

- висока зносостійкість;
- низькі значення коефіцієнта тертя;
- оптимальна поверхнева й об'ємна міцність;
- припрацьовуваність;
- достатня в'язкість для унеможливлення крихкого руйнування;
- висока втомна міцність;
- здатність протистояти схоплюванню;
- достатня теплопровідність й оптимальні значення коефіцієнта теплового розширення;
- наявність у матеріалі запасу твердого або рідкого мастила;

- технологічність виготовлення;
- економічність.

Крім цих вимог до матеріалів конкретного призначення, що працюють у специфічних умовах, потрібні спеціальні властивості. Наприклад, об'ємна міцність у матеріалах для важконавантажувальних вузлів тертя має бути досить високою, а матеріали для роботи в разі підвищених температур повинні мати стійкість проти окиснення.

10.1.2. Природа антифрикційності

Антифрикційність забезпечується такими властивостями підшипникового матеріалу:

- 1) високою теплопровідністю;
- 2) ефективним змащенням мастильним матеріалом;
- 3) здатністю створювати на поверхні захисні плівки;
- 4) задовільною припрацьовуваністю, що ґрунтується на здатності матеріалу в процесі тертя легкопластично деформуватись і збільшувати площу фактичного контакту, що сприяє зниженню місцевого тиску і температури на поверхні підшипника.

Згідно з І.В. Крагельським основною властивістю антифрикційної пари тертя (при цьому розглядаються пари тертя і взаємодія їх зі змащенням) є забезпечення додатного градієнта механічних властивостей за глибиною, що призводить до мінімальної роботи об'ємного деформування, а в разі пластичного деформування – до здатності багаторазово передеформуватися, що не спричиняє окрихчування матеріалу.

Для досягнення додатного градієнта механічних властивостей користуються змащенням. Однак цього не досить, оскільки в разі розриву мастильного шару (за пускових режимів, перевантажень) відбувається взаємодія двох твердих поверхонь, яким необхідно забезпечити додатний градієнт механічних властивостей. Це можливо у випадках, коли на поверхні тертя будуть:

- 1) вторинні структури у вигляді оксидних плівок;
- 2) плівки перенесеного м'якого металу зі структурних складових пари тертя;
- 3) нанесені спеціальні легкоплавкі покриття.

Більшість антифрикційних матеріалів має композиційну структуру, а саме, тверді вкраплення рівномірно розподіляються в пластичній матриці, що відповідає правилу Шарпі. У процесі роботи такого підшипникового матеріалу тверді вкраплення сприймають навантаження і передають його м'якому сполученню – матриці, що завдяки високій пластичності набуває форми вала, знижуючи контактний тиск на виступи третьових поверхонь.

Перспективною є ідея про можливість забезпечення нормальних умов ковзання за рахунок вибіркового перенесення м'якої складової сплаву з однієї поверхні на іншу. В цих умовах здійснюється робота пари тертя майже без зношування.

10.1.3. Критерії оцінювання підшипникових матеріалів

Критеріями для оцінювання підшипникових матеріалів є коефіцієнт тертя і допустимі вантажно-швидкісні характеристики: тиск p , що діє на опору, швидкість ковзання V . Параметр pV визначає питому потужність тертя та гранично допустимі значення навантажень і швидкостей.

Слід зазначити, що показник pV істотно відрізняється від експериментальних даних. Він не враховує конструктивних особливостей вузла тертя (масштабного фактора) і типу використовуваних мастил та присадок. У разі легкого режиму роботи значення добутку pV можуть бути високими, але для підшипникового матеріалу у важких умовах роботи вони будуть значно меншими. Тому порівнювати несучу здатність матеріалу за величинами pV можна тільки для однотипних режимів роботи.

Наведемо умовну класифікацію несучої здатності матеріалів, розроблену в Інституті проблем матеріалознавства НАН України на основі багаторічного аналізу умов роботи різних антифрикційних матеріалів. Ця класифікація передбачає чотири режими роботи матеріалів – легкий, середній, важкий і гранично важкий. За цією класифікацією несуча здатність матеріалу оцінюється за значенням pV , визначеним для даного режиму роботи. Незважаючи на те, що ця класифікація умовна, вона дає змогу розмежовувати рівень властивостей існуючих матеріалів і тих меж параметрів роботи, до яких необхідно прагнути для створення нових матеріалів, а також для стандартизації й уніфікації умов роботи вузлів тертя.

Легкий режим роботи характеризується наявністю мастильного роздільного шару, невеликими значеннями навантажень і швидкостей ковзання, що не викликає підвищення температури в зоні тертя.

Середній режим роботи визначається вищими параметрами навантажень і швидкостей або збільшенням часу експлуатації підшипникового вузла, що супроводжується зменшенням товщини змащення й активнішою участю матеріалу підшипника в процесі тертя.

За важкого режиму тертя навантаження і швидкості високі, кількості змащення в зоні тертя, як правило, недостатньо і працездатність вузлів тертя залежить в основному від походження матеріалів третьової пари. У цьому випадку температура вузла тертя підвищується.

Гранично важкий режим тертя включає умови роботи вузлів тертя без рідкого мастила, що потрібно для підвищених і високих температур, швидкостей ковзання в різних діапазонах навантажень, у вакуумі, інертних й активних газових і рідких середовищах тощо.

Легкі, середні й важкі умови роботи за наявності рідкого мастила властиві вузлам тертя багатьох машин і механізмів, що застосовуються у сільськогосподарській галузі, транспортному і важкому машинобудуванні. Гранично важкі режими роботи характерні для вузлів тертя металургійного та прокатного устаткування у космічній та авіаційній, атомній, криогенній, газотурбінній та інших галузях техніки.

10.1.4. Основні зовнішні фактори, що впливають на несучу здатність антифрикційних матеріалів

Під час конструювання підшипників ковзання, в яких використовуються антифрикційні матеріали, необхідно враховувати несучу здатність матеріалу, що залежить насамперед від питомого навантаження і швидкості ковзання. Крім цих факторів, на несучу здатність антифрикційних матеріалів впливають середовище, температура середовища, стан поверхонь тертя, ступінь взаємного перекриття тертьових поверхонь та ін.

Досягнення критичного рівня допустимості дії того або іншого зовнішнього фактора, що впливає на несучу здатність матеріалу, виявляється в різкому підвищенні температури вузла тертя. Відомо, що зовнішньою ознакою сталого процесу є сталість температури в трибосистемі. Отже, одна з основних умов нормальної роботи вузла тертя полягає у рівновазі кількості тертя і тепла, що відводиться в навколишній простір.

10.1.5. Основні види антифрикційних матеріалів

Антифрикційні матеріали на основі олова і свинцю. Сплави на основі олова і свинцю є найдавнішими підшипниковими матеріалами. Ще в 1839 р. англієць М. Бабіт розробив сплав, що містить 82...84% Sn, 5...6% Cu і 11...12% Sb.

Цей сплав поклав початок використанню м'яких білих антифрикційних сплавів у техніці, і тому всі наступні сплави на олов'яній і свинцевій основах почали називати бабітами. Бабіти мають низькі значення твердості (НВ 12...32) і температури плавлення (240...320°C), відмінну припрацьовуваність. За антифрикційними властивостями вони перевершують усі інші сплави, але значно поступаються їм щодо опірності втомі. У зв'язку з цим бабіти застосовують лише для тонкого (менше 1 мм) покриття робочої поверхні опори ковзання.

Найпоширенішими бабітами на олов'яній основі є Б93, Б88, Б83, Б83С. Усі вони мають гетерогенну структуру і являють собою механічну суміш твердого розчину на основі олова (м'яка основа) і твердого розчину на основі інтерметалідної сполуки $SnSb$ (тверді вкраплення). Висока зносостійкість цих сплавів зумовлена значною міцністю вторинних структур, що утворюються на поверхні сплаву.

Через високий уміст дорогого олова їх використовують для підшипників відповідального призначення (дизелів, парових турбін і т. ін.), що працюють за великих швидкостей і навантажень. Дешевшими є бабіти на основі свинцю. До них належать БКА, БК2, БК2Ш.

Для тонкостінних вкладень бабіт має задовольняти такі вимоги:

- не мати різко вираженої неоднорідної структури;
- підвищену опірність утомному руйнуванню;
- мати знижену твердість;
- міцно з'єднуватися з основою.

Антифрикційні матеріали на основі міді. Як антифрикційні матеріали широко застосовують сплави на основі міді, відомі як бронзи і латуні. Бронзи бувають олов'яністі, алюмінієві.

Склад найуживаніших бронз на олов'яністій основі і бронз, що обробляються тиском, наведено у табл. 12.1, 12.2 відповідно.

Бронзи, що застосовуються в підшипниках ковзання, поділяють на сплави з високим (до 10%) і низьким (до 3%) умістом олова. До складу легувальних домішок входять Sn, Pb, Ni, P, Fe, Sn, Sb та ін.

Для виготовлення втулок, торцевих дисків та інших антифрикційних деталей застосовують олов'яністі бронзи, які деформуються (табл. 10.2).

Крім олов'янистих бронз порівняно широке застосування набули сплави, що не містять олова (безолов'яністі). До них належать БрСуСФ6-12-0,3, БрСуНЦСФ3-3-20-0,2, БрСуН6-2, БрСуФ6-1, БрКМц3-1.

У важконавантажувальних вузлах тертя (дорожніх машин, важкого верстатного устаткування) з успіхом застосовують високоміцні алюмінієві бронзи, а саме: БрА9Мц2, БрА10-Мц2, БрА9Ж4, БрАЮЖ3-МцІ, 5, БрА10-Ж4-Н4, БрАП-Жб-Нб.

Таблиця 10.1

Склад найуживаніших олов'янистих ливарних бронз

№ з/п	Марка	Sn	Zn	Pb
1	БрОЗ-Ц7-С5-Н1	2,5...4,0	6,0...9,5	3,0...6,0
2	БрОЗ-Ц12-С5	2,0...3,5	8,0... 15,0	3,0...6,0
3	БрО5-Ц5-С5	4,0...6,0	4,0...6,0	4,0...6,0
4	БрО4-Ц4-С17	3,5...5,0	2,0...6,0	14,0...20,0
5	БрОЗ,5-Ц7-С5	3,0...4,5	6,0...9,5	3,0...6,0

Таблиця 10.2

Склад бронз, що оброблюються тиском

№ з/п	Марка бронзи	Елементи		
		Sn	P	Ni
1	БрОФ 6,5-0,15	6,0...7,0	0,1...0,25	—
2	БрОФ 6,5-0,44	6,0...7,0	0,3...0,4	—
3	БрОФ 7-0,2	7,0...8,0	0,1...0,25	—
4	БрОФ 8-0,3	7,5...8,5	0,25...0,3 5	0,1...0,2
5	БрОФ 6,5-0,4	6,0...7,0	0,3...0,4	0,1...0,2
6	БрОЦС4-4-2,5	3,0...5,0	—	—

Як замітники бронз для опор тертя застосовують латуні. Вони бувають подвійні і багатокomпонентні, містять, крім міді та цинку, як основні елементи алюміній, залізо, марганець, олово, кремній або свинець. Латуні за своїми антифрикційними властивостями значно поступаються бронзам.

Двофазні латуні ЛЦ16Д04, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А та інші застосовують за малих швидкостей ковзання (менше 2,0 м/с) і невисоких навантажень, їх часто використовують для опор тертя приладів.

Слід зазначити, що бронзу застосовують також як компонент порошкових антифрикційних матеріалів або тонкостінних пористих покриттів. Найбільшого поширення набули матеріали на сталевій підкладці з напеченим бронзовим шаром, пориста бронза, просочена мастилом, і бронзографітові матеріали. Виробництво виробів з цих матеріалів у світі досягає $10^7 \dots 10^8$ штук на день.

Пориста олов'яниста бронза зазвичай містить від 6 до 12% олова. Оптимальні властивості має бронза, що містить 9...11% олова. Пориста бронза заміняє литу бронзу, завдяки чому економиться кольоровий метал.

Пористі бронзи застосовують переважно для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у легких умовах, наприклад для приладів, робота яких характеризується малими швидкостями ковзання (менше 1,5 м/с) і невеликими навантаженнями (приблизно 0,5...1 МПа). Такі підшипники не потребують додаткового змащення протягом 3000...5000 год, мають низький і стабільний коефіцієнт тертя (0,01...0,04), низький рівень шуму і надійно працюють у діапазоні температур від -60 до $+120^\circ\text{C}$. В умовах додаткового змащування граничне навантаження для пористої бронзи досягає 8 МПа (якщо $V=1$ м/с).

Високі антифрикційні характеристики притаманні матеріалам із мідевмісних порошків, здобутих методом порошкової металургії. До них належать бронзографіти, складнолеговані бронзи, міднографіти.

У зв'язку з тим, що графіт не взаємодіє ні з міддю, ні з оловом, його застосовують як домішку, котра відіграє роль твердого мастила, яке вводять від 1 до 25% залежно від умов роботи матеріалів. Графіт, наявний у бронзі, у процесі тертя поступово утворює графітову плівку на поверхні контртіла. Плівка постійно відновлюється у разі механічних пошкоджень в окремих ділянках поверхні тертя. До цих матеріалів належать БрОГр10-3, БрОГр9-3, БрОГр8-4.

Властивості спечених бронз і бронзографітів можуть бути значно поліпшені легуванням такими елементами, як титан, нікель, свинець, цинк, кобальт, залізо, алюміній та інші, що мають пористість до 12%. Їх границя міцності досягає 3,5 МПа.

Для важконавантажених вузлів тертя застосовують комплексне легування основи і рекомендують замінити традиційні легувальні елементи – олово, свинець і графіт як домішку, такими, як нікель, вольфрам, молібден, ванадій, хром і залізо, що дає змогу зменшити вміст олова до 0,5...0,6%.

Міднографітові матеріали застосовують переважно для виготовлення нерухомих контактних, радіальних ущільнень і щіток. Їх склад визначають згідно з потрібними властивостями. У цих матеріалах мідь забезпечує провідність, а графіт підвищує зносостійкість і контактний опір. Уміст графіту коливається від кількох відсотків до 75%. Для поліпшення властивостей щіткових матеріалів додають олово, свинець, цинк. Олово і цинк зміцнюють матеріал, а свинець поліпшує припрацьовуваність і виконує роль мастила. Опір зношуванню

спечених міднографітових матеріалів в умовах роботи щіток набагато вищий порівняно зі звичайними щітковими матеріалами.

Антифрикційні матеріали на основі алюмінію. Використання алюмінієвих сплавів як антифрикційного матеріалу з кожним роком збільшується. Вони мають достатні втомну міцність, корозійну стійкість у мастилах, порівняно високу задиркостійкість і високі антифрикційні властивості.

Сплави на основі алюмінію застосовують як у біметалевому, так і монометалевому виконанні. Останні слугують для виготовлення втулок, підшипників ковзання, шарнірів та ін. Для монометалевих підшипників використовують порівняно тверді міцні сплави, а шар біметалевих вкладишів виготовляють з менш твердого пластичного сплаву.

Алюмінієві сплави завдяки своїм специфічним властивостям застосовують замість антифрикційних сплавів на свинцевій і олов'яній основі, а також свинцевої бронзи. Алюмінієві антифрикційні сплави, що містять до 20% олова, можуть конкурувати з такими дорогими матеріалами, як безолов'яниста бронза.

Алюмінієві сплави класифікують переважно за мікроструктурною ознакою. До першої групи належать сплави АН-2,5, АСМ, а до другої– А09-1, А03-1, А09-2, А09-2Б, А020-1. Останні два сплави мають найкращі властивості.

Підшипники у вигляді литих монометалевих втулок виготовляють зі сплавів з підвищеною конструкційною міцністю: АМКО-1, АМКО-3, АМГК-1, АМГК-2, АММГК-1, АММГК-2 та ін. Хімічний склад деяких алюмінієвих сплавів наведено у табл. 10.3.

Зростає інтерес до антифрикційних сплавів на основі алюмінію, виготовлених методами порошкової металургії, завдяки їх істотним перевагам, таким, як мала питома маса, невисока вартість і велика корозійна стійкість.

Таблиця 10.3

Алюмінієві антифрикційні сплави для монометалевих підшипників ковзання

Умовна марка	Уміст елементів у масі%, решта – алюміній						
	Cu	Mg	Si	Mn	Ti	Sn	Pb
АМКО-1	5,5...6,5	0,8...0,9	1,8...2,0	—	—	3,2...3,5	—
АМКО-3	2,5...3,5	1,2...1,5	3,5...4,0	—	0,35...0,45	4,0...5,0	—
АМГК-1	—	7,0...8,0	1,0...1,5	1,5...2,0	0,15...0,4	4,0...5,5	—
АМГК-2	—	7,0...8,0	1,0...1,5	1,5...2,0	0,15...0,4	—	4,0...5,5
АММГК-1	2,0...2,5	4,0...4,5	1,2...1,6	0,8...1,2	0,3...0,5	5,0...5,5	—
АММГК-2	2,0...2,5	4,0...4,5	1,2...1,6	0,8...1,2	0,3...0,5	—	4,0...4,5

Підшипникові матеріали на основі алюмінію зазвичай леговані різними елементами і містять 10...60% пор. Ці матеріали просочують мастилом. Матеріали на основі алюмінію, що містять мідь або магній, а також обидва елементи, рекомендовано для виготовлення підшипників, що працюють за низьких питомих навантажень у вузлах тертя, профілактичний ремонт яких не

бажаний, наприклад у приладах, сільськогосподарських машинах, конторських апаратах.

Високі значення жароміцності, зносостійкості і теплопровідності мають матеріали на основі алюмінію, що містять 5...10% одного або кількох елементів із групи заліза, а саме: нікель, хром і 0,5...5% кремнію.

Для виготовлення деталей вузлів тертя двигунів внутрішнього згорання і вузлів тертя, що працюють без мастила, застосовують матеріали, до складу яких входять графіт, сульфід, оксиди, карбіди.

Підшипникові матеріали на основі алюмінію, що працюють за підвищених температур, у своєму складі містять порошки твердих сплавів, таких, як WC, TiC, а в деяких випадках – нітрид бору.

Антифрикційні матеріали на основі цинку відомі давно, однак вони не набули поширення, не зважаючи на ряд значущих властивостей, що дають змогу замінити цими сплавами бабіти і деякі антифрикційні бронзи.

Перевагами сплавів на основі цинку варто вважати високу припрацьовуваність і технологічність.

Відмітною особливістю цинкових сплавів від бронз і алюмінієвих сплавів є підвищення міцності і пластичності після гарячої обробки тиском (250...300°C).

Основними антифрикційними матеріалами з цинковою основою, що застосовуються для виготовлення підшипників ковзання замість бронз і бабітів, є ЦАМ4-1, ІДАМ5-1, ЦАМ9-1Д ЦАМ10-5, ЦОС3-3 та ін. Їх застосовують переважно у вузлах тертя залізничного транспорту. Склад найуживаніших сплавів наведено у табл. 12.4. Підшипники ковзання й інші деталі з цинкових сплавів вживаються в литому й обробленому тиском (прокатка, пресування) станах.

Таблиця 10.4

Склади закордонних цинкових сплавів

№з/п	Марка (країна)	Хімічний склад, %			
		Al	Cu	Mg	Mn
1	1010(Німеччина)	9...11	0,6... 1,0	0,02...0,05	—
2	410 (Німеччина)	3,7...4,3	0,6... 1,0	0,02...0,05	—
3	(Японія)	10	2	—	0,2
4	Алцен 305 (Австрія)	30	5	—	—

Антифрикційні матеріали на основі заліза. На основі заліза застосовують як антифрикційні матеріали два сплави: сталь і чавун. Однак унаслідок високої твердості і температури плавлення, незадовільної припрацьовуваності і схоплюваності зі сполучуваною поверхнею сталі як антифрикційні матеріали застосовують рідко. Зазвичай використовують мідисті сталі, що мають малий уміст вуглецю, або графітізовані сталі, що мають вкраплення вільного графіту.

Чавуни застосовують для підшипників та інших деталей вузлів тертя в більшій кількості й асортименті, ніж сталі. Антифрикційність чавунів забезпечується наявністю в структурі вільного графіту. Він може бути у вигляді

глобул і пластин. Крім графіту, в структурі антифрикційного чавуну має бути вільний ферит (не більше 15%) і не повинно бути вільного цементиту.

Антифрикційні чавуни містять 2,8...3,8% С, 1,5...2,7% Si, 0,4...1,2% Mn, а також залежно від марки чавунів у їхній структурі можуть міститися такі елементи: Ni, Cr, Cu, P і S. Найпоширенішими антифрикційними чавунами є: А4С-1, А4С-2, А4С-3, ковкий А4-1, високоміцний А4В-1. Задля зменшення зношуваності сполученої деталі марку чавуну вибирають так, аби його твердість була нижчою від твердості сталевий цапфи. Перевага чавунів – невисока вартість.

Найпоширенішими антифрикційними матеріалами на основі заліза є спечені матеріали. Вони успішно конкурують з литими сплавами типу бабітів і бронз і зі спеченими бронзами завдяки недефіцитності вихідної сировини і можливості широкого впливу на їхні антифрикційні властивості легуванням і введенням різних присадок.

На основі заліза застосовують різноманітні спечені антифрикційні матеріали – пористе залізо, просочене мастилом, залізо–графіт, залізо–мідь–графіт, сульфидовані залізографітові матеріали, матеріали з присадками як твердим мастилом фторидів кальцію або барію, пористі матеріали, просочені свинцем або легкоплавкими сплавами на основі міді, олова, свинцю та інших присадок, сульфидовані неіржавійні сталі, складнолеговані пористі матеріали та ін.

Уведення в сплави заліза легувальних домішок підвищує фізико-механічні властивості й забезпечує працездатність матеріалів в умовах абразивного зношування, підвищених навантажень, швидкостей ковзання і температур за наявності агресивних газів і рідин, значно розширюючи можливі межі працездатності спечених антифрикційних матеріалів і сфери їх застосування.

Пористе залізо. Це найпростіший тип матеріалів, що мають феритну пористу структуру.

Пористе залізо у разі рясної подачі мастила зберігає свою працездатність за навантажень 2,0...2,5 МПа і швидкості ковзання 1...2 м/с. Дослідження пористого заліза в більш важких режимах тертя обмежується робочою температурою, що не повинна перевищувати 70...80°C, оскільки при цьому інтенсивно розвиваються процеси пластичного деформування, розчинення мастила і втрати ефекту самозмащування. Ці матеріали можуть короткочасно працювати при навантаженнях на підшипник до 7...10 МПа та швидкості ковзання до 5 м/с.

Пористе залізо використовують у галузях промисловості для виготовлення самозмащувальних підшипників ковзання, побутової апаратури, приладів, лічильних пристроїв, прядильних кілець та ін.

Залізографіт – найпоширеніший матеріал на основі заліза. Залізографітові матеріали мають перлітно-феритову структуру. Найбільша зносостійкість притаманна матеріалам, що мають перлітну структуру. Зміст феритної складової допускається до 50% і залежить від режиму роботи підшипників. Основними матеріалами є ЖГр3, ЖГр4.

Найстабільніші фізико-механічні, технологічні властивості та структуру має залізографітовий матеріал, що містить 0,8... 1% графіту. Гранична

швидкість ковзання для цих матеріалів становить 2...3 м/с, а тривалість роботи визначається умовами їх роботи і не перевищує 3...5 тис. год.

Композиції залізо–мідь і залізо–мідь–графіт широко застосовують у промисловості. Уведення міді в порошок заліза на основі заліза сприяє підвищенню його міцності, сприятливо впливає на його змащуваність і дає змогу регулювати зміну розмірів у разі усадки в процесі спікання.

Кількість міді, що вводиться в антифрикційний матеріал на залізній основі, коливається в межах 2,5...20%.

У більшості цих матеріалів міді утримується до 5...9%. Їхні властивості мало відрізняються від пористого заліза і залізграфіту. Вони застосовуються лише при роботі зі змащенням і рідше в режимі самозмащування. Ці матеріали марок ЖДЗ, ЖД5. Значно поліпшити властивості антифрикційних матеріалів залізграфіту можна введенням їх до складу міді, що запобігає утворенню цементиту, поліпшує структуру і механічні властивості матеріалу, підвищує мікротвердість. Основними марками цих матеріалів є ЖГр1ДЗ, ЖГр1Д5, ЖГр1, 5Д5, ЖГр4Д7.

Високі триботехнічні характеристики матеріалів композицій залізо—мідь і залізо–мідь–графіт дають змогу застосовувати їх у відповідальних вузлах тертя, де потрібна підвищена міцність підшипникового матеріалу. Такі матеріали здатні витримувати статичні навантаження 60...290 МПа.

Матеріали залізо–мідь–графіт–фосфор. Легування залізо–мідь–графітових антифрикційних матеріалів фосфором дає змогу значно підвищити їх опір пластичній деформації в умовах тертя. Ці матеріали мають вищу зносостійкість унаслідок тертя без мастила. Оптимальними визнано матеріали на основі заліза, що містять 1,2% графіту і 0,2...0,4% фосфору, за вмісту графіту 0,6 фосфору рекомендується 0,9%.

Матеріали, що містять сірку, сульфідні і селеніди. Сірка позитивно впливає на фізико-механічні властивості та структуру залізграфіту й істотно поліпшує експлуатаційні характеристики матеріалів.

Сірка вводиться в антифрикційні матеріали на основі заліза як легувальний елемент і у вигляді сульфідів різних матеріалів. Найвищі гранично допустимі навантаження (5... 10 МПа) мають матеріали з перлітною і феритно-перлітною структурами, що містять 4...8% 2п і 1...3% графіту з поруватістю в межах 15...25%.

Антифрикційний матеріал марки ЖГр3ЦС4, що містить 3% графіту і 4% Zn, під час випробовувань у різних умовах тертя показав переваги перед іншими залізграфітовими матеріалами і бронзами.

Матеріали залізо–графіт–молібден. Для деяких композиційних матеріалів, що містять молібден, характерне зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості ковзання і питомого навантаження. При цьому за цією характеристикою і за зносостійкістю він перевершує олов'янисту бронзу (табл. 10.5).

Таблиця 10.5

Порівняльні випробовування матеріалу ЖГрЗМ15 і бронзи БрОФ в умовах тертя без змащування по сталі 45 (HRC = 43...47)

V, м/с	P, кг/см ²	БрОФ		ЖГрЗМ5	
		μ	I, мкм/км	M	I, мкм/км
2	2	0,38	20	0,56	10
4	2	0,30	40	0,43	69
6	2	0,43	160	0,42	50
8	2	0,38	322	0,42	65

Матеріали на залізній основі, що містять фториди і хлориди

Антифрикційні матеріали на основі заліза, що містять як тверде мастило фториди металів, працездатні у разі підвищених навантажень і температур без змащення й у вакуумі. Робоча температура цих матеріалів може досягати 650°C. Склад і властивості деяких матеріалів, що містять фториди, придатних для роботи за підвищених температур у повітряному середовищі і вакуумі, наведено у табл. 10.6.

Таблиця 10.6

Типові склади антифрикційних матеріалів на основі заліза, що містять фториди металів

Склад матеріалу, %	Пористість, %	Твердість НВ, кг/мм ²	Міцність при стисканні, кг/мм ²	Ударна в'язкість, кг*м/см
94Fe - 6CaF ₂	9,0...10,0	Близько 56	87	0,35
91Fe - 9CaF ₂	4Д...6...6,0	Близько 62	90	0,19
79Fe - 15Mo - 6CaF ₂	2,0...3...3,0	Близько 185	110	0,30
94 Fe - 5CaF ₂ - 1C	12,0...14,0	70...80	—	—
88Fe - 6Ni - 5CaF ₂ - 1C	10,0...12,0	100...110	—	—

Матеріали на залізній основі, що містять свинець або сплави на основі кольорових металів. Підвищити міцність й антифрикційні властивості матеріалів на основі заліза можна також додаванням до них свинцю або сплавів на основі кольорових металів. Це здійснюється у двох напрямках:

- 1) додавання кольорових металів у шихту;
- 2) просочування спечених пористих матеріалів на основі заліза розплавленими кольоровими металами.

Для підшипників, що працюють за питомих навантажень, більших за 1 МПа, пропонується матеріал, що складається з 60...90% заліза та 40–10% сплаву, що містить 85% Cu, 5% Sb, 5% Pb, 5% Zn. Цей сплав у вигляді порошку додається до порошку заліза під час шихтування.

Композиційний матеріал на основі заліза, що містить 15...30% свинцю і 3...5% міді, просочується мастилом. Матеріали, у складі яких 0,8 C, 2,5% Si, 3...5% Cr, 6... 10% Mo, до 2% Ni, решта – залізо, просочуються сплавом 90% Cu

+ 10% Sn. Вони здатні працювати за великих питомих навантажень.

Антифрикційні матеріали на основі нікелю і кобальту. Відомо, що нікель і кобальт мають низькі триботехнічні характеристики й особливо нікель, оскільки він пластичний і в умовах тертя без змащення схоплюється. Однак спечені композиційні порошкові матеріали на основі нікелю і кобальту за наявності мастильного матеріалу мають високі триботехнічні характеристики, особливо в агресивних середовищах.

Антифрикційні матеріали являють собою багатокomпонентну композицію, до складу якої входять, крім нікелю, такі елементи, як залізо, мідь, а як зміцнювальні частинки використовують берилій, бор, молібден, тугоплавкі сполуки типу Si , B_4C , WC , Ti , Zn_2 , Mo_2 та ін.

Для підвищення антифрикційних властивостей у ці матеріали вводять графіт, фториди кальцію, барію або стронцію. Зношеність композиційних нікелевих матеріалів, просочених фторидами кальцію або барію, або матеріалів, просочених їх евтектиками, в умовах тертя без змащення становить 10 мкм/км, а коефіцієнт тертя – 0,15...0,25.

Залізонікелеві композиційні матеріали, що містять 50% нікелю і більше, мають достатню корозійну стійкість у морській воді, лугах і деяких розчинах кислот. Вони міцніші і менш пластичні, ніж мідно-нікелеві сплави, можуть витримувати великі навантаження.

Антифрикційні матеріали на основі кобальту мають одну відмітну властивість, сутність якої полягає в зменшенні коефіцієнта тертя з підвищенням температури. За кімнатної температури його коефіцієнт тертя становить 0,32; за 260°C – 0,25; а за 538°C – усього 0,16. Однак за температури 540°C кобальт можна застосовувати як антифрикційний матеріал лише в закритих системах або інертних середовищах. Для підвищення працездатності матеріалів на основі кобальту за високих температур до їх складу додають різні тверді мастила в межах 5...20%.

Антифрикційні матеріали на основі тугоплавких металів і сполук. Характерними властивостями металів і сплавів на основі металів IV—VI груп періодичної системи елементів та їхніх сполук з вуглецем, бором, азотом, кремнієм і киснем є висока твердість і міцність. Ці властивості особливо важливі для функціонування вузлів тертя в умовах високих температур, швидкостей ковзання, що супроводжуються розігрівом і абразивною дією середовища.

У більшості випадків основою в цих матеріалах є сполуки типу WC , W_2C , Mo , Mo_2C , Ti , Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Ta , Ti_2 , CrB_x або композиція $WC-Ti$, $WC-TiC-Ta$, $TiC-Ti_2$ та ін. Просочення їх феросплавами, що містять бор і кремній, підвищує їх щільність і міцність. Багатофазні композиційні матеріали на основі нітриду кремнію пористістю 20...34% просочують розкиснювальними сплавами, що взаємодіють з Si_3K_4 , задля підвищення міцності. Ці матеріали здатні працювати як за кімнатних, так і за високих температур.

Для підшипників ковзання, що працюють в особливих умовах, рекомендовані матеріали композиції $W-BN$. Їх зносостійкість визначається вмістом BN , зі збільшенням якого від 10...20% коефіцієнт тертя вольфраму не

знижується, але зменшується його зношуваність у діапазоні швидкостей ковзання до 5,5 м/с за малих навантажень.

Через невисоку стійкість проти окиснення матеріали на основі карбідів, нітридів, боридів і багатьох інтерметалідів можуть бути використані лише до температури 540°C на повітрі.

Антифрикційні властивості матеріалів на основі тугоплавких металів і їхніх сполук визначаються умовами експлуатації й значною мірою залежать від матеріалів сполучених з ними деталей.

Антифрикційні матеріали на основі пластмас. Як антифрикційні матеріали набули поширення пластмаси, синтезовані на основі однотипних і модифікованих смол і їхніх композицій з різними наповнювачами, стабілізаторами, пом'якшувачами, прискорювачами й іншими домішками. Як наповнювачі для антифрикційних пластмас застосовують матеріали органічного походження (деревне борошно і кришиво, дерев'яний шпон, бавовняні тканини та ін.), наповнювачі неорганічного походження (графіт, тальк, дисульфід молібдену, азбест, скляні нитки, каолін та ін.). Наповнювачі можуть бути листовими, сітчастими, волокнистими, порошковими і газовими.

До антифрикційних матеріалів на основі пластмас, що застосовуються у вузлах тертя, варто віднести поліетилен низького і високого тиску, фторопласт, полістирол, вініпласт, капролон, капрон технічний, поліформальдегід, плексиглас та ін.

Основними перевагами антифрикційних матеріалів на основі пластмас порівняно з металевими є зносостійкість, високе відношення міцності до питомої маси, здатність до гасіння вібрацій, високий опір схоплюванню з матеріалом вала, технологічність процесів виготовлення й обробки, низька вартість. Недоліки – низька теплопровідність, гігроскопічність, високий коефіцієнт лінійного розширення, низька механічна міцність.

Працездатність і несучу здатність полімерів можна значно підвищити за допомогою наповнювачів і армування.

У сучасних вузлах тертя знаходять застосування три типи метало-полімерних матеріалів: зміцнених сталевією підкладкою; поруватих спечених виробів, просочених фторопластом; наповнених фторопластом, не армованих каркасом.

Основні вимоги до антифрикційних матеріалів на основі пластмас такі: надійність, довговічність, мінімальна маса, металомісткість і собівартість. Вхідні складові компоненти мають бути доступні й технологічні.

Визначальний вплив на антифрикційність матеріалів на основі полімерів має тип сполучного, яким можуть бути як термопластичні (поліолефіни, поліаміди, полікарбонат, фторопласт та ін.), так і термореактивні полімери (фенолформальдегідні, епоксидні та інші смоли). Деякі властивості матеріалів з цими сполучними наведено в табл. 10.7.

Таблиця 10.7

Властивості матеріалів

Тип сполучення	Границя міцності, МПа		Гранична робоча температура, °С	Потужність тертя (PV), МПа*м/с	Коефіцієнт тертя μ
	У разі стискання	У разі розтягування			
Термопластичні полімери	—	70...80	373...93	0,02...0,1	0,15...0,40
Термореактивні полімери	80... 100	—	523...73	0,2...0,5	0,1...0,40

Антифрикційні матеріали на основі термопластів характеризуються високими триботехнічними характеристиками, низькою вартістю, високою технологічністю, однак унаслідок схильності до схоплювання за підвищених температур їх застосовують рідко.

Триботехнічні характеристики політетрафторетилену й інших сполучних наведено в табл. 10.8. Випробовування здійснювалися в парі зі сталлю без мастила.

Ці матеріали застосовуються у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють без змащення, а також зі змащенням водою або технологічними рідинами, в умовах вібрацій і питомих навантажень.

Антифрикційні матеріали на основі поліетилену (ПЕНТ), надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ) і мінеральних дисперсних наповнювачів (туфу, тепу, кальциту, каоліну) – композити за своїми властивостями не поступаються кращим зносостійким матеріалам на основі фторопласту-4.

Таблиця 10.8

Триботехнічні характеристики композиційних матеріалів на основі термопластичних полімерів

Матеріал	Коефіцієнт тертя		Відносне зношування
	Статичний	Кінетичний	
Поліаміди	0,2...0,25	0,25...0,30	200
Поліфармальдегід	0,15	0,20	65
Політетрафторетилен	0,10	0,15	8
Полікарбонат	0,30	0,40	2500
Поліуретан	0,30	0,40	3400

Для роботи в прісній або морській воді рекомендується матеріал типу «масляніту». Коефіцієнт тертя в парі зі сталлю становить 0,05. Цей матеріал має високу працездатність не тільки у воді, а й в агресивних середовищах і глибокому вакуумі. Характерною ознакою маслянітів є наявність граничних мастильних шарів, що являють собою металеві мила в будь-якому мікроперетині, генеровані на поверхні тертя.

Перспективним є використання як основи поліаміду – фенілону. Його працездатність зберігається до 260°C. Матеріали на основі фенілону застосовуються у вузлах тертя з питомими навантаженнями до 50 МПа. Для зниження коефіцієнта тертя до значень 0,07...0,10 до цих матеріалів додають тверді мастила (MoS_2 , ВІЧ, графіт).

Одним із найпоширеніших і застосовуваних матеріалів у вузлах тертя є неполярний полімер – фторопласт. Це фторопохідний етилен, у якому атоми водню частково або цілком заміщені фтором. Промисловість випускає такі марки фторопластів: 4, 4Д, 40, 42, 3, 3М, 30, 32Л, 2, 10 і т.д. Як сполучний переважно використовують фторопласт-4 (політетрафторетилен).

Для підвищення зносостійкості і механічної міцності в композиції на основі фторопласту вводять йодиди металів, бронзи, хлористий натрій, скловолокно. Для матеріалів, що працюють в агресивних середовищах, наповнювачами є карбіди титану, хрому, вольфраму і кремнію.

Як антифрикційні матеріали на основі фторопласту широко відомі матеріали ОР, ОП, ОО, розроблені фірмою «Гласир». Наповнювачем у цій композиції слугує графіт і металевий порошок (будь-який сплав міді). Для збільшення міцності можна вводити скловолокно, волокна заліза, вуглецеві й азбестові волокна. Матеріал ОР складається зі сталевий стрічкової основи, тонкого шару (0,3...0,4 мм) пористої бронзи, пори якої заповнені фторопластом, товщина фторопластового шару – 0,01...0,03 мм. Матеріал ОР є аналогом металофторопластової стрічки вітчизняного виробництва.

У вузлах тертя застосовують деталі, виготовлені з антифрикційного матеріалу на основі поліформальдегіду. Він належить до найтвердіших полімерів.

Уведення в поліформальдегід скловолокна, графіту, сажі, дисульфиду молібдену, політетрафторетилену підвищує його термостійкість. У результаті поліпшується тепловий режим роботи підшипників, зубчастих коліс, муфт зчеплення, шестерень, клапанів, при цьому знижується зношуваність (у тричотири рази), збільшується працездатність пари тертя, зменшується (у 1,5...2 рази) коефіцієнт тертя.

Для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя і зношування, застосовують антифрикційний матеріал на основі полікарбонату. Це складний поліефір вугільної кислоти; випускається під назвою дифлон.

Антифрикційний матеріал на основі полікарбонату ДАК містить 15...20% фторопластів. Він зберіг основні властивості дифлону. При цьому його коефіцієнт тертя по сталі становить 0,15...0,20, а зносостійкість у 30 разів вища. З полікарбонатів виготовляють шестерні, підшипники й інші деталі вузлів тертя. Високі антифрикційні властивості мають матеріали на основі поліарилатів – складних гетерогенних поліефірів. Вони характеризуються високою термічною стійкістю і морозостійкістю (до -100°C), а також механічною міцністю і зносостійкістю.

На основі поліарилатів створено антифрикційні матеріали типу АМАН, що мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Їх працездатність

зберігається до температури 300°C. Висока зносостійкість трибосистеми поліарилат—сталь пояснюється утворенням на сталевій поверхні тонкої мастильної плівки, що виникає в результаті фрикційного перенесення.

Матеріали на основі поліарилатів застосовують для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у глибокому вакуумі без змащення, як ущільнювальні матеріали в буровій техніці.

Антифрикційні матеріали на основі термореактивних полімерів. Термореактивні пластмаси (реактопласти) отримують на основі епоксидних, поліефірних, поліуретанових, фенолоформальдегідних і кремнієорганічних полімерів. Задля поліпшення міцнісних і триботехнічних характеристик у фенолоформальдегідні смоли вводять волокнисті й порошкові наповнювачі.

Коефіцієнти тертя по сталі термореактивних матеріалів залежно від типу наповнювача наведено в табл. 10.9.

Таблиця 10.9

Значення коефіцієнта тертя термореактивних матеріалів

Матеріал	Наповнювач	Коефіцієнт тертя без змащення по сталі
Волокніт	Бавовняне волокно	0,33
Азбоволокніт	Азбестове волокно	—
Скловолокніт	Скляне волокно	0,34
Текстоліт	Бавовняна тканина	0,30
Азботекстоліт	Азбестова тканина	0,34...0...0,38
Фенопласт	Органічний або мінеральний (графіт, капрон, фторопласт та ін.)	0,20

Волокніти – це пластмаси, у яких наповнювачем є волокна. Вони характеризуються підвищеною міцністю, а головне – ударною в'язкістю. Завдяки волокнам ударна в'язкість перевищує 10 кДж/м².

Азбоволокніти – це пластмаси, у яких наповнювачем є азбестові волокна. Вони мають високу теплостійкість (до 200°C).

Скловолокніти – це пластмаси, в яких наповнювачем є скляні волокна. У разі використання скляного волокна ударна в'язкість досягає 20...30 кДж/м².

Антифрикційний матеріал на основі фенолоформальдегідної смоли, модифікованої оксидами магнію і цинку, містить, крім графіту й азбестового волокна, напритовий каучук (14...24%). Домішка напруги дала змогу підвищити стійкість композиції до дії кислот і лугів, зносостійкість і механічну міцність при роботі в агресивних середовищах і в умовах абразивного зношування. Для поліпшення самозмащування в умовах тертя без змащення або граничного тертя використовують композиції на основі фенольної смоли, просочені мінеральним мастилом. У деяких випадках, окрім основних компонентів, у композицію додають пластичне мастило, що в результаті витискування крізь капіляри потрапляє в зону тертя.

Домішка високодисперсного графіту й ацетиленової сажі, масова частка яких становить 10%, сприяє зниженню коефіцієнта тертя композиції на основі

аніліноформальдегідної смоли СФ-342А до 0,12...0,14.

У ряді самозмащувальних антифрикційних матеріалів як сполучного ефективно використовуються сполуки фурану. Матеріал «антегфур» на основі олігомеру ФА має високу тепло- і термостійкість (150...200°C) і зберігає достатню працездатність в умовах тертя без змащування, а також у розчинах мінеральних і органічних кислот.

Для роботи у вузлах тертя фрикційних демпферів, підшипників ковзання, що ковзають по напрямних у парі зі сталлю й алюмінієвими сплавами, розроблені матеріали на основі модифікованого фенолоформальдегідного олігомеру, наповненого термопластичними полімерами (поліетилен ПЕНД, фторопласт 32Л, фторопласт 42Л).

Матеріали на основі поліамідного олігомеру розроблені для умов, що потребують низького тертя. Як наповнювач використовують графіт або низькомолекулярний ПТФЕ. Однією з переваг цього матеріалу є його висока технологічність.

Високу працездатність у глибокому вакуумі (коефіцієнт тертя 0,015...0,020), границю міцності під час стискання (200 МПа) і допустиму температуру (500°C) мають антифрикційні матеріали на поліамідній основі.

Епоксидні полімери в чистому вигляді для виготовлення деталей тертя не застосовуються. Високі антифрикційні властивості для роботи в агресивних середовищах мають високонаповнені епоксидні смоли з графітом і дисульфідом молібдену. Ці композити мають коефіцієнт тертя без мастила 0,15...0,25, з мастилом – 0,05.

На основі епоксидної смоли холодного твердіння ЕД-6 розроблено матеріал антифрикційного призначення, що включає як компоненти алюмінієву пудру і мінеральне мастило МК-8. Коефіцієнт тертя становить 0,3...0,35.

Жорсткість режимів експлуатації вузлів тертя машин і механізмів потребує нових підходів до створення антифрикційних матеріалів на полімерній основі. Правильний підбір армувальних наповнювачів дасть змогу розширити межі застосовності композиційних матеріалів на основі термопластичних і термореактивних полімерів.

Антифрикційні вуглецеві матеріали поділяють на вуглецеві – випалені та графітовані (без просочення і просочені металами та сплавами), графітофторо-пластові та графітопластові. Для їх виготовлення використовують не випалений нафтовий кокс і кам'яновугільний пек з додаванням природного графіту.

Максимальна температура обробки випалених матеріалів становить 1300°C, а графітованих – 2300...2600°C. Просочення виконують бабітом, бронзою, сплавами свинцю й олова та іншими, а для здобуття графітопластових антифрикційних матеріалів використовують високополімерні сполуки.

Антифрикційні вуглецеві випалені матеріали мають підвищену твердість і міцність, але меншу теплопровідність, ніж графітовані. Їх коефіцієнт термічного розширення нижчий, ніж металів, а коефіцієнт тертя – в межах 0,05-0,1.

З підвищенням температури міцність на розтягування антифрикційних графітових матеріалів значно підвищується (за температури 2500°C майже вдвічі вища, ніж за 20°C), а коефіцієнт тертя знижується в три рази. Після просочення металом (сплавом) вуглецеві матеріали стають непроникними для рідин і газів за високих тисків, а також підвищується їх міцність, а в окремих випадках підвищується працездатність в умовах тертя.

Графітофторопластові антифрикційні матеріали пружнопластичні, й хоча вони мають меншу міцність порівняно з вуглецевими, але є щільнішими і непроникними для рідин та газів.

Вуглецеві антифрикційні матеріали (табл.10.10) хімічно стійкі у багатьох агресивних газових і рідинних середовищах. Вони стійкі майже в усіх кислотах (до температури кипіння кислоти), у розчинах солей, в усіх органічних розчинниках, і обмежено стійкі в концентрованому середовищі їдкого лугу.

Величина зношуваності за гранично допустимих питомих навантажень і швидкостей в умовах тертя на повітрі за кімнатної температури за 100 год становить, мкм:

- вуглецеві (випалені і графітовані) матеріали – 50;
- ті самі матеріали, просочені металами – 30;
- графітофторопластові – 30.

Під час експлуатації антифрикційних матеріалів (табл. 10.10) рекомендується застосовувати більш низький питомий тиск, ніж гранично допустимий, і за таких умов величина зношування значно знижується.

Працездатність вуглецевих антифрикційних матеріалів значною мірою залежить від складу і вологості газового середовища. За наявності на поверхні тертя плівок або крапель конденсованої вологи зношування і коефіцієнт тертя вуглецевих антифрикційних матеріалів зростає приблизно в десять разів, а коефіцієнт тертя матеріалів, просочених металами, – у два рази.

Таблиця 10.10

Приклади застосування антифрикційних матеріалів

Матеріал	Машини та їх деталі	Елементи тертя	Робоче середовище	Розмір елемента тертя, мм	Навантаження на деталь, Па, 10 ⁴	Швидкість ковзання, об/хв	Робоча температура, °С	Матеріал контр-тіла
1	2	3	4	5	6	7	8	9
АВ-1500	Компресор	Поршневе кільце	Аміно- і вуглекислота	175/125Хх25	19,5	500 150	120	Сірий чавун
АВ-600	Суцільний циліндр	Ущільнювальне кільце	Повітря				До 40	
АГ-1500	Турбодетандер-	Ущільнювальне	Азот	88/56хх20	49,0	7160	-135	Сталь Х18 Н9Т Сталь 35ХН

(можливо АГ-600)	ний агрегат Відцентров ий насос.	кільце по валу Торцеве ущільню- вальне кільце	Зрідже- ний газ, бензин, гас, дизельне паливо, мазут Мастило	55/37x6		2950	>0...370	Сталь 40Х, Х5М
	Гідрона-сос	Ущільню -вальне кільце				1700	-50... +90	Сталь 38ХА
АВ- 1500- С05	Автомобіль ний двигун.	Торцеве ущільню -вальне кільце	Вода, антифриз	37/18x x4,5	9,8	4000	105	Чавун
АВ- 1500-583	Компресор	Ущільню -вальне кільце	Вологий кисень або повітря, сухий кисень, повітря, азот	400/360x x10; 230/260x x8; 72/45x x10	88,3		<160	Чавун

10.2. Фрикційні матеріали

10.2.1. Класифікація і вимоги до фрикційних матеріалів

Фрикційні матеріали застосовують у фрикційних динамічних пристроях, до яких належать гальма, накладки, спеціальні опори ковзання, муфти, варіатори. Ці пристрої призначені для розгону (муфти зчеплення) і зупинки (гальма, лижні й ковзні опори ковзання) транспортних машин, у приводах технологічного устаткування (різні фрикційні муфти і регулятори) для передавання і зміни напрямку руху.

Фрикційні матеріали працюють у важких умовах зношування за високих питомих навантажень (до 8 МПа), швидкостей ковзання (до 50 м/с) і температур, що можуть миттєво підвищуватися до 1200°C.

Механічна енергія рухомих елементів під час гальмування переходить у теплову, а потім розсіюється. Тепловий вплив паралельно з багаторазовими циклічними навантаженнями, нагріванням і охолодженням, термічними і силовими деформаціями, утворенням градієнта температур істотно впливають на кінетику тертя і зношування фрикційних матеріалів. У зв'язку з цим до фрикційних матеріалів ставлять вимоги, основні з яких такі:

1. Висока фрикційна теплостійкість, тобто здатність пари тертя зберігати стійке значення коефіцієнта тертя і мати мале зношування у широкому діапазоні температур.

2. Достатня величина і стабільність коефіцієнта тертя. Під час роботи фрикційної пари коефіцієнт тертя має бути в межах 0,2...0,5, процес тертя має бути досить стабільним.

3. Припрацьовуваність. Елементи фрикційної пари мають припрацьовуватися досить швидко так, щоб з першим гальмуванням гальмівний момент становив не менше 80% і не більше 120% від розрахункової величини. При цьому на поверхні тертя не повинні утворюватися задири.

4. Несхоплюваність. Пари тертя не повинні схоплюватися (зварюватися) як у процесі гальмування, так і в інших випадках, наприклад після гальмування, коли гаряче гальмо залишається загальмованим.

5. Висока корозійна стійкість. У разі тривалого перебування у вологій атмосфері (до 100%) і за температури від мінус 60 до +150°C елементи фрикційної пари не повинні піддаватися корозії.

6. Вогнебезпечність. У процесі гальмування і наприкінці роботи гальмівного пристрою фрикційні матеріали і продукти їх зношування не мають загоратися, а також не повинно бути неприємних запахів і диму.

7. Достатня механічна міцність. У разі багаторазового гальмування фрикційні матеріали повинні володіти достатньою механічною міцністю, добре протистояти тепловому удару, що виникає за інтенсивного гальмування.

8. Зносостійкість. Гальмівна пара повинна бути достатньо стійка до стирання. Зазвичай заміна гальмівних колодок пов'язана зі значними труднощами. Крім того, у процесі зношування збільшуються зазори. У зв'язку з цим необхідно, щоб матеріал забезпечував досить тривалу роботу.

9. Теплопровідність і теплоємність.

10. Технологічність.

11. Економічність. Часто до фрикційних матеріалів ставлять додаткові вимоги, пов'язані з мастило-, водостійкістю, безшумністю в роботі, стійкістю в арктичних і тропічних умовах, опором до термічної втомленості, утворенням тріщин та ін.

І.В. Крагельський запропонував усі фрикційні матеріали поділити на такі групи:

1) матеріали для легких умов тертя (короткочасна температура до 400°C, тривала – до 120°C, тиск – 8 МПа);

2) матеріали для середніх умов тертя (короткочасна температура до 400°C, тривала – до 250°C, тиск – до 1,5 МПа);

3) матеріали для важких умов тертя (короткочасна температура до 1100°C, тривала – до 400°C, тиск – до 6 МПа).

10.2.2. Основні види фрикційних матеріалів

Фрикційні матеріали на основі азбесту. Азбестові матеріали розрізняються сполучним і наповнювачем. Крім азбесту, як наповнювач застосовують метали у вигляді стружки, дроту або порошку (латунь, мідь, алюміній, свинець), графіти, оксиди і солі металів (каолін, оксид цинку, сурик). Залежно від типу зв'язувального азбофрикційні матеріали поділяють на чотири групи:

1. Матеріали на мастильному і бітумно-мастильному сполучному.

Масильне сполучне забезпечує високу еластичність матеріалу, однак не дає змоги домогтися високої міцності. Максимальна робоча температура не перевищує 200°C.

2. Матеріали на каучуковому сполучному – азбокаучуки (6 КХ 1; 6 КФ-32; 6 КВ-10; 6 КХ-15 і ін.). Міцність і пружність цих матеріалів залежать від умісту в них сірки. Робоча температура азбокаучуку не перевищує 250°C.

3. Матеріали на основі термореактивних смол – азбосмоляні (КФ-3М, К15-6, К15-ВМ, ФК-16Л, ФК-24А).

4. Комбіновані матеріали, що містять як сполучне каучук і смолу (7КФ-31). Залежно від способу виготовлення азбофрикційні матеріали можуть бути ткані, формовані, пресовані і вальцьовані.

До азбестовмісних фрикційних матеріалів, як наповнювач, крім азбесту, додають метали (*Cu, Al, Pb*, сплави на основі міді (латунь)) у вигляді стружки або дроту для підвищення теплопровідності, графіти; оксиди або солі металів (оксид цинку, барит та ін.) для збільшення коефіцієнта тертя.

Азбокаучукові матеріали застосовують як гальмівні накладки в гальмах автомобілів, кільцях зчеплення тракторів, автомобілів й інших машин. Недоліком цих матеріалів є різке зменшення коефіцієнта від температури та їх теплоємності.

З азбосмоляних матеріалів найкращим є ретинакс. Він витримує температуру до 1000°C, має досить стійкий коефіцієнт тертя. Ретинакси ФК-24 А і ФК-16Л містять 25% фенолоформальдегідної смоли, 40% азбесту, 35% бариту, рублену латунь і пластифікатор. У парі зі сталлю ретинакс забезпечує коефіцієнт тертя 0,37...0,40. Його використовують у гальмівних пристроях літаків, автомобілів та інших машин.

Істотним недоліком фрикційних азбестовмісних матеріалів є їх низька температура розпаду, за якої вони здатні взаємодіяти з чавуном або сталлю (іншим елементом пари тертя), утворювати карбіди і пересичені тверді розчини.

Порошкові металокерамічні фрикційні матеріали. Порошкові металокерамічні фрикційні матеріали застосовують у важких режимах тертя. Їх роблять на залізній і мідній основах. Найпоширенішими фрикційними матеріалами на основі заліза є ФМК-8 і ФМК-11, МКВ-50А і СМК, а на основі міді – МК-5. Фрикційні властивості деяких порошкових матеріалів на залізній основі наведено в табл. 10.11.

Крім основи і металевих компонентів (*Sn, Pb, Ni* і ін.), що забезпечують міцність, високу теплопровідність і зносостійкість, ці матеріали містять неметалеві домішки азбесту, граніту, оксидів кремнію, сульфідів, нітридів.

Спечені порошкові матеріали застосовують для оснащення таких вузлів, що працюють у вузлах тертя без мастила, як дискові гальма, муфти зчеплення автомобілів, фрикційні вузли різних приладів, рідше – для колодкових і стрічкових гальм деяких передавальних пристроїв.

Матеріали на основі міді й мідних сплавів. Фрикційні порошкові матеріали на основі міді застосовують для роботи в умовах тертя без мастила і з мастилом.

Матеріали на основі олов'янистої бронзи завдяки високій зносостійкості і досить високому коефіцієнтові тертя добре зарекомендували себе в гальмівних і передавальних пристроях різного призначення. Порівняно з матеріалами на основі заліза вони значно менше стирають сполучену деталь, виготовлену з чавуну або сталі.

Таблиця 10.11

Фрикційні властивості деяких матеріалів на основі заліза

Марка матеріалу	Тиск, кгм/с м ² • с	Середня питома потужність гальмування, кг м/см ²	Середній коефіцієнт тертя	Стабільний коефіцієнт тертя	Лінійний знос, мкм, за гальмува- нням		Об'ємна температура, °С
					Фрикцій- ний матеріал	Контргіло (чавун)	
ФМК-11	—	25	0,27	0,90	16,0	2,0	430
		32	0,26	0,80	28,0	1,0	510
		42	0,25	0,80	36,00	0,5	520
		52	0,21	0,70	44,00	0,0	590
МКВ-50А	—	25	0,37	0,90	6	5,5	500
		32	0,34	0,85	8	5,0	550
		42	0,30	0,80	10	4,5	580
		52	0,28	0,70	13	4,0	610
СМК-80	—	—	0,39	0,73	1,25	4,0	560

Матеріали на основі олов'янистої бронзи містять 62...86% міді, 5...10% Sn, 5...10% Pb, до 2% Fe, 4...8% C (графіту), до 3% Si₂, до 2% Ni, 0,75% Si. Їх застосовують у гальмівних пристроях, що працюють без мастила.

Для роботи гальмівних пристроїв в умовах тертя без змащування великого поширення набув матеріал марки МК-5 на основі олов'янистої бронзи з максимальною робочою температурою 300...350°С і коефіцієнтом тертя 0,16...0,32.

В електромагнітних муфтах фрезерних верстатів, гальмах вулканізаторів-форматорів і фрикційних пар торових варіаторів швидкостей застосовуються порошкові спечені матеріали на основі алюмінієвої бронзи. Заміна текстоліту на цей матеріал дає змогу продовжити термін експлуатації фрикційної пари у 15 разів.

Матеріали для роботи в умовах рідкого мастила. Недоліком «сухих» фрикційних пристроїв, окрім підвищеного зношування, є різке зниження їхньої ефективності у випадку наявності мастила на поверхні тертя дисків, розміщених у безпосередній близькості від підшипників, що сильно змащуються, шестерень, валів та ін.

Перспективнішими в цьому випадку є фрикційні пристрої, що не потребують відділення системи їх змащення від системи змащення інших

деталей, механізмів і вузлів.

Основні переваги мастильних фрикційних пристроїв полягають у:

- плавності вмикання;
- високій зносостійкості й довговічності;
- легкості та надійності охолодження;
- спрощенні герметизації.

Одним із недоліків цих пристроїв є зниження фрикційної ефективності. Динамічний коефіцієнт тертя спечених фрикційних матеріалів в умовах змащування становить максимум 0,08...0,10, тобто він приблизно у три рази нижчий від коефіцієнта тертя без мастила. Внаслідок цього виникає необхідність компенсації нижчого коефіцієнта тертя матеріалу збільшенням діаметра дисків, їх кількості або підвищенням питомого навантаження на поверхні тертя. Збільшувати розміри дисків або їх кількість непрактично, тому найчастіше вдаються до підвищення тиску у фрикційних пристроях до 6...8 МПа. Порошкові спечені матеріали в мастилі у пристроях можуть працювати за швидкостей до 100 м/с, а в окремих випадках – і вищих.

У фрикційних пристроях, що експлуатуються в умовах мастильного середовища, переважно застосовують матеріал марки МК-5. Коефіцієнт тертя цього матеріалу залежно від умов роботи коливається в межах 0,04...0,07.

Для роботи в умовах змащування можна рекомендувати фрикційні матеріали на основі алюмінієвої (ФАБ) або алюмінієво-олов'янистої (типу ФАОБ) бронзи. Основні характеристики цих матеріалів порівняно з характеристиками матеріалу МК-5 наведено в табл. 10.12.

Крім матеріалів типу МК-5 застосовують композити, що містять домішки муліту, бентоніту й азбесту, що за певних умов характеризуються вищими коефіцієнтами тертя, ніж матеріал МК-5.

Таблиця 10.12

Експлуатаційні характеристики фрикційних матеріалів на бронзовій основі

Назва матеріалів	Швидкість ковзання, м/с	Питоме навантаження, кг/см ²	Питома робота, кг/см ²	Тип змащення	Коефіцієнт	Знос, мкм, за 100 гальмувань
МК-5	20	38	21	МТ-16П	0,05	1,4
МК-5	15	14,5	5,8	ДП8	0,06	0,4
ФАБ	20	38	21	МТ-16П	0,04	0,5
ФАОБ	20	38	21	МТ-16П	0,05	0,3

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали. Для роботи в надважких умовах тертя, за високих температур використовують вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ), добуті на основі вуглецевої матриці і вуглецевих волокнистих наповнювачів. Сутність технологічного процесу отримання ВВКМ полягає у створенні армувального каркаса, уведеного в нього вуглецевої матриці.

Причини заміни одних матеріалів іншими зумовлені обмеженнями

допустимих температур експлуатації матеріалів, зумовлених їх природою. За температур понад 350°C починається деструкція полімерів. Якщо температура на робочих поверхнях металокерамічних фрикційних дисків перевищує 1000°C , відбувається їх схоплювання з матеріалами контртіла. Робочий діапазон температур вуглецевих матеріалів значно ширший і вони працездатніші за поверхневих температур понад 2000°C .

Однією з найважливіших переваг вуглецевих матеріалів є їх мала маса. У разі їх використання, наприклад, у літаках класу Іл-96 економиться до 1,5 т польотної маси порівняно з фрикційною металокерамікою.

Вуглецеві диски застосовують у більш, ніж 60% авіаційних коліс, що експлуатуються сьогодні. Намітилася тенденція до їх використання не тільки в найважчих і швидкісних літаках, а й і близькомагістральних літаках, а також у малих літаках бізнес-класу. Лише ВВФМ, використані в гальмах і зчепленні, можуть витримувати навантаження, що виникають в автомобілях класу «Формула-1». Їх застосовують і в інших спортивних та великовантажних автомобілях, а також в мотоциклах, високошвидкісному залізничному транспорті.

Вуглець-вуглецевовмісні фрикційні матеріали (ВВФМ) є армованими композитами, що містять вуглецеві волокна, які орієнтовані переважно паралельно робочим поверхням гальмівних дисків, і вуглецеву матрицю. Для їх виготовлення можна застосовувати вуглецеві волокна, отримані з віскози, поліакрилонітрилу (ПАН) і пеку. За рядом технічних і економічних причин перевага найчастіше віддається вуглецевим волокнам на основі ПАН. Фрикційні матеріали армують як дискретними, так і безперервними волокнами.

Фрикційні диски можуть бути секторними (рис. 10.1а) і повністю вуглецевими (рис. 10.1б). Сектори з ВВФМ установлюються в металевих чашках, закріплених на несучому сталевому диску (рис. 10.1а). Такі диски взаємозамінні з металокерамічними. До їх недоліків належать порівняно невеликий вигащ у польотній масі, небезпека викривлення несучих дисків і чашок за великих термічних навантажень і обмежений ресурс, зумовлений обмеженою товщиною виступаючого за межі чашок шару вуглецевих секторів, що зношується. Нові ВВФМ дають змогу створювати повністю вуглецеві диски (рис. 10.2б), позбавлені зазначених недоліків.

З експлуатаційних чинників найбільшою мірою на коефіцієнт тертя впливає кінематична енергія, що поглинається під час гальмування. Вона залежить від швидкості початку гальмування і загальмовуваної маси.

У разі переходу від одного маневру до іншого коефіцієнт тертя змінюється більш ніж на порядок. Ця енергія під час рулювання – $0,1 \text{ кДж/см}^2$, за нормальних посадкових гальмувань – $3,5 \text{ кДж/см}^2$, а в разі аварійних гальмувань – близько 10 кДж/см^2 .

Слід зазначити, що ВВФМ чутливі до умов зовнішнього середовища, зокрема вологості, коли виявляється ефект, сутність якого полягає в зменшенні гальмівного моменту після тривалої стоянки літака, особливо в умовах підвищеної вологості, і зумовлений наявністю у вуглецевих матеріалах залишкової пористості.

Атмосферна волога потрапляє в пори матеріалів, а потім у процесі фрикційного нагрівання пара води, адсорбуючись на робочих поверхнях, полегшує тертя і знижує коефіцієнт тертя до неприпустимих значень. Властивий матеріалу коефіцієнт тертя відновлюється після нагрівання до 120...150°C.



Рисунок 10.1. Секторні (а) і повністю вуглецеві (б) гальмівні диски

Працездатність гальмівних пристроїв з фрикційними вуглецевими матеріалами істотно знижується у разі потрапляння на робочі поверхні дисків у разі недотримання необхідних заходів поводження зі спеціальними рідинами (миючими, протиобледенілювальними та ін.), які застосовують для обслуговування літаків.

Коефіцієнт тертя в цьому випадку знижується в результаті адсорбції на робочих поверхнях продуктів розкладання – легких оксидів, які з охолодженням знову конденсуються в порах, і під час подальших гальмувань описаний ефект повторюється.

За механічними характеристиками ВВФМ близькі до конструкційних вуглепластиків. За високих температур вуглецеві композиції схильні до окиснення. На відміну від фрикційної металокераміки, на поверхні якої у процесі нагрівання утворюються тверді оксидні плівки, що позитивно впливають на тертя, окиснення вуглецю киснем повітря, що починається за температури понад 500°C, відбувається з утворенням газоподібних продуктів. Цей процес прискорюється з підвищенням температури і підсилюється наявністю відкритих, доступних для кисню пор, що додатково розвиваються у міру окиснення. Спочатку окиснюються бічні (неробочі) поверхні, а у міру збільшення кількості експлуатаційних циклів процес окиснення поширюється в шари, що найбільше нагріваються, розміщені під робочими поверхнями, розпушуючи їх, що призводить до зниження міцності.

У зв'язку з цим під час конструювання фрикційних вузлів необхідно забезпечити захист від проникнення і дифузії кисню. Використовуються технологічні, конструктивні методи, спеціальні покриття, захисні екрани на бічних неробочих поверхнях фрикційних елементів, спеціальні домішки до складу фрикційних матеріалів, що пригнічують активні центри в реакціях з киснем.

10.2.3. Методи створення нових фрикційних матеріалів

Висока зносостійкість фрикційних матеріалів визначає економічність експлуатації і їх надійність у роботі машин і механізмів, де їх застосовують. Зусилля, спрямовані на підвищення зносостійкості матеріалів, насамперед пов'язані із заходами боротьби проти надмірного підвищення температури на поверхні тертя і захоплення. Згідно з І.М. Федорченком підвищити зносостійкість можна за трьома основними напрямками:

- 1) удосконалення властивостей безпосередньо фрикційного матеріалу;
- 2) удосконалення конструкцій гальмівних або передавальних пристроїв;
- 3) регламентація умов експлуатації.

І.В. Крагельський вважає, що розробляючи фрикційні матеріали, необхідно враховувати такі основні положення.

Для зниження інтенсивності зношеності необхідно:

- забезпечити додатний градієнт механічних властивостей по глибині від поверхні тертя, що убезпечить поверхню від руйнування в результаті глибинного виривання;
- щоб матеріал у контактній зоні чинив опір багаторазовому передеформуванню.

Для забезпечення додатного градієнта механічних властивостей по глибині, здатності чинити опір передеформуванню, зниженню місцевого питомого тиску, а тим самим і поверхневих температур, доброї припрацьовуваності поверхневий (робочий) шар має бути достатньо пластичним.

Для отримання високого і стабільного коефіцієнта тертя проміжний робочий шар має бути особливої гетерогенної структури із властивостями, що забезпечують великий коефіцієнт внутрішнього тертя за високих температур, а також не мати пошкоджень поверхні тертя основних матеріалів.

10.3. Зносостійкі матеріали

До цієї групи належать матеріали:

- високої твердості;
- стійкі до абразивного зношування;
- стійкі до втомного зношування;
- стійкі до зношування в умовах високих тисків і великих ударних навантажень.

До матеріалів високої твердості належать:

- тверді сплави;
- мінералокерамічні матеріали;
- надтверді матеріали.

Тверді сплави бувають литі й порошкові. До литих твердих сплавів належать сталіти (2,5% Si, 40% Cr, 13–17% W, 50–55% Co, HRC 65); сталініти (10% Si, 18% Cr, 15% Mn, 57% Fe, HRC 65).

Порошкові тверді сплави поділяють на чотири групи:

- 1) вольфрамові (BK3, BK4, BK6, BK8, BK10, BK20, BK25, BK40);
- 2) титановольфрамові (T30K4, T15K6, T14K8, T5K10, T15K12);
- 3) титанотанталовольфрамові (ТТК12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б, ТТ20К9);
- 4) безвольфрамові й безкобальтові (ТНМ – КНТ).

Перші три групи спечених твердих сплавів складаються з карбідів тугоплавких металів (WC, Ti, Ta), зв'язаних кобальтом, і належать до вольфрамовмісних сплавів (табл. 10.13).

Таблиця 10.13

Хімічний склад та властивості деяких спечених твердих сплавів

Група	Сплав	Склад шихти, %				σ, МПа	HRA
		WC	TiC	TaC	Co		
Вольфрамова	BK3	97	—	—	3	1100	89,5
	BK4	96	—	—	4	1400	89,5
	BKB6K	94	—	—	6	1500	88,5
	BK8	92	—	—	8	1600	87,5
	BK10	90	—	—	10	1650	87
	BK15	85	—	—	15	1800	86
	BK20	80	—	—	20	1950	84
	BK25	75	—	—	25	2000	82
Титановольфрамова	T30K4	66	30	—	4	950	92
	T15K6	79	15	—	6	1150	90
	T15K10	85	5	—	10	1400	88,5
Титанотанталовольфрамова	ТТ7К12	—	4	3	12	1650	87
	ТТ8К6	—	6	2	6	1250	90,5

Структура вольфрамових сплавів являє собою частинки карбідів вольфраму WC, зв'язані кобальтом. Титановольфрамові сплави складаються з карбідів WC і TC, зв'язаних кобальтом. За високого вмісту карбіду титану (T30K4) структура складається тільки з карбіду титану і кобальту, тому що вольфрам і вуглець розчиняються в карбіді титану. Чим більше у твердому сплаві кобальту і дрібніші карбідні частинки, тим вища зносостійкість, але нижча міцність і опір ударам.

Безвольфрамові тверді сплави (переважно TiC—Ni—Mo), оскільки не містять вольфраму, значно дешевші порівняно з вольфрамовмісними. Існують численні модифікації цих основних груп як за складом (наприклад, феротитаніт), так і за технологією (гарячопресовані, тверді сплави з покриттями та ін.) і структурою (легкозернисті тверді сплави). Основні властивості твердих сплавів: висока твердість (92 HKA), зносостійкість, міцність (у разі вигину – до 3000 МПа, у разі стиснення – до 6000 МПа), теплостійкістю (800...1000°C).

Тверді сплави характеризуються також високим модулем пружності (до $6,8 \cdot 10^5$ МПа). До недоліків твердих сплавів належать висока крихкість, а також складність виготовлення фасонних виробів. Слід зазначити, що нанесення покриттів дає змогу істотно (іноді до 10 разів) підвищити їхню зносостійкість.

Тверді сплави застосовуються для виготовлення різального і пресового інструментів, робочих органів прокатних станів та ін. За експлуатаційними властивостями вони перевершують інструменти зі швидкорізальних сталей і застосовуються здебільшого для обробки матеріалів різанням з високими швидкостями.

З групи сплавів ВК найбільшу зносостійкість мають сплави ВК3, які застосовуються для обробки за високих швидкостей різання чавуну, кольорових металів і неметалевих матеріалів. Сплави ВК4, ВК6, ВК8 застосовують для чорнової обробки матеріалів.

Сплави ВК10 і ВК15, що мають завдяки підвищеному вмісту кобальту вищу в'язкість, використовують для волочильних і бурових інструментів, стійкість яких у десятки разів перевищує стійкість сталевих інструментів. Сплави з високим умістом кобальту (ВК20 і ВК25) застосовують для виготовлення штампових інструментів.

Сплави другої групи характеризуються вищою, ніж сплави першої групи, теплостійкістю (до 100°C), що підвищується в міру збільшення кількості карбїду титану. Їх зазвичай застосовують для високошвидкісного різання сталей.

Для титановольфрамів сплавів найвищу зносостійкість має сплав Т30К4. Експлуатаційна міцність сплавів Т15К6, Т5К10 вища, а зносостійкість і припустима швидкість різання нижча. Титановольфрамів сплави застосовують для чистого (Т30К4) і чорнового (Т15К6, Т5К10) загострювання, фрезерування і стругання сталі.

Сплав ТТ10К8-Б за помірної зносостійкості має високий опір ударам і високу експлуатаційну міцність. Титанотанталовольфрамів сплави від попередньої групи відрізняються більшою міцністю і кращою опірністю вібраціям і викроюванням. Їх застосовують для найбільш трудомісткого різання (чорнова обробка сталевих сплавів, виливків, кувань) важко оброблюваних матеріалів, у тому числі жароміцних сплавів і сталей (НКС 87-90).

Тверді сплави отримують пресуванням порошків карбїдів і кобальту у виробі необхідної форми і наступним спіканням за температури 1250...14500°C в атмосфері водню або у вакуумі.

Тверді сплави частіше виготовляють у вигляді стандартних пластин різної форми для оснащення різців, фрез, свердел та інших різальних інструментів, а також різних матриць для пресування напівфабрикатів і волочіння дроту.

Безвольфрамів й безкобальтовів сплави складаються з карбїду титану, карбїду хрому, карбонїтриду титану, нікелю і молібдену.

Мінералокераміка являє собою композицію, добуту методом порошкової металургії. Основою цих композицій є оксиди, карбїди, нітриди й ін. Основні мінералокерамічні матеріали – це оксидно-карбїдні (УЗ, ВОК-60, ВОК-63, ЦМ-332), безоксидні (Si_3N_4 , Si , B_4C , DN , Ti).

Надтверді матеріали застосовують для оснащення (вставками) лезових інструментів (різців, свердел, торцевих фрез) для механічної обробки. Їхня твердість і зносостійкість значно вищі, ніж твердих сплавів, мінералокераміки і швидкорізальної сталі (табл. 10.14).

Основними надтвердими матеріалами є синтетичні алмази і кубічний нітрид бору (КНБ). За твердістю синтетичний алмаз у шість разів перевершує твердість карбиду вольфраму й у вісім разів – твердість швидкорізальної сталі. За твердістю КНБ не поступається алмазу, але перевершує його за теплоємністю (1200°С) і хімічною інертністю.

Таблиця 10.14

Властивості інструментальних матеріалів

Властивості матеріалів	Швидкорізальні сталі	Тверді сплави	Надтверді матеріали	Мінералокераміка
Густина, кг/м ³	8100...8700	5500...20900	3440...3560 (нітрид бору, алмаз)	2500...4100
Мікротвердість, ГПа	7...11	9...24	74...106 (нітрид бору, алмаз)	21...33
Міцність у разі вигину, ГПа	21...4,2	0,71...1,85	0,3...0,5 (нітрид бору, алмаз)	0,3...0,75
Теплопровідність, Вт/м*К	35...70	15...60	150...40 (нітрид бору, алмаз)	15...35
Коефіцієнт термічного розширення	11...12	5...6	0,9...3,6 (нітрид бору, алмаз)	8,2...9,0
Гранична температура експлуатації, °С	500...800	800...1000	800...1300	1100...1500
Хімічна активність до оброблюваного матеріалу	Інертний	Інертний	Алмаз активний до нікелю, нітриду бору – інертний	Оксид алюмінію активний до титану і алюмінію; нітрид кремнію – до титану

Синтетичні алмази полікристалічної будови відрізняються від монокристалів меншою крихкістю і стійкістю. Їх застосування обмежується високою адгезією до заліза, що є причиною його низької зносостійкості в умовах плинності сталей і чавунів. Більшу універсальність мають інструменти з КНБ. Оскільки КНБ не має хімічної спорідненості із залізом, це дає змогу ефективно використовувати його для обробки різних важкооброблюваних сталей, зокрема цементованих і загартованих (НКС>60). При цьому високошвидкісні загострювання загартованих сталей може замінити шліфування, скорочуючи у 2–3 рази час обробки і забезпечуючи низьку шорсткість поверхні.

Матеріали, стійкі до абразивного зношування. В умовах абразивного зношування провідними є процеси багаторазового деформування поверхні ковзними по ній частинками і мікрорізання. У цих умовах найбільшу зносостійкість мають матеріали, структура яких складається з твердої карбідної фази й високоміцної матриці, що утримує їх. Таку структуру має велика група сталей і сплавів.

У найважчих умовах роботи застосовують карбідні сплави. У промисловості застосовується більше ста складних за хімічним складом литих і наплавних матеріалів. Вони являють собою сплави з високим умістом вуглецю (до 4%) і карбідотворних елементів (*Cr, W, Ti*).

Для деталей, що працюють без ударних навантажень, застосовують сплави з мартенситною структурою. До них належать сплави типу В25Х38, У30Х23М2С2Е. Деталі, що працюють у легших умовах зношування, виготовляють з низько- і середньовуглецевих сталей, що піддаються загартуванню, цементації й азотуванню.

Матеріали, стійкі до втомного виду зношування. В умовах утомного зношування працюють зубчасті колеса, підшипники кочення й ін. Матеріали, з яких виготовляють ці деталі, повинні мати високу твердість, зносостійкість, опір контактним циклічним напруженням стискання, високу контактну витривалість.

Кульки, ролики і кільця підшипників, що працюють в умовах утомного зношування, виготовляють з недорогих технологічних хромистих сталей ШХ4, ШХ 15, ШХ15ГС і ШХ20ГС.

Для виготовлення високошвидкісних підшипників застосовують сталі після електрошлакового переплаву ШХ-15Ш, що вирізняються найвищою однорідністю будови.

Деталі великогабаритних роликових підшипників діаметром 0,5...2 м (для прокатних станів, електричних генераторів) виготовляють зі сталей 12ХН3А, 12Х2Н4А, піддаючи їх цементації на велику глибину (3...6 мм).

З корозійно-стійких хромистих сталей 95Х18 виготовляють підшипники, що працюють в агресивних середовищах.

Зубчасті колеса, що працюють в умовах високих контактних навантажень, виготовляють з цементованих (нітроцементованих) легованих сталей.

Сильнонавантажені зубчасті колеса діаметром 150...600 мм і більше виготовляють із хромонікелевих сталей 20ХН3А, 12ХН4А, 18Х2Н4МА й ін. Їх використовують у редукторах вертольотів, суден, літаків. Для дрібних коліс приладів, сільськогосподарських машин застосовують хромисті сталі 15Х, 15ХФ, 20ХР й ін.

Для масового виробництва (авто- і тракторобудування) застосовують ошадливі леговані сталі (18ХГТ, 30 ХГТ, 25 ХГМ, 20 ХНМ, 20 ХГР і ін.), що піддаються нітроцементації.

Зубчасті колеса, які працюють за невисоких навантажень, виготовляють зі сталей 40, 50, 40Х, 40ХН та інших після нормалізації та поліпшення.

Для гвинтових передач і невеликих зубчастих коліс, що працюють за

малих навантажень і швидкостей, застосовують неметалеві матеріали: текстоліт ПТ і ПТК, деревношаруваті пластики, поліаміди – капрон, нейлон. Їх використовують для приводів спідометрів і розподільних валів автомобілів, кіноапаратів, текстильних і харчових машин. Перевагою таких машин є відсутність вібрацій і шуму, висока хімічна стійкість.

Матеріали, стійкі до зношування в умовах великих тисків і ударних навантажень. У таких умовах працюють траки гусеничних машин, хрестовини залізничних рейок, ковшів екскаваторів та інших деталей. Їх виготовляють з високомарганцевої аустенітної сталі. Висока зносостійкість цієї сталі зумовлена здатністю аустеніту до сильного деформаційного зміцнення (наклепу).

Слід зазначити, що зносостійкість сталі 110Г13Л максимальна, коли вона має однофазну структуру аустеніту. Таку структуру забезпечують загартуванням у воді від 1100°C. Після загартування сталь має низьку твердість (НВ 200) і високу в'язкість.

Якщо така сталь під час роботи зазнає лише абразивного зношування, то виявляється незносостійкою. В умовах впливу в поверхневому шарі сталі утворюється велика кількість дефектів кристалічної побудови (дислокацій, дефектів упакування). У результаті твердість поверхні підвищується до НВ 200, і сталь стає зносостійкою.

В умовах кавітаційного зношування також застосовують аустенітні сталі. Сталі з нестабільною структурою аустеніту (08X18H10T, 30X10T10 і ін.) при ударному впливі також наклепуються і частково мартенситно перетворюються, на розвиток чого витрачається енергія удару. Поверхнєве зміцнення цих сталей в умовах експлуатації запобігає утворенню втомних тріщин.

Ущільнювальні матеріали. Підвищене нерівномірне зношування деталей ущільнюваних елементів призводить до збільшення радіальних зазорів, спотворення структури потоку й у цілому до падіння потужності турбіни й погіршення її економічності, хоча це і не є причиною для зняття двигуна в ремонт.

Однак у випадку ремонту двигуна після будь-якого напрацювання ущільнювальні вставки соплових апаратів замінюють на нові, що спричиняє додаткові витрати часу і засобів.

У системі лопатки турбіни – ущільнювальні вставки спостерігається таке: на вставках другого ступеня, крім дефектів першого ступеня, трапляються сліди газової ерозії. На вставках інших ступенів ці дефекти трапляються рідше.

Працездатність ущільнювальних матеріалів проточної частини газових турбін значною мірою визначає надійність, економічність і ресурс авіаційного двигуна в цілому. Тому роботи спрямовано на вивчення їхніх експлуатаційних характеристик, процесів ерозійного зношування і тертя ковзання складових даної трибосистеми, а також на розроблення нових матеріалів, особливо актуальних у зв'язку з різким збільшенням ресурсу двигунів до 1000 год.

Матеріали для торцевих ущільнень. Торцеві ущільнення в різних машинах і установках працюють у широкому діапазоні швидкостей (1...150 м/с), навантажень (0,5...3 МПа) і температур (-50...+500°C). Для виготовлення

нерухомих кілець торцевих ущільнень застосовують графітові матеріали, а для обертових елементів ущільнення – термічно оброблені сталі, чавуни, бронзи, сталіт, композиційні матеріали, керамічні покриття та ін.

Однак графітові матеріали у ряді випадків не забезпечують надійної роботи ущільнень через низьку міцність графіту, підвищене зношування під час роботи у вакуумі і нейтральних газах, а також в умовах руйнування під дією вібрацій, утворення електролітичних активних пар, що викликає інтенсивне зношування графіту і металу.

Для виготовлення елементів торцевих ущільнень перспективні композиційні матеріали, виготовлені методом порошкової металургії. Вибір матеріалу визначається умовами роботи вузла тертя і характером ущільнювача рідких або газових середовищ, у контакт з якими він працює. Для кожного конкретного випадку матеріал ущільнень має відповідати таким основним вимогам: низькі значення коефіцієнта тертя; висока зносостійкість; корозійна стійкість у робочих середовищах; задовільна припрацьовуваність; достатня механічна міцність; мала проникність.

Торцеві ущільнювачі виготовляють з матеріалів, працездатних за підвищених і високих швидкостей ковзання і температур, що мають необхідні корозійну стійкість і густину.

Як матеріал для торцевих ущільнювачів використовують антифрикційний спечений матеріал ЖГрЗЦс4 на основі заліза з додаванням 3% графіту і 4% сірчистого цинку, що має перлітну структуру з 5%-м умістом цементу. Як ущільнення для балансирів ковзання тракторів успішно використовуються кільця із залізографіту ЖГр-1,5.

До групи ущільнювальних матеріалів належать матеріали з високим умістом графіту, у яких для їх зміцнення і зниження крихкості вводиться пластичний метал або сплав. Для торцевих ущільнень використовують також спечені матеріали на основі заліза, нікелю, міді й інших металів, що містять легувальні та антифрикційні присадки. Такого типу матеріали застосовують переважно для ущільнення газових і рідких середовищ з підвищеними температурами.

Матеріали для радіальних ущільнень. Ці матеріали застосовують для ущільнення силової частини газових і парових турбін, що працюють в умовах високих температур і тисків газового потоку при звукових і надзвукових швидкостях обдування з періодичним врізуванням пера лопаток або гребеня лабіринтів ротора турбіни в матеріал ущільнювального кільця або лабіринтового ущільнення.

У газових турбінах температура газового потоку становить 400...850°C і більше, швидкість потоку перевищує 100...200 м/с, а в соплових апаратах першого ступеня досягає 300 м/с. Газовий потік має окисний характер (продукти згорання рідкого палива з надлишком повітря або суміш газів складом 74% N₂, 14% C₂ і 2% H₂O). У парових турбінах ущільнювальні матеріали омиваються потоком пари зі швидкістю 200...250 м/с за температур 500...585°C і тиску 90...240 атм. Водяна пара здатна окиснювати матеріал

ущільнювальних уставок, оскільки за високої температури розкладається на кисень і водень, парціальний тиск яких збільшується з підвищенням температури.

Виходячи з умов роботи ущільнювачів у турбінах, до матеріалу, розроблюваного для їх виготовлення, ставлять такі основні вимоги:

- властивості і структура матеріалу в процесі тривалої роботи повинен бути стабільними;

- матеріал повинен бути стійкий проти окиснення й корозії за робочих температур;

- матеріал повинен мати оптимальну механічну міцність, достатню для забезпечення легкого врізування робочих гребенів у момент зіткнення і їх мінімального зношування;

- матеріал не повинен навиватися на гребені;

- значення коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу ущільнень обойми турбіни мають бути близькі, щоб уникнути розтріскування у процесі роботи під дією термопружних напружень.

Нині у вітчизняному енергомашинобудуванні застосовують матеріали на основі нікелю, міді і сплавів на їхній основі з домішками графіту, нітриду бору і деяких інших наповнювачів у композиційних матеріалах. Наповнювач повинен мати малі твердість і міцність, не взаємодіяти з основою матеріалу в процесі роботи.

Таким вимогам до міді й нікелю відповідають графіт, оксид цинку, тальк, нітрид бору, слюда.

Для виготовлення ущільнювальних уставок застосовують матеріал марки С-137, однак він має обмежену працездатність за високих температур у результаті вигорання графіту, підвищення твердості і погіршення припрацьовуваності в експлуатації. Заміна графіту нітридом бору, оксидом цинку, слюдою підвищує його жаростійкість. Порошкові ущільнювальні матеріали на основі нікелю також містять графіт, тальк, оксид цинку і нітрид бору. Їх застосовують для виготовлення вузлів ущільнень проточної частини середньо-температурних газових транспортних турбін.

У деяких типах газових турбін з робочою температурою до 950...1000°C застосовується жаростійкий матеріал марки УМБ-4С на основі синтетичної слюди з домішкою 4...8% нітриду бору. Порівняно з іншими ущільнювальними матеріалами він не схоплюється з поверхнею врізуваних лопаток і добре припрацьовується.

У більшості сучасних конструкцій газових турбін ущільнення радіальних зазорів виконують за допомогою м'яких ущільнювальних шарів, виконаних з металокерамічних матеріалів, що дає змогу врізування в їхні деталі ущільнюваних елементів без руйнування.

РОЗДІЛ 11

ДІАГНОСТИКА ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

Трибологічна діагностика як сукупність засобів і методів безперервного контролю стану фрикційних характеристик рухомих з'єднань відіграє дедалі важливішу роль у розвитку теорії і практики тертя, змашування і зношування. Активне застосування засобів діагностики викликано не тільки забезпеченням повнішої відповідності між технічним станом об'єкта дослідження і обсягом виконуваних робіт з його обслуговування, а й вимогою економії металів і забезпечення надійності машин.

Найпоширенішими розповсюдженими методами діагностичного аналізу є поточний контроль робочих параметрів (температури, потужності, тиску тощо) і дослідження продуктів зношування. Розвиваються також спеціальні способи аналізу: ультразвукові, проникні опромінення, голографії, термографії, акустичної й екзоелектронної емісії та ін.

При трибодіагностиці виробляється вимір механічних, оптичних, пневматичних, електричних, віброакустичних та інших характеристик.

Трибодіагностику вузлів тертя проводять за двома напрямками:

- а) діагностику за станом робочих поверхонь деталей пари тертя;
- б) діагностику за продуктами зношування.

11.1. Діагностика за станом поверхонь тертя

До цієї діагностичної групи належать методи поверхневої активації, акустичної і віброакустичної емісії та ін.

Метод поверхневої активації. Цей метод припускає використання радіоактивних активаторів. З методів внесення радіоактивних елементів на поверхню досліджуваної деталі можна виокремити активацію деталей у реакторі, додавання радіонуклідів у розплав, електроосадження досліджуваного матеріалу на зношувану поверхню; уведення радіонукліда і поверхнева активація деталі за рахунок опромінення пучком заряджених частинок та ін.

Методи поверхневої активації ґрунтуються на використанні іонізованого випромінювання – рентгенівського, корпускулярного, альфа-, бета- і гамма-променів. Випромінювання, що використовується в цьому методі (електромагнітної природи у вигляді частинок), характеризується різними фізичними параметрами – потоком енергії, потужністю джерела, інтенсивністю, експозиційною (поглиненою) дозою, енергією кванта тощо.

Потоком енергії випромінювання F називають відношення сумарної енергії E частинок або квантів, які проникають в об'єм елементарної сфери, до площі поперечного перерізу S цієї сфери:

$$F = E/S.$$

Потужністю джерела W називають відношення сумарної енергії частинок або квантів, які випромінюються протягом одиниці часу:

$$W = \Delta E / \Delta t.$$

Інтенсивністю випромінювання (густиною потоку енергії) y називають відношення приросту енергії випромінювання ΔE , яка проходить крізь сферу протягом години Δt , до площі S цієї сфери:

$$y = \Delta E / S \Delta t$$

Інтенсивність випромінювання змінюється обернено пропорційно квадрату відстані R від джерела до точки спостереження.

Інтенсивність J немоноенергетичного випромінювання дорівнює сумі енергій його складових. Вона зумовлює значною мірою рівень і спектр вторинного випромінювання, отриманого після взаємодії з контрольованим виробом.

Розмір випромінювальної частини джерел значно менший за відстань до контрольованого виробу і за розмір перетворювача, тому можна вважати, що інтенсивність залежно від відстані зменшується обернено пропорційно її квадрату:

$$J = J_0 \frac{R_0^2}{R^2},$$

де J_0 – інтенсивність випромінювання на відстані R_0 .

Кожен фотон або частинка характеризується енергією E або її максимальним значенням E_{max} , якому відповідає довжина хвилі λ або λ_{max} , що обчислюється за формулою

$$\lambda = ch / E,$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

h – $6,6256 \cdot 10^{-34}$ Дж;

E – стала Планка.

Випромінювання у вигляді потоку частинок описується, крім того, спеціальними величинами, основними з яких є:

— флюенс (перенесення) частинок

$$\varphi = \Delta N / \Delta t;$$

— потік частинок

$$\Phi = \Delta N / S;$$

– густина потоку частинок

$$J = \Delta N / (S \Delta t),$$

де ΔN – кількість частинок, що пройшли крізь поверхню площею S протягом часу Δt .

Під час проходження променів крізь контрольований виріб інтенсивність випромінювання зменшується, тобто кількість енергії, яка проходила за одиницю часу крізь одиницю площі, змінюється залежно від густини і товщини матеріалу. За результатами інтенсивності випромінювання визначають наявність дефектів.

Для визначення числових показників вводять поняття поглиненої й експозиційної доз та їх потужності.

Поглиненна доза випромінювання $D_{\text{погл}}$ дорівнює середній енергії E , що передається матеріалу, поділений на масу матеріалу m :

$$D_{\text{погл}} = E / m .$$

Для характеристики результатів взаємодії рентгенівського та гамма-випромінювання з матеріалом щодо ефекту іонізації слугує експозиційна доза випромінювання $D_{\text{експ}}$, яка дорівнює заряду, утвореному в одиниці маси повітря:

$$D_{\text{експ}} = Q / m .$$

Поглиненна та експозиційна дози випромінювання пов'язані коефіцієнтом

$$k_{e-n} = D_{\text{експ}} / D_{\text{погл}} ,$$

який залежить від використовуваних одиниць випромінювання.

Якщо $D_{\text{погл}}$ виражена в радах, а $D_{\text{експ}}$ – у рентгенах, то $k_{e-n} = 0,877$ Р/рад.

Потужність поглиненої дози

$$P_{\text{погл}} = D_{\text{погл}} / \Delta t .$$

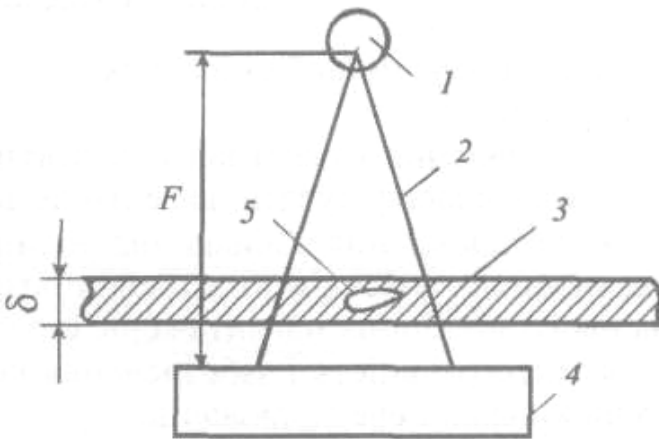


Рисунок 11.1. Схема радіаційного контролю: 1 – джерело випромінювання; 2 – прямий пучок променів; 3 – контрольований матеріал; 4 – касета з детектором і екраном; 5 – дефект; F – фокусна відстань; S – товщина матеріалу

Сутність методу полягає в тому, що на третьовій поверхні активацією прискореними зарядженими частинками створюється радіоактивна позначка. Ізотропний склад позначки і розподіл у ній активності за глибиною залежать від матеріалу деталі, виду й енергії бомбардувальних частинок, геометрії опромінення і можуть регулюватися залежно від очікуваної величини зносу в області цієї позначки.

Для визначення рівня зношування вимірюють активність

позначки за γ -випромінюванням, що має високу проникну здатність.

Це дає змогу здійснювати безперервний дистанційний контроль за процесом зношування без зупинки і розбирання вузла за допомогою радіометричної апаратури або за заданою часовою програмою. За результатами вимірювань інтенсивності γ -випромінювання активованої ділянки поверхні і відомого його зменшення в міру зношування встановлюється фактична кінетика втрати працездатності контрольованого вузла тертя.

До основних переваг цього методу належать такі: можливість безперервного контролю процесу зношування без припинення тертя; висока чутливість, що надає можливість оцінювати знос з точністю до мікрметра; можливість диференційованого оцінювання складової загального зносу,

пов'язаної з віднесенням частинок; практично відсутність впливу параметрів триботехнічного середовища на результати вимірювань. Існує й інший напрям застосування радіоактивних елементів для діагностування концентрації радіонуклідів в обробленому мастильному середовищі.

11.2. Метод віброакустичної емісії

Метод віброакустичної діагностики оцінюється з урахуванням його високої інформативності як перспективний для оцінювання стану тертьових поверхонь. Цей метод діагностики використовує як перші сигнали різні характеристики коливальних процесів: механічні коливання, акустичні збурення в пружних середовищах, хвильові ефекти у кристалічних тілах.

Слід зазначити, що вібраційні сигнали мають широкий частотний діапазон, миттєво реагують на зміни стану поверхні контактної взаємодії і до того ж просто перетворюються в електричні, що дасть змогу додатково авторизувати захід щодо діагностики.

Віброакустична діагностика ґрунтується на тому, що кожному стану системи відповідають цілком визначені вібраційні сигнали. Вибір сигналів як джерело інформації про стан устаткування зумовлений рядом причин: вони є відображенням найістотніших фізичних процесів, що відбуваються в середині устаткування; шум як носій інформації має велику ємність; реєстрація шуму надає можливість робити швидкі вимірювання безпосередньо в машинах, що працюють.

11.3. Метод акустичної емісії

Використовують його для проведення діагностичного контролю:

- виявлення і реєстрація дефектів на початковій стадії їх розвитку, що дає змогу класифікувати дефекти не за розмірами, а за ступенем їх небезпеки;
- установлення збільшення розміру тріщини на деталі в частках міліметра; можлива фіксація збільшення розміру в матеріалі до 10^{-6} мм² за впливом на нього зовнішніх навантажень, що свідчить про високу чутливість методу;
- інтегральність і забезпечення контролю об'єкта з використанням одного чи кількох перетворювачів;
- забезпечення контролю технологічних процесів виробництва і процесів зміни властивостей матеріалів;
- можливість виявлення дефектів незалежно від їх положення й орієнтації;
- зниження кількості обмежень, пов'язаних зі структурою і властивостями матеріалів, порівняно з іншими методами неруйнівного контролю.

Згідно з наявними уявленнями та визначеннями акустична емісія – це випромінювання матеріалом пружин хвиль, викликаних локальною динамічною перебудовою його структури. У методі акустичної емісії фізичне поле утворюється самим матеріалом контрольованого об'єкта й містить повний обсяг інформації про перебіг процесу як у поточний момент, так і в

часі. Явище акустичної емісії супроводжує перебіг внутрішніх процесів, що відбуваються в матеріалах, і полягає у вивільненні енергії, яка поширюється у вигляді пружних зміщень частинок матеріалу.

Як приклад на рис. 11.2а наведено схему випромінювання сигналів акустичної емісії в процесі розвитку в матеріалі дефектів структури (тріщини) під дією напружень. Реєстрація поширюваних пружних зміщень здійснюється датчиком, установленим безпосередньо на поверхні матеріалу виробу або на хвилеводі, який має належний акустичний контакт із поверхнею матеріалу.

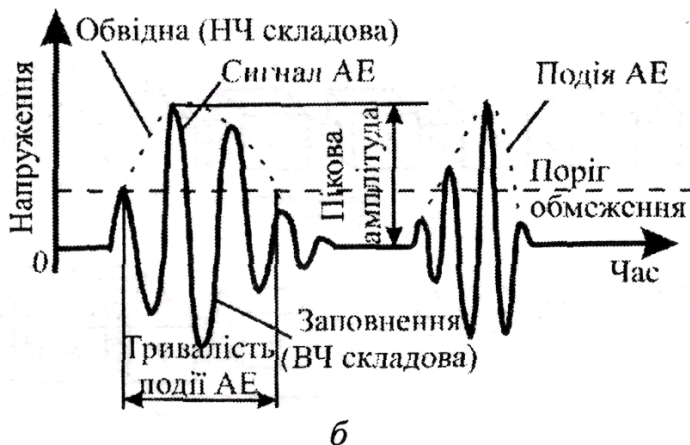


Рисунок 11.2. Схема реєстрації пружних зміщень у процесі розвитку дефекту структури матеріалу під дією напружень (а) та оброблення реєстрованого сигналу акустичної емісії (АЕ) (б)

Датчик акустичної емісії перетворює поширювані пружні зміщення частинок матеріалу в електричний сигнал, який підсилюється й обробляється електронною апаратурою на основі прийнятих концепцій. Для сигналу акустичної емісії, що реєструється, характерні, насамперед, первинні параметри, якими є амплітуда, тривалість, енергія, форма і час появи. Всі інші параметри, що використовуються для аналізу акустичного процесу, є вторинними, інформативність параметрів акустичної емісії визначається перебігом конкретних фізичних процесів.

Комплекс фізико-хімічних процесів, що відбуваються в матеріалах, визначає природу джерел випромінювання сигналів акустичної емісії та накладає певні умови на специфіку методик експериментальних досліджень і на апаратуру, що використовується для реєстрації та оброблення сигналів. Аналіз сигналів дає можливість вивчення процесів, що відбуваються в матеріалах у реальному масштабі часу.

Отримані результати використовуються для опису перебігу процесів і побудови моделей джерел випромінювання сигналів акустичної емісії, які дають змогу не лише оцінювати інформативність їх параметрів, а й сформулювати деякі вимоги до електронної апаратури. Більшість дослідників,

що вивчали явище акустичної емісії, отримали практичні результати, що добре узгоджуються між собою щодо вимог, які ставляться до апаратних засобів реєстрації й аналізу акустичної інформації. Основними з вимог є: рівень шумів, зведений до входу попереднього підсилювача, – 3...10 мкВ; частотний діапазон – від 100...200 кГц до 2...5 МГц; динамічний діапазон – 40...60 дБ.

Спектр апаратних засобів реєстрації і оброблення сигналів акустичної емісії широкий і різноманітний. Застосовуються промислові системи та блоки, які випускають такі фірми та організації, як “*Dunegann/Endexco*” (США), «*Bruel and Kyer*» (Данія), «*Trodyne*» (США), «*Setim*» (Франція), *AVT* (Велика Британія), «*Physical Acorporation*» (США), УНДІНК (Молдова), НВО «Даль-стандарт» (Росія), Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона (Україна). Дедалі більшого використання набуває обчислювальна техніка не лише для моделювання та вторинного опрацювання експериментальних даних, а й для реєстрації та вимірювання інформації про акустичну емісію. Зі всіх апаратних засобів можна виділити три напрями їх використання в організації вимірювання й опрацювання інформації, яка надходить, що базується на загальній концепції (рис. 11.3), термінах і визначеннях явища акустичної емісії, – аналоговий, аналого-цифровий і цифровий.

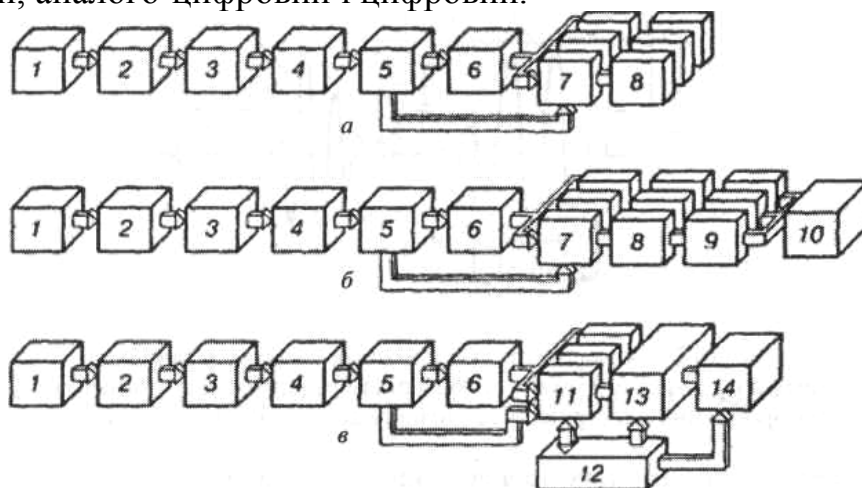


Рисунок 11.3. Структурні схеми систем реєстрації й оброблення сигналів акустичної емісії

Застосування методів акустичної емісії дає змогу контролювати кінетику тріщиноутворення в деталях трибоспряження. При цьому необхідно відфільтрувати випромінювання, пов'язане з процесами мікропластичної деформації. Відомо, що хвилі напруги, що випускаються тріщиною, перебувають в діапазоні 2000...6000 Гц, імпульси ж, пов'язані з просуванням тріщин по частоті, істотно вище загального тла. Сигнал акустичного випромінювання у вигляді поздовжньої, поперечної або релеєвської хвилі досить короткий і становить приблизно 0,03 мкс.

Для виявлення хвиль кожного типу використовуються окремі датчики, сенсibiliзовані до визначеного частотного діапазону. Зафіксований акустичний сигнал надходить спочатку на низькочастотний попередній підсилювач, після чого додатково підсилюється в 10^4 разів другим каскадом,

потім сигнал розділяється. Частина його надходить на часовий аналізатор і обчислювальну машину, методом сейсмічної триангуляції обчислюється розташування джерела емісії. Друга частина імпульсу надходить на вхід дискримінатора, де за заданого рівня напруг здійснюється його профілювання. Далі імпульс подається на загальний механізм рахунку в записувальний пристрій. Одночасне використання аналізатора енергії дає змогу, крім швидкості та її сумарного значення, аналізувати енергію й амплітуду імпульсу задля ідентифікації фізичних процесів.

Цю схему можна використовувати для аналізу явищ, що передують утомному руйнуванню на підставі трьох піків акустичної емісії. Перший пік пов'язують з високою щільністю і швидкістю рухливих дислокацій, що закріплюються на бар'єрах, або навпаки прискорюються під дією напруг, другий – з утворенням мікротріщин; третій – з виникненням макроскопічної тріщини. За одним зі способів для виявлення тріщини одночасно використовуються ультразвук і акустична емісія. Одна частина цієї системи являє собою ультразвуковий дефектоскоп, що працює для визначення довжини тріщини на частотах 50 Гц, друга – власне акустична. Обидва сигнали – ультразвуковий від дефектоскопа і акустичний від датчика – сполучаються на осцилографі й інтерферуються. Процес керується імпульсним навантаженням на зразок і в такий спосіб одночасно реєструються навантаження, розміри тріщини й акустична емісія в триботехнічній системі.

11.4. Діагностика за продуктами зношування

Однією з проблем триботехніки є створення системи, що не потребує заміни змащення, тобто сполучення з автоматизацією зношування, з одноразовим змащуванням. Однак незважаючи на високий потенціал таких систем, вони, очевидно, не можуть бути застосовані в усіх машинах і механізмах. Там, де потрібен контроль стану мастильного середовища задля підтримки його властивостей у заданих межах, будуть потрібні засоби діагностики й регулювання різної складності. Такі засоби в загальному випадку можуть бути орієнтовані не тільки на вміст у мастильному середовищі твердих частинок – продуктів зношування, оскільки легшим часто виявляється контроль параметрів хімічного складу середовища (наприклад, кислотного числа). При цьому, можливо, перспективним буде використання найнесподіваніших рішень, аж до біологічних датчиків і засобів контролю. Однак прогнозування аварійних станів у всіх випадках найефективніше за параметрами прямих «свідків» руйнування – продуктів зношування контактних тіл у рухомому з'єднанні.

Історія розвитку діагностики зношування за продуктами налічує близько шести десятиліть. Однак за цей відносно короткий період пройдено шлях від якісного опису частинок зносу в різних режимах до кількісних оцінок характеристик процесу зношування.

Дедалі більшого застосування набувають різні методи і засоби

діагностики зношування за продуктами зносу, що дає змогу проводити прямий контроль частинок, які містять інформацію про механізми і кінетику руйнування поверхневого шару.

Серед методів кількісного оцінювання продуктів зношування найпоширеніші такі методи, як емісійно-спектрофотометричної, інфрачервоної спектроскопії, полярографічний, калориметричний, магнітометричний, ферографічний, хроматографічний та ін.

Емісійно-спектрофотометричний метод діагностики стану двигунів внутрішнього згорання використовується з 1950-х років. Інтенсивність зношування трибосполучень побічно характеризується концентрацією в мастилі металів заліза, міді, свинцю, що входять до складу матеріалів тертьових деталей. Емісійний спектральний аналіз проводиться по спектрах випускання атомів та іонів, збуджених електромагнітним випромінюванням (зазвичай електричним джерелом світла – електричною дугою, іскрою).

В основу емісійних спектрофотометричних установок покладено відомий у спектроскопії метод внутрішнього стандарту, що полягає у вимірюванні відношень інтенсивності лінії аналізованого елемента до лінії порівняння. Потік світла від дуги або іскри обмежується щілиною і за допомогою диспергуючого елемента (дифракційних ґраток або кварцової призми) розкладається в спектр. Пучки світла, що відповідають довжинам хвиль, які випускаються аналізованими елементами, виділяються зі спектра вихідними щілинами і проектуються за допомогою дзеркал на фотоприймачі для подальшого порівняння.

Метод інфрачервоної спектроскопії якісного і кількісного молекулярного спектрального аналізу встановлює молекулярний склад досліджуваного зразка і використовується для визначення вмісту продуктів окиснювання олив, солей карбонових кислот, сульфатів і неорганічних нітратів за спектрами поглинання в інфрачервоній області. Для реєстрації інфрачервоних спектрів використовують прилади типу ІКС (Росія), «Спекорд» або ЦК. (ФРН), «Персин-Зльмер» (США), «Хильгер» (Велика Британія) та ін.

Полярографічний метод передбачає вимірювання залежності між силою струму і напругою за допомогою краплинного ртутного електрода, зануреного в досліджуваний розчин. Назва методу пов'язана з процесом поляризації, що зумовлений напрямленим, але обмеженим зсувом зв'язаних зарядів у розчині електроліту під дією зовнішнього електричного поля. Прилади, що застосовуються в цьому методі, називають полярографами. Полярографічний метод надає можливість визначити концентрацію частинок до 10^{-3} м на масову витрату проби в 1 г.

Калориметричний метод ґрунтується на визначенні концентрації в оливi елемента порівнянням фарбування досліджуваного і стандартного розчину з відомою концентрацією елемента. Основним недоліком методу є складність приготування розчинів, у зв'язку з чим для діагностики його застосовують рідко.

Магнітометричний метод використовують для визначення концентрації магнітних частинок зносу в оливi. Робота магнітометричних пристроїв

ґрунтується на реєстрації зміни величини прикладеного магнітного поля у разі його взаємодії з магнітним моментом вимірюваної проби. В.Е. Канарчук описав прилад для визначення забруднення олив феромагнітними продуктами зношування, що містить електромагніт, у якому в одному із проміжків між полюсами міститься пробірка з пробами. При цьому змінюється магнітний опір проміжку й у приймальній обмотці виникає напруга, за величиною якої визначається концентрація феромагнітних домішок.

Метод ферографії дає змогу виконувати якісний і кількісний аналіз робочого стану трибологічної системи за наявності мастильного матеріалу. Ферографія використовується як метод дослідження частинок зносу з 1970-х і детально описана у багатьох працях. Її застосовують як засіб прогнозування пошкоджень і запобігання виходу механізмів з ладу через передчасний знос у таких галузях техніки, як реактивні двигуни, дизелі, трансмісійні вертольоти, гідравлічні системи та ін. Метод ферографії містить два етапи:

- 1) осадження частинок у магнітному полі (отримання ферограми);
- 2) отримання кількісної інформації (аналіз ферограми).

Феромагнітні й парамагнітні частинки з потоку змащення осаджуються під впливом високого градієнта магнітного поля, напрямленого вертикально вниз. Сила, що діє на частинку, пропорційна величині частинки зносу і її магнітній проникності, тому великі частинки розміщуються на вході, малі – на виході підкладки.

Під час аналізу ферограм користуються різними методами: вимірюванням оптичної щільності ферограми, отриманої методом прямого зчитування або за допомогою системи аналізу; вимірюванням розмірами частинок зносу уздовж ферограми під мікроскопом, що може стикуватися зі сканувальним пристроєм, що дає змогу автоматично зчитувати параметри частинок і виводити отримані результати на ЕОМ; дослідженням ферограми в біхроматичному мікроскопі (використовуються червоний і зелений світлофільтри), що допомагає визначити наявність оксидів (сульфідів і чистого металу за їхнім кольором).

Попередня діагностика трибологічної системи здійснюється за індексом твердості

$$y_y = A_k^2 - A_m^2 = (A_k + A_m)(A_k - A_m),$$

де A_k і A_m – площі, зайняті великими (понад 5 мкм) і дрібними (до 1...2 мкм) частинками зношування відповідно.

Величина A_k вимірюється початковою ферограмою, A_m – на відстані 50 мм від неї. Додаткову інформацію про механізми і кінетику зношування, крім медіан розподілу площ A_i (рис. 11.4), може дати зміна площі за кривою індексу твердості A_z , що характеризує силу матеріалу.

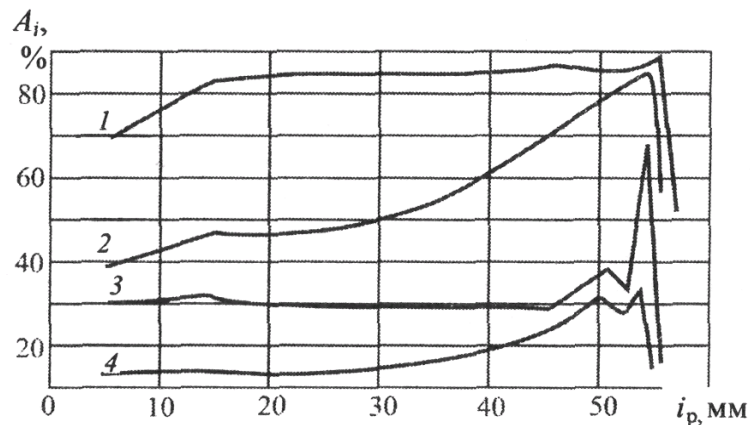


Рисунок 11.4. Зміна щільності ферограми A_i за її довжиною: i_p – ресурс напрацювання: 1—8%; 2—60%; 3—4%; 4—7%

Оптимальне значення індексу, відповідно до якого проводиться поточна діагностика, буде різним для трибологічних систем, що відрізняються схемою контактних деталей, середовищем та іншими факторами зовнішніх впливів.

Досліджувати частинки немагнітних твердих тіл можна застосуванням кількарязового електростатичного поля, градієнт якого не збігається з градієнтом магнітного поля. Крім того, застосування знаходять також спеціальні рідини, які містять розчинники оливи, що змішуються з водою, магнітні солі, що абсорбуються на частинках зносу. Отриманий розчин досліджують звичайним методом ферографії.

Хроматографічний метод полягає в поділі компонентів у рідких фазах, причому на першому етапі хроматографічного дослідження багатоконпонентна рідинна система фракціонується, а на наступному етапі розділені компоненти аналізуються.

Наприклад, диспергувальні властивості мастильних матеріалів можна оцінювати за допомогою хроматографії на фільтрувальному папері. Краплю випробовуваної оливи наносять на фільтрувальний папір поруч із краплею чистої оливи, в яку додають певну кількість сажі. Усмоктуючись у папір, олива утворює характерну круглу пляму, в якій розрізняють чотири зони: внутрішню, граничну, дисперсійну і масляну. Чим більше дисперсійної зони, тим краща якість оливи. Аналіз хроматограми здійснюється за допомогою фотоелектричного фотометра: хроматограма протягується під освітлювачем. Для використання методу в діагностиці зношування потрібне додаткове методичне припрацювання.

11.5. Перспективи розвитку діагностики зношування

Розвиток методів діагностики зношування вузлів тертя на тепер один із найважливіших напрямів кардинального підвищення безвідмовної роботи машин і механізмів. Використання запропонованих методів трибодіагностики залежить від призначення діагностованого вузла тертя, його складності та конструктивного виконання.

Найперспективнішими з погляду використання як експрес-приладів є

пристрої, засновані на принципі аналізу проб змащувальних середовищ за допомогою неоднорідних магнітних і електричних полів.

Метод фєрографії дедалі більше набуває універсальності через використання додаткової апаратури, яка дає змогу досліджувати форму, величину, твердість і хімічний склад продуктів зношування. Проте на сьогодні застосування фєрографії стримує невизначеність магнітних характеристик твердих частинок у змащувальних середовищах, зокрема тих, що включають оксиди і карбіди чорних і кольорових металів, продукти трибохімічних реакцій і частинки забруднень. Крім того, необхідність осадження продуктів зношування з проб змащувального середовища і їх аналіз ускладнюють метод. У зв'язку з цим, мабуть, найцінніші результати могли б бути отримані комбінованими засобами дії на досліджувані проби і визначенням стану проби за кількома параметрами.

Діагностика за продуктами зношування набуває дедалі більшого визнання, оскільки дає змогу проводити прямий контроль частинок, які містять інформацію про механізм і кінетику руйнування поверхневих шарів деталей вузлів тертя. За відомого хімічного складу матеріалів поверхонь тертя і володіючи статистичними методами про розподіл продуктів зношування між деталями у відсотковому вираженні можна проаналізувати кінетику процесу зношування. Хімічний склад, геометрію, розміри та форми частинок аналізують додатковим залученням спеціальних методів, таких, як калориметричний, полярографічний, магнітоіндукційний, радіоактиваційний і спектрографічний. Перспективнішим є спектрографічний метод, який позбавлений недоліків зазначених вище методів діагностики і дає змогу аналізувати частинки будь-якої природи. Окрім цього, час аналізування однієї проби в сучасних автоматизованих установках досягає 3...4 хв.

Польова експрес-діагностика пов'язана з труднощами аналізу невеликих проб, через малу кількість у них продуктів зношування (10^{-3} ... 10^{-4} %).

Створення надійних діагностичних засобів потребує передусім розроблення методики трибологічної діагностики, тобто проблеми створення діагностичних критеріїв, адекватних тим, що відображають механізм зношування, з урахуванням різноманітності процесів зміцнення, руйнування і перенесення частинок в умовах тертя.

РОЗДІЛ 12.
МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН

12.1. Методи вимірювання зношування поверхонь тертя

12.1.1. Класифікація методів вимірювання зношування

Існують різні методи вимірювання зношування від найпростіших, коли звичайними засобами вимірюють розміри деталей, що зношуються, до методів, які використовують в ядерно-фізичних процесах.

Область застосування тих чи інших методів вимірювання зношування визначають: поставлену мету досліджень, необхідну точність вимірювань, можливість вимірювання малого зношення, час, необхідний для вимірювання зношування, можливість вимірювання зношування в умовах експлуатації без розбирання, а в ряді випадків – без зупинки машини, затратами часу і засобами, необхідними для всього циклу підготовки.

Для вимірювання зношування можна застосовувати як інтегральні, так і диференційні методи оцінювання. В ряді випадків застосовують також методи оцінювання зношування за вихідними параметрами виробу чи спряження.

В свою чергу інтегральні методи вимірювання зношення поділяють на: А – методи вимірювання, що базуються на оцінюванні сумарного зносу; і Б – методи вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зношування у змащувальному середовищі.

До різновидностей методу А – вимірювання, що базуються на оцінюванні сумарного зносу, відносять:

- за зміною маси зразка;
- за зміною об'єму зразка;
- за заміром зазору в спряженні.

До різновидностей методів вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зношування в змащувальному середовищі, відносять спектральний аналіз і дослідження за допомогою радіоактивних ізотопів.

Диференційні методи дозволяють визначати розподіл зношування по всій поверхні тертя і оцінити вплив нерівномірності зношування на вихідні параметри виробу.

Диференційні методи поділяють на методи вимірювання, що базується на мікрометрії, метод штучних баз і метод поверхневої активації.

До методу вимірювання, що базується на мікрометрії, відносять:

- вимірювання розмірів;
- профілографування.

Різновидами методу штучних баз є такі:

- метод відбитка;
- метод лунок;
- метод зліпка.

До різновидів методу поверхневої активації відносять:

- метод активації частини ділянки;
- застосування вставок.

Методи вимірювання вихідних параметрів спряження поділяють за вимірюванням:

- коефіцієнта тертя;
- витрати мастила;
- температури.

Вимірювання величини зношування за зменшенням ваги чи об'єму деталі застосовують, як правило, при дослідженні зразків. Цей метод малоприматний для більшості деталей машин.

Оцінювання зношування за зміною вихідних параметрів спряження дає лише побічну уяву про величину зношування.

Розглянемо основні методи, які застосовують для вимірювання зношування поверхонь тертя при роботі різних спряжень в умовах їх експлуатації або випробувань.

12.1.2. Визначення зношування за вмістом продуктів зношування в змащувальному матеріалі

Даний метод ще називають методом визначення вмісту заліза, його окислів та інших домішок у змащувальному матеріалі. Він базується на взятті проби у відпрацьованому мастилі, де накопичились продукти зношування, що являють собою металічні частинки, оксиди металів і продукти хімічної взаємодії металів з активними компонентами мастила.

Перевага даного методу в тому, що він дозволяє уникнути розбирання агрегатів і вузлів. Метод застосовують у лабораторних умовах і при експлуатації для вимірювання інтегрального зношування. Точність методу характеризується чутливістю приладів до вмісту металічних домішок у мастилі, який складає 10^6 - 10^8 г в см^3 мастила. Лінійне зношування даним методом оцінити важко.

При відборі проби необхідно, щоб вона характеризувала середній вміст продуктів зношування в мастилі. Наприклад, при взятті проби з картера двигуна масло зливають і ретельно перемішують.

Для аналізу проб мастила на вміст заліза та інших складових застосовують різні методи.

Хімічний аналіз базується на визначенні вмісту заліза, інших продуктів зношування в попелі спаленої масляної проби.

Спектральний метод базується на визначенні вмісту механічних домішок в мастилі з допомогою спектрального складу полум'я при спалюванні проби мастила. Метод досить складний, довготривалий і дорогий.

Радіометричний метод базується на вимірюванні радіоактивності продуктів зношування, які містяться в мастилі. Продукти зношення накопичуються у фільтрі в результаті зношування радіоактивних деталей. *Радіоактивність деталей* створюється введенням радіоактивних ізотопів у розплавлений матеріал або з допомогою покриття деталей радіоактивним шаром.

Активаційний аналіз має спільні риси зі спектральним і радіометричним

методами. Вміст продуктів зношування в мастилі визначається за їх радіоактивністю з допомогою аналізу спектрів гамма-випромінювання після опромінення взятої проби нейтронами. При використанні методу активаційного аналізу радіаційна небезпека відсутня.

12.1.3. Метод мікрометричних вимірювань

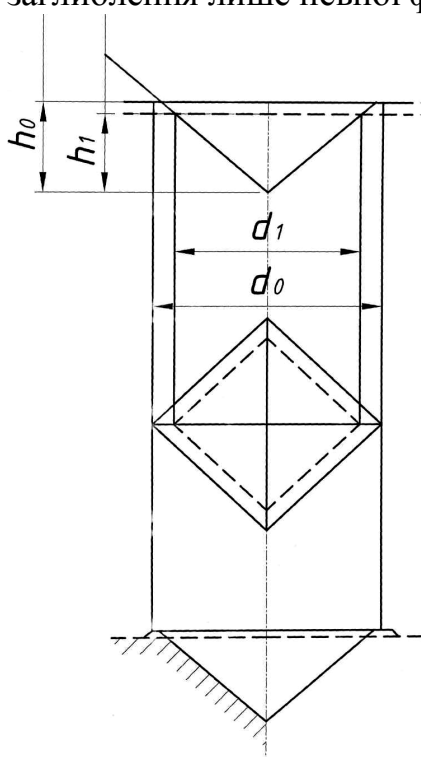
Базується на вимірюванні деталі до і після зношування з допомогою мікрометра, індикатора чи інших приладів, точність яких знаходиться в межах 1 – 10 мкм.

У більшості випадків для вимірювання зношування можна застосовувати ті ж універсальні і спеціальні засоби, які використовуються для контролю точності даної поверхні при її виготовленні.

Недоліком даного методу є те, що ним неможливо вимірювати зношування в процесі роботи машини.

12.1.4. Метод штучних баз

Полягає в тому, що на поверхню, яка зношується, наносять заглиблення лише певної форми в вигляді конуса, піраміди і т.п. За зменшенням розмірів заглиблення (відбитка) роблять висновок про величину зношення. Застосовують різні варіанти даного методу.



Метод відбитків (рисунок 12.1). Для

утворення заглиблення застосовують алмазну чотиригранну піраміду з квадратною основою і кутом 136° при вершині між протилежними гранями. Таку піраміду використовують у приладах для визначення мікротвердості (ПМТ-3 і Віккерс).

Піраміду тиску під навантаженням у поверхню і заміряють діагональ відбитка. Після зношування розмір відбитка зменшується (d_1) і за різницею ($d_0 - d_1$) роблять висновок про величину зношування $U = h_0 - h_1$. Діагоналі вимірюють з допомогою оптичного вимірювального засобу через мікроскоп.

Рисунок 12.1. Метод відбитків

Даний метод має ряд недоліків. По-перше, при втискуванні піраміди навколо відбитка відбувається спучування матеріалу, в результаті чого спотворюється форма відбитка. По-друге, після зняття навантаження відбувається деяке відновлення заглиблення.

Спучування знімають поліруванням. Пружного відновлення відбитка уникнути не вдається.

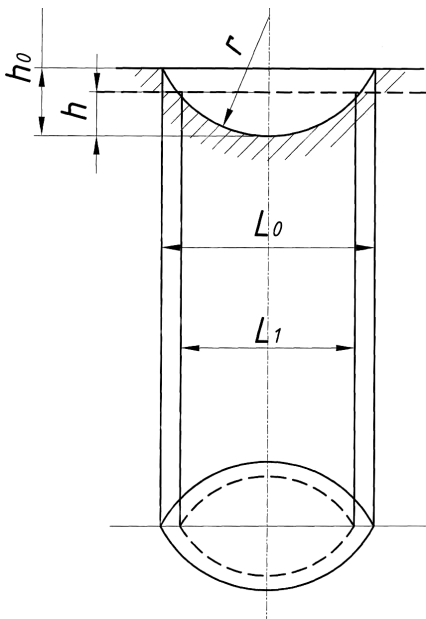


Рисунок 12.2. Метод лунок

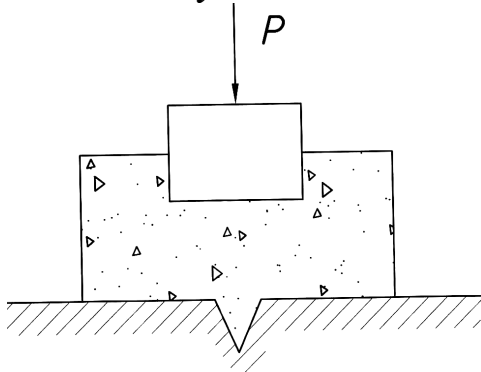


Рисунок 12.3. Метод негативних відбитків

Широкого застосування набув метод, який запропонували проф. М.М. Хрущов і Е.С. Беркович, його називають *методом вирізаних лунок*.

Цей метод полягає в тому, що на досліджуваній поверхні різцем, який обертається, виготовляють лунку (рисунок 12.2). За зменшенням її розмірів при зношуванні роблять висновок про величину місцевого зношування. Метод лунок має ряд переваг порівняно з методом відбитків. За цим методом втискування індентора замінене на виготовлення лунки різанням, унаслідок чого явища спучування металу і пружного відновлення зведені до мінімуму.

При ускладненні вимірювання зношування безпосередньо на деталі застосовують *метод негативних відбитків* (рис. 12.3).

На поверхню наносять заглиблення (відбиток чи спеціальну риску). Потім з неї знімають зліпок за допомогою самотвердіючої маси або пластмаси. Висоту відбитка заміряють звичайними методами і порівнюють з розмірами, отриманими після зношення.

12.1.5. Метод поверхневої активації

Метод базується на вимірюваннях зниження радіоактивності при зношуванні.

На деталі на заданій ділянці створюють радіоактивний об'єм глибиною 0,05-0,4мм шляхом опромінення зарядженими частинками (дейтронами, протонами, α -частинками).

Величину зношення визначають за допомогою градуовального графіка шляхом порівняння зниження радіоактивності деталі зі зниженням радіоактивності зразка.

Метод поверхневої активації призначений для контролю зношування деталі у стендових і експлуатаційних випробуваннях без розбирання і зупинки машини.

12.2. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування

У першій половині ХХ століття А.К.Зайцев розробив і запропонував найбільш загальну і раціональну класифікацію лабораторних машин для вимірювання матеріалів на зношування. Відповідно до цієї класифікації всі лабораторні машини для вимірювання матеріалів на зношування поділяють на шість категорій.

Машини I категорії – це машини з найбільш точними вимірювання. Вони реєструють параметри, які дають можливість слідкувати за ходом процесу зношування і за величинами параметрів процесу.

У цих машинах обов'язково вимірюють і реєструють силу тертя, температуру поверхонь тертя, частоту обертання і роботу тертя. Величину зносу визначають точним вимірюванням або зважуванням до і після кожного досліду.

Машини II категорії – простіші, але досконаліші лабораторні машини для випробування матеріалів на зношування при певному його виді. Умови досліджень вибирають, виходячи з умов роботи матеріалів у конкретних вузлах тертя.

Машини III категорії – машини для швидкого і простого контролю заводської продукції.

Машини IV категорії – спеціалізовані машини, які імітують умови роботи матеріалів у машинах.

Машини V категорії – машини для випробування на зношування готових деталей.

Машини VI категорії – стенди для випробувань на якість роботи і на зношення готових машин.

12.3. Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя

В установках, призначених для вивчення фрикційних властивостей матеріалів, використовують різноманітні методи визначення сили тертя, швидкості ковзання і температури.

12.3.1. Вимірювання сили тертя

Широкого розповсюдження набули динамічний (пружинний) і маятниковий методи вимірювання сили тертя.

У сучасних лабораторних установках використовують динамометри високої жорсткості з електричними тензорезисторними силовимірювачами (рис. 12.4). Вони являють собою дротяні датчики, наклеєні на пружний елемент вимірювача (як правило, на сталю консольну балку, так звану тензобалку або кільце).

Дротяні перетворювачі й тензометри на їх основі мають такі переваги: малу інерційність, можливість автоматичної реєстрації показників, високу чутливість, дистанційність вимірювань. Недоліком тензодатчиків є залежність

показників від температури, бо нагрівання змінює опір перетворювачів.

Найпоширенішою стала схема, в якій дротяний (робочий) перетворювач вмикається в одне плече моста, а неробочий перетворювач (аналогічний робочому) – у сусіднє плече. Внаслідок цього температурна похибка вимірювання значно зменшується. Обидва перетворювачі наклеюють на такий же метал, як і вимірювальне (тензометричне) стальне кільце, або на балку (рис. 12.4).

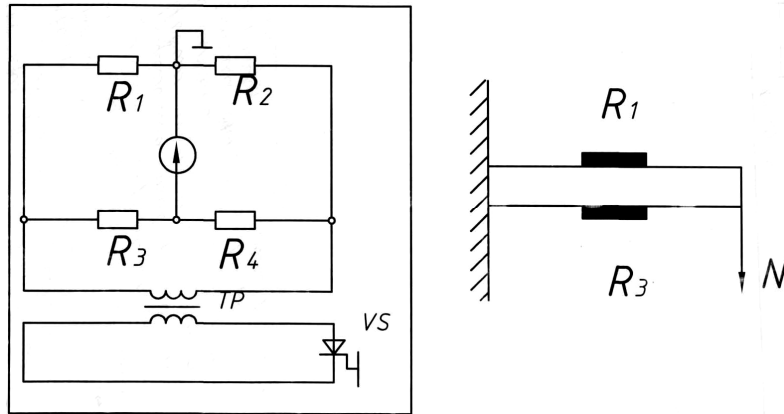


Рисунок 12.4. Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя

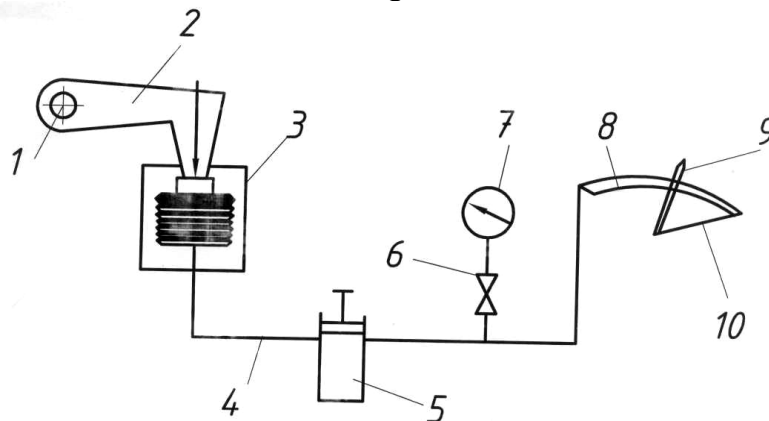


Рисунок 12.5. Манометрична схема вимірювання моменту тертя: 1 – вал; 2 – важіль; 3 – мездоза; 4 – трубопровід; 5 – порошковий компенсатор; 6 – вентиль; 7 – манометр; 8 – трубка Бурдона; 9 – перо самописця; 10 – пружина

При вимірюванні моменту тертя поряд із тензометричними системами застосовують гідродинамічні (манометричні). Манометричну схему вимірювання моменту тертя зображено на рис.12.5.

12.3.2. Вимірювання температури

Безпосереднє вимірювання температури, як фізичної величини, є неможливим. У зв'язку з цим визначення температури здійснюється завдяки її перетворенню в іншу фізичну величину, яка піддається кількісному оцінюванню.

У практиці вимірювання температур поверхонь, що труться, найбільшого

поширення набули контактні термоприймачі (термопари).

Найбільш застосовують *штучні термопари*. В них термометричним параметром є термоелектрорушійна сила (ЕРС).

Термопари вимірюють температуру в діапазоні від -100 до 2500°C з точністю $\pm(0,1 \dots 25^{\circ}\text{C})$.

Одним із недоліків таких термопар є їх інерційність, на яку впливає матеріал термоприймача, його форма і розміри.

Зі зменшенням розмірів гарячого спаю термопари точність вимірювань підвищується.

Суттєвим недоліком штучних термопар є те, що вони не дозволяють замірювати температуру безпосередньо поверхонь тертя.

В літературі є дані, що хромель-алюмелева термопара здатна реєструвати зміну температури в тисячні долі секунди.

Практично безінерційною є природна термопара. Це забезпечується тим, що її спай нагрівається від джерела, яке знаходиться в самому спаї. Електродами такої термопари є самі елементи пари тертя. Недоліком природної термопари є складне її градування, яке здійснюється штучною термопарою. Використання природної термопари можливо у випадку, коли контурна площа контакту близька до номінальної.

Похибки вимірювань можуть бути викликані стрибками струмів, які зумовлені спалахами температур і порушенням контакту при ковзанні.

Для визначення температур біля поверхні тертя, а також температурних градієнтів у тонших об'ємах матеріалу, ніж у випадку штучної термопари, застосовують метод напівштучної термопари. Вона немає постійного гарячого спаю. За даним методом термоелектрорушійна сила заміряється між одним з елементів пари тертя і привареним до нього електродом, виготовленим з іншого матеріалу.

Недоліком даного методу, як і методу природної термопари, є складність градування можливість вимірювання температури тільки металевих матеріалів.

Для вимірювання температур використовують також і термометри опору.

Орієнтовно про температуру тертя можна зробити висновок за допомогою легкоплавких індикаторів температури, кольорів мінливості, термофарб.

Професор Б.І. Костецький розробив структурний метод дослідження температур при терті. Суть його полягає в тому, що про величину температури роблять висновок за структурними змінами і мікротвердістю матеріалів.

Перспективним напрямком розвитку методів вимірювання температури при терті є використання апаратури, принцип роботи якої базується на реєстрації теплового випромінювання нагрітих поверхонь. Основною перевагою даного методу є дуже низька інерційність. Постійна часу сучасних фотоопорів, які використовують у ролі перетворювачів, дорівнює $10^{-6} \dots 10^{-7}$ с.

Вперше температуру тертя за інфрачервоним випромінюванням зареєстрував Ф.П. Боуден. Інтенсивність випромінювання замірювали з

допомогою сірчано-свинцевого фотоелемента. Зразок, що обертався, був виготовлений з прозорого матеріалу.

Термовізуальний метод вимірювання температур при терті. Суть методу полягає в реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єкта дослідження і наступному перетворенні випромінювання в електричні сигнали чи у видиме зображення. В процесі променевого теплообміну беруть участь лише тонкі поверхневі шари. Для провідників така товщина шарів має порядок 1 мкм. Тому теплове випромінювання для твердих тіл можна розглядати як поверхневе явище.

Блок-схема тепловізора зображена на рисунку 12.6. Тепловізійна установка складається з оптичної головки і відеоконтрольного пристрою амплітудного індикатора й індикатора яскравості. Інфрачервоне випромінювання поверхні тертя системи дзеркал оптичної установки фокусується на чутливий шар фотоприймача (фотоопору), який перетворює інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали.

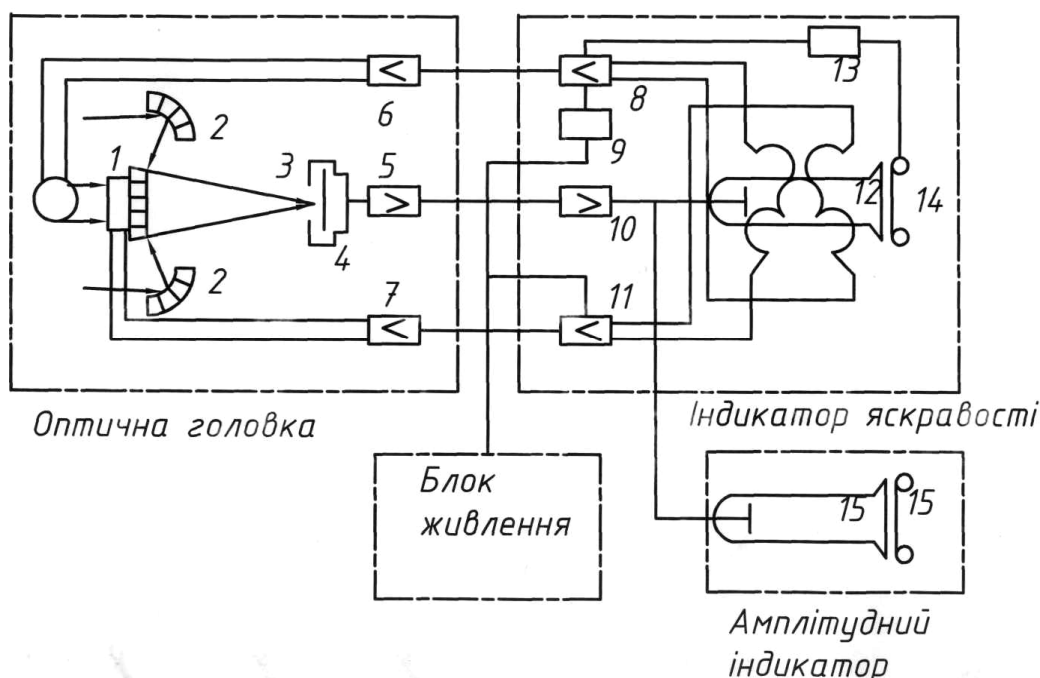


Рисунок 12.6. Блок-схема тепловізійної установки:

1 – плоске дзеркало; 2 – параболічне дзеркало; 3 – фотоопір; 4 – охолоджувальний пристрій (рідкий азот); 5 – попередній підсилювач; 6 – скануючий пристрій по кадрах; 7 – скануючий пристрій по рядках; 8 – генератор кадрової розгортки; 9 – вузол формування і змішування рядкових і кадрових гасячих імпульсів; 10 – відеопідсилювач; 11 – генератор рядкової розгортки; 12 – електронно-променева трубка; 13 – вузол синхронізації роботи затвору фотоапарата; 14, 15 – фотоприставки; 16 – електронно-променева трубка амплітудного індикатора

Електричні сигнали, підсилені попереднім підсилювачем і відеопідсилювачем, модулюють яскравість променя електронно-променевої трубки індикатора яскравості. На екрані індикатора яскравості утворюється растр

телевізійного типу (теплогограма), оптична густина на якій пропорційна інтенсивності інфрачервоного випромінювання ділянки поверхні тертя. Паралельно електричні сигнали надходять на екран амплітудного індикатора, на якому найбільшій інтенсивності випромінювання відповідає максимальне значення амплітуди електричного променя.

Фотоприставки дозволяють проводити синхронну зйомку амплітудного зображення і зображення яскравості. Точне наведення на об'єкт здійснюють фокусуванням оптичної системи приймального пристрою.

12.3.3. Дослідження вузлів тертя машин та розроблення рекомендації з підвищення їх надійності на основі методу паспортизації

Для розроблення ефективних заходів із підвищення надійності пар тертя машин необхідно мати інформацію про найслабші та вразливі вузли, які обмежують надійність машини.

В основу діагностики технічного стану деталей, що труться, покладено метод паспортизації, який базується на оптимізації процесів, що проходять при терті і зношуванні матеріалів. Він дозволяє встановити причинні зв'язки, пояснити протікання цих процесів, класифікувати їх і розробити методи керування ними.

Крім того, паспортизація пар тертя дає можливість отримати повне уявлення про вплив матеріалу деталей, спосіб його обробки, зовнішніх механічних дій, мастила і середовища на якісні й кількісні характеристики зношування деталей машин.

Метод паспортизації застосовують у наукових дослідженнях, розробленні, виробництві, експлуатації та ремонті машин і механізмів.

При проведенні паспортизації складається технічний паспорт вузла тертя.

Структура паспорта містить такі групи характерних факторів: стан деталей пар тертя, нових або відремонтованих; умови тертя; протікання процесів зношування і пошкодження; заходи (рекомендації) з підвищення зносостійкості.

Перша група факторів включає дані, які характеризують матеріал і поверхні тертя досліджуваних деталей після їх виготовлення і ремонту.

Основними з них можуть бути:

1. Вид матеріалу (сталі і сплави на основі заліза, кольорові метали і сплави, полімери, неметалічні матеріали).

2. Загальні характеристики матеріалу, його фізичні, хімічні й механічні властивості (границя міцності, границя текучості, твердість, в'язкість, теплопровідність та ін.).

3. Геометричні характеристики деталей (розміри поверхонь тертя, точність, зазори в парі та ін.).

4. Геометрія контакту (площина–площина, циліндр–циліндр, конус–конус, сфера–сфера, гвинт–гайка, площина–конус, циліндр–площина, сфера–площина та ін.).

5. Види і режими обробки поверхонь (метод механічної обробки, деформаційне зміцнення, електромеханічна обробка, хіміко-термічна обробка та ін.).

6. Характеристика якості поверхонь тертя (шорсткість, мікротвердість, покриття, структура поверхні і матеріалу в січенні).

До цього розділу можна додавати макро- і мікрофотографії поверхонь і структури матеріалу або їх ескізні зображення, дані про мікротвердість поверхонь тертя і перерізу матеріалу, профілограми та ін.

Друга група факторів несе інформацію про режими тертя деталей. В паспорт записують дані, які характеризують:

Характер відносного переміщення (обертальне, поступальне, зворотно-поступальне).

Тип тертя (кочення, ковзання, вертіння, кочення з проковзуванням).

Характер навантаження (притискне, постійне, плавно-перемінне, ступінчасте, ударне та ін.).

Режими й умови тертя (діапазон навантаження в контакті, діапазон відносних швидкостей переміщення, діапазон температур).

Вид змащення (без змащення, граничне, напіврідинне, рідинне, тверде покриття).

7. Характер системи змащення (циркуляційна, крапельна, фітільна та ін.).

8. Характер навколишнього середовища (повітря, вакуум, агресивні середовища, абразивне середовище).

Третя група факторів розкриває триботехнічні характеристики вузла тертя, зміну структури і властивостей матеріалів пари тертя.

У паспорт записують дані про тертя та зношування деталей (швидкість зношування, зміну геометрії деталей і поверхонь тертя, шорсткість зношеної поверхні, структурний стан поверхневих шарів матеріалу), встановлюють домінуючий вид зношування поверхонь тертя.

В додатку до даної групи додають фотографії зношених деталей і поверхонь тертя або їх ескізні зображення, мікротвердість поверхневих шарів деталей.

Четверта група містить рекомендації й заходи з підвищення зносостійкості та надійності досліджуваної пари.

Рекомендації можна поділити на такі групи:

- конструктивні (зміна конструкції вузла, матеріалів деталей пари тертя, системи подавання мастила та ін.);

- технологічні (методи і способи механічної обробки, шорсткість поверхонь тертя та ін.);

- експлуатаційні (зміна марки мастила, періодичності заміни фільтрів, рекомендації з регламентного обслуговування та ін.).

В додатку до паспорта наводять графіки, діаграми, таблиці, схеми, фотографії та інше.

Приклад технічного паспорта деталей пар тертя колінчастий вал – вкладки шатуна наведено в таблиці 12.1 двигуна внутрішнього згорання моделі СМД 62.

Таблиця 12.1

Технічний паспорт деталей пар тертя колінчастий вал – вкладки двигуна

Машина: двигун внутрішнього згорання СМД-62 Вузол тертя – колінчастий вал – шатунна вкладка		
Показники	Деталь I (колінвал)	Деталь II (вкладка)
1. Характеристика деталей		
Марка матеріалу	Сталь 45	Смуга сталь-сплав А06-1
Хімічний склад	C – 0,42...0,50%, Si – 0,17...0,37% Mn – 0,50...0,80%	Sn – 5,5...7,0%, Cu – 0,7...1,3%, Si – до 0,3%, Al – решта
Фізико-механічні властивості		
Тимчасовий опір, НМ/м ²	610	120 - 136
Межа текучості, НМ/м ²	360	46 - 54
Ударна в'язкість, мДж/м	0,5	
Твердість, НВ	229	40-48
Термічна обробка СВЧ, НРС на глибину, мм	48-52 2,5-3,0	
Температура початку плавлення, °С	1350	224
Теплопровідність, В/мК	32	180
Геометричні характеристики		
Розміри поверхні тертя, мм	Діаметр 85 ^{-0.015}	Діаметр 85 ^{+0.131}
	Довжина 82 ^{+0.14}	Довжина 32
Розміри поверхні тертя, мм	Овальність - 0,015	Непаралельність поверхонь стиків твірної зовнішньої поверхні не більше 0,02
	Конусність - 0,015 Корсетність - 0,01	
	Діжеподібність - 0,01	Неперпендикулярність торців до твірної поверхні не більше 0,45 мм на довжині 90 мм
Геометрія контакту	Циліндр-циліндр	
Якість поверхні		
Шорсткість R _a , мкм	0,16-0,18 Рисунок 12.7	0,63-0,50 Рисунок 12.8
Мікротвердість, Н/мм ²	H=0,981 Рисунок 12.9	H=0,049
Спосіб кінцевої обробки поверхні	Механічна обробка (шліфування)	
2. Характеристика умов тертя		

Характер відносного руху	Обертвий	
Тип тертя, що реалізується	Ковзання	
Характер навантаження	Змінний	
Максимальний питомий тиск при номінальній потужності P, МПа	34-35	
Швидкість пересування V, м/с: - при номінальній потужності - при максимальній швидкості холостого ходу	9,35	10,15 3,56
- при максимальному обертовому моменті	6,54 – 7,34	
Температура змащувального матеріалу за нормальних умов роботи, °С	60-80	
Система змащування	Двоконтурна, під тиском передпускового прокачування масла до 0,15 МПа	
Змащувальний матеріал: - взимку - влітку	М - 10Г ₂ М - 8Г ₂	
Тиск масла, МПа: - при нормальних обертах колінвала - при мінімальних обертах	0,2-0,4 Менше 0,12	
Спосіб фільтрації	Повнопоточна центрифуга	
Навколишнє середовище	Газове	
Ресурс деталей до ремонту, год.	6000	6000
Амортизаційний термін служби деталей, год.	15600	15600
3. Характеристика зношування і пошкодження		
Час роботи вузла, год.	540	
Геометрична характеристика зношеної поверхні	Рисунок 12.10	Рисунок 12.11
Структура поверхні		
Мікротвердість, Н/мм ²	Рисунок 12.12	
Встановлений вид пошкодження поверхні тертя	Гаряче заїдання (схоплення другого роду)	
Коефіцієнт тертя (при граничному змащуванні)	0,06-0,08	
4. Рекомендовані заходи для підвищення зносостійкості деталей		
Конструктивні		Заміна матеріалу вкладки (використання сплавів АМСТ з 5% свинцю)

Технологічні	Зміна технології кінцевої обробки шийок (обробку шийок колінвала методом термодифузійного борування проводити гартуванням з відпуском до міцності HRC 56-58)	
Експлуатаційні	Заміна змащувального матеріалу М - 10Г ₂ на масло М-10Г _{к2} або використання змащувального матеріалу з особливо стійкими протизадирними присадками (1,5% радону міді)	



Рисунок 12.7. Профілограма мікрорельєфу робочій поверхні нової шийки колінчастого вала



Рисунок 12.8. Профілограма мікрорельєфу робочій поверхні нової вкладки

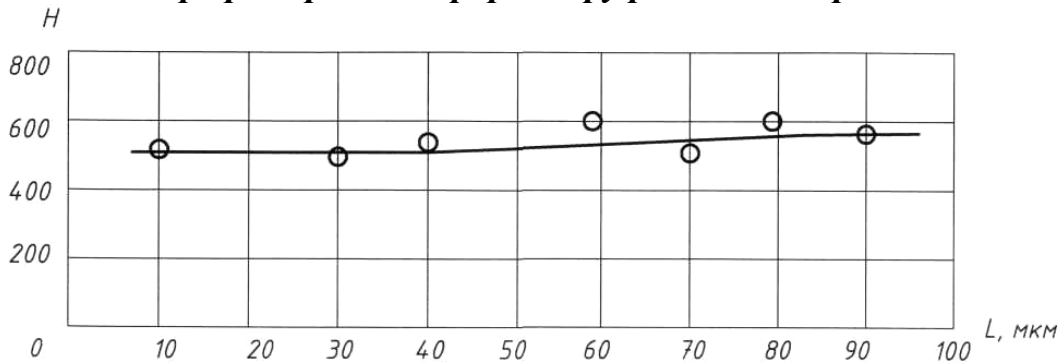


Рисунок 12.9. Мікротвердість поверхневих шарів нової шийки колінвала

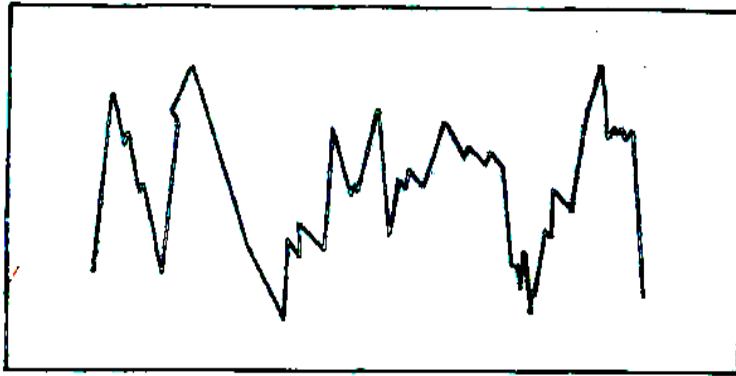


Рисунок 12.10. Профілограма мікрорельєфу поверхневого шару пошкодженої шийки вала

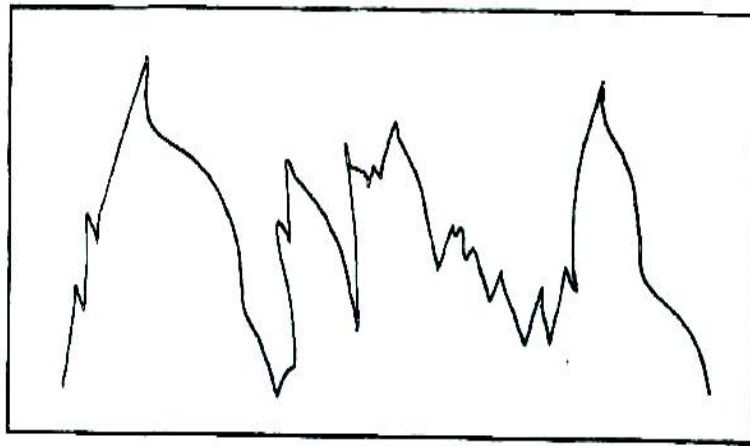


Рисунок 12.11. Профілограма мікрорельєфу поверхневого шару пошкодженої вкладки

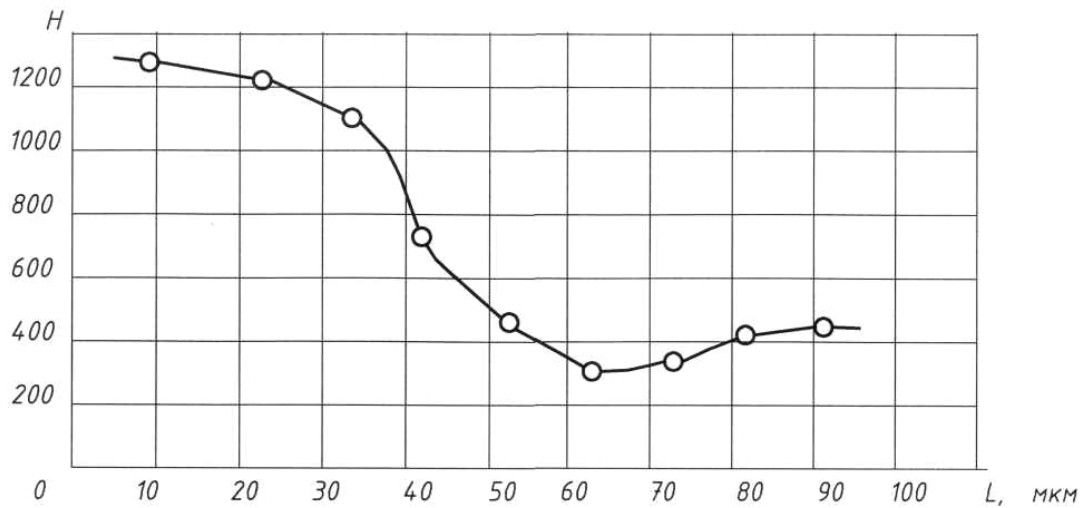


Рисунок 12.12. Мікротвердість поверхневих шарів пошкодженої шийки колінвала (характерна зміна мікротвердості при гарячому задирі)

РОЗДІЛ 13.
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

13.1. Дослідження впливу величини навантаження на коефіцієнт тертя

13.1.1. Мета і завдання

1. Вивчити характер і закономірність впливу величини навантаження на коефіцієнт тертя контактуючих матеріалів.
2. Визначити зміну величини коефіцієнта тертя від величини навантаження.

13.1.2. Порядок виконання роботи

Для виконання роботи студенту видають деталі пари тертя, змащувальний матеріал, вказують матеріали, методи їх термічної обробки, механічні властивості.

До початку досліджень експериментальна установка повинна бути проградуйована. Після цього проводять притирання та припрацювання пари тертя.

Виконувати лабораторну роботу слід у такій послідовності. Увімкнути прилади контролю експерименту та установки. В зону тертя подати змащувальну рідину. При встановленій частоті обертання контртіла навантажити вузол тертя силою P_1 і здійснювати контроль величини моменту тертя. Коли момент тертя протягом певного часу ($t=10...15$ хв) є стабільним, довантажити вузол силою P_2 ($P_2 > P_1$). Контроль моменту тертя проводити аналогічно як і при навантаженні силою P_1 .

Навантаження вузла тертя здійснюється від сили P_1 до сили P_k - $P_1 < P_2 < P_3 < ... < P_k$) критичної сили, при якій стрибкоподібно зростає момент тертя і настає схоплювання.

Опрацювання результатів досліджень включає статистичне опрацювання результатів вимірювання моменту тертя при навантаженні і визначення за градувальним графіком величини коефіцієнта тертя. Результати опрацювання досліджень записати в таблицю 13.1.

Таблиця 13.1

Результати вимірювання коефіцієнта тертя
залежно від величини навантаження

Матеріал пар тертя; швидкість обертання контртіла			
Механічні властивості зразка			
Механічні властивості контртіла			
Змащувальна рідина			
№з/п	Навантаження (P)	Момент тертя (M_T)	Коефіцієнт тертя (μ)

За даними таблиці побудувати графічну залежність функції $\mu = f(P)$, на якій позначити допустимі навантаження.

13.1.3. Запитання для самоконтролю

1. Фундаментальні закономірності зовнішнього тертя (залежності $f - p$ і $f - V$).
2. Коефіцієнт і сила тертя.
3. Класифікація видів зношування.
4. Класифікація методів вимірювання зносу.
5. Характерні ознаки пошкоджень поверхонь контакту при різних видах задиру.
6. Принцип роботи лабораторних вимірювальних пристроїв.
7. Фізико-хімічні проблеми, що виникають при пошкодженні пар тертя схоплюванням першого і другого роду.
8. Зношування, знос, інтенсивність зношування, пошкодження, пошкоджуваність тощо.

13.2. Дослідження впливу змащувального середовища на коефіцієнт тертя і величину критичного навантаження

13.2.1. Мета і завдання

1. Вивчити вплив змащувального середовища на коефіцієнт тертя та величину критичного навантаження матеріалів пар тертя.

2. Класифікація лабораторних машин для дослідження матеріалів на зношування.

3. Вивчити вплив змащувального середовища на діапазон і рівень нормального (окислювального) механіко-хімічного зношування.

13.2.2. Порядок виконання роботи

Для виконання роботи студенту видають деталі пари тертя, змащувальні матеріали та присадки до них, вказують матеріали, методи їх термообробки, механічні властивості.

До початку роботи експериментальна установка повинна бути проградуєвана. Після цього провести притирання та припрацювання пари тертя.

Виконувати лабораторну роботу в такій послідовності. Увімкнути та прогріти прилади контролю експерименту. В зону тертя подати базову змащувальну рідину (наприклад, вазелінове м03 вузла тертя силою P_1 і контролювати величини моменту тертя за показами приладів, а результати записати у журнал досліджень з фіксацією часу роботи. Через кожну хвилину в зону контакту подати змащувальну рідину. Якщо при P_1 моменти тертя протягом 15 хвилин стабільні, довантажити вузол послідовно силами P_1, P_2, \dots, P_k ($P_1 < P_2 < P_3 < \dots < P_k$) з контролем моменту тертя і постійним подаванням змащувальної рідини. Навантаження здійснювати до сили величиною P_k , при якій стрибкоподібно зростає момент тертя і настає пошкодження вузла тертя.

Після завершення даного етапу досліджень опрацювати результати досліджень. З градуєвальної кривої визначити коефіцієнт тертя для кожного ступеня навантаження, а значення його записати в журнал досліджень.

Наступний етап експерименту передбачає дослідження впливу складу змащувального середовища на величину коефіцієнта тертя і критичну силу навантаження. Це дослідження проводять аналогічно попередньому, тільки в базову змащувальну рідину додають певну кількість однієї зі встановлених присадок. Навантаження доводять до P_k і опрацьовують експериментальні дані.

Для виявлення впливу змащувального середовища на показники тертя дослідження проводять як у попередніх випадках, тільки з різними мастилами.

Статистично опрацьовані експериментальні дані записують у таблицю 13.2.

Після завершення експериментів та опрацювання їх результатів необхідно зробити висновки про вплив відповідних присадок та змащувальних рідин на величину коефіцієнта тертя, величину критичного навантаження вузла та діапазон нормального механіко-хімічного (окисного) зношування.

Таблиця 13.2

Дослідження впливу змащувального середовища на показники тертя

№ з/п	Матеріали пари тертя	Змащувальна рідина	Процент присадки	Навантаження Коефіцієнт тертя			
				P μ_1	P μ_2	P μ_3	

13.2.3. Запитання для самоконтролю

1. Вплив середовища на механізми процесу тертя та зношування матеріалів.
2. Класифікація мастил.
3. Склад мастил.
4. Вплив хімічно-активних речовин та присадок на фізико-хіміко-механічні процеси, що протікають у зоні контакту.
5. Класифікація присадок.
6. Ефект Ребіндера.
7. Адсорбція поверхнево-активних речовин і змащувальна дія.
8. Маслянистість змащувального матеріалу.
9. Тверді змащувальні матеріали.
10. Пластичні змащувальні матеріали.
11. Адсорбція і хемосорбція.

13.3. Дослідження трибомеханічних параметрів при абразивному зношуванні та пошкодженні

13.3.1. Мета і завдання

1. Вивчення впливу абразиву на величину коефіцієнта тертя при різних

режимах навантаження.

2. Вивчення впливу абразиву на величину критичної сили навантаження вузла тертя.

3. Вивчення впливу ґрунтового і технологічного абразиву на величину коефіцієнта тертя і якість поверхонь контакту.

13.3.2. Теоретичні відомості

Абразивне зношування і пошкодження – процеси руйнування поверхонь деталей машин, які зумовлені наявністю абразивного середовища в зоні тертя. Вони широко розповсюджені в практиці. Абразивне зношування має місце при роботі робочих органів ґрунтообробних, будівельних і дорожніх машин, а також в інших вузлах тертя внаслідок проникнення твердих частинок з повітрям, змащувальними та горючими матеріалами, при обробці абразивним інструментом і т.п. Цей вид руйнування в багатьох випадках зумовлений утворенням у парах тертя в процесі зношування твердих частинок. Абразивну дію проявляють також тверді структурні складові спряжених поверхонь тертя.

Форми і механізми руйнування визначають взаємодією поверхонь тертя з абразивним середовищем, суть якої полягає в ковзанні частинок, пластичному деформуванні металу, проникненні в матеріал, руйнуванні поверхневих об'ємів без виділення металу або зі зняттям мікростружки. Існує дві чітко виражені форми прояву абразивних процесів, які відрізняються характером взаємодії часток з поверхнею металу: а) з переваженням механіко-хімічного руйнування (пластичне деформування поверхневих об'ємів, їх окислення і наступне руйнування утворених плівок). Ця форма є різновидністю механіко-хімічного зношування; б) з переваженням механічного руйнування поверхневих шарів (проникнення абразивних часток і руйнування поверхневих шарів об'ємів металу без відділення часток основного металу або зі зняттям мікростружки). Ця форма відноситься до недопустимих при зовнішньому терті процесів пошкодження.

13.3.3. Порядок виконання роботи

Для виконання роботи студенту видають деталі пари тертя, вказують матеріали, методи їх термічної обробки, механічні властивості, змащувальну рідину, абразив ґрунтовий (глобулярної форми, з заокругленими гранями) і технологічний (з гострими різальними гранями різної дискретності); вказують матеріали абразивних часток.

До початку досліджень експериментальна установка повинна бути проградуєвана, а контактуючі деталі пари тертя необхідно притерти і припрацювати.

Виконання лабораторної роботи проводити в такій послідовності. Увімкнути прилади контролю експерименту та установку. В зону тертя подати змащувальну рідину. При встановленій частоті обертання контртіла проводити навантаження вузла тертя силою P_1 і здійснити контроль величини моменту тертя. Після стабілізації моменту тертя проводити довантаження силою $P_2 (P_1 > P_2)$, знімати покази стабілізованого моменту тертя й аналогічно

здійснити довантаження до критичної сили P_k , коли момент тертя стрибкоподібно зростає.

Результати експерименту записати в журнал досліджень; побудувати графічну залежність коефіцієнта тертя від сили навантаження $\mu = f(P)$ та зняти профілограму з поверхні тертя зразка. На горизонтальній ділянці кривої залежності $\mu = f(P)$ вибрати силу навантаження P_b (за погодженням з викладачем) для подальших досліджень.

Після цього змінити пару тертя, притерти і припрацювати. В зону тертя подати змащувальну рідину з певним умістом ґрунтового абразиву відповідної дисперсності. При навантаженні на вузол тертя, що дорівнює P_a , зняти покази та зробити профілограму поверхні тертя зразка.

Наступний етап досліджень проводити з технічним абразивом, який має гострорізальні кромки. Послідовність експерименту така ж, як і з ґрунтовим абразивом.

Після проведення дослідів заповнити таблицю досліджень, проаналізувати результати та зробити висновки з проведеної роботи. Необхідно узагальнити вплив відповідних концентрацій та дискретності ґрунтового та технологічного абразиву на триботехнічні показники та якість поверхні контакту в порівнянні з результатами, отриманими при терті без абразиву в змащувальній рідині, а також порівняти вплив ґрунтового і технологічного абразиву на величину коефіцієнта тертя при однакових силах навантаження і якість поверхонь контакту.

13.3.4. Запитання для самоконтролю

1. Вплив абразиву на фізико-хіміко-механічні властивості поверхонь контакту при терті.
2. Роль абразиву при нормальному механіко-хімічному зношуванні.
3. Шляхи підвищення надійності вузлів тертя при абразивному зношуванні.
4. Механізм руйнування матеріалів при абразивному зношуванні.
5. Різновиди абразивного зношування.
6. Механізми абразивного зношування полімерних матеріалів
7. Особливості абразивного зношування пластмас.

13.4. Визначення виду зношування та пошкодження поверхонь контакту вузлів тертя

13.4.1. Мета і завдання

1. Визначити вид зношування і пошкодження поверхонь тертя за характерними ознаками і ведучими механізмами руйнування.

2. Визначити з допомогою комплексу досліджень процеси, що виникають при контакті поверхонь тертя та механізми, які зумовлюють виникнення пошкодження.

13.4.2. Теоретичні відомості

Окислювальне зношування – процес поступового руйнування поверхонь

деталей при терті, викликане взаємодією активних пластично-деформованих (текстурованих) поверхневих шарів металу з киснем повітря або змащувального середовища. Окислювальне зношування проявляється в утворенні хімічно адсорбованих плівок, твердих розчинів і хімічних сполук металу з киснем і видаленні їх з поверхонь тертя.

При цьому виді зношування швидкість окислення (V_o) перевищує швидкість інших процесів, що протікають на поверхні тертя, тобто окислення є домінуючим. Швидкість руйнування плівок не перевищує швидкості окислення ($V_o > V_p$).

Окислювальне зношування має дві форми прояву. Перша форма характеризується утворенням на поверхні тертя твердих розчинів кисню і тонких евтектик його сполук з металом. Друга форма характеризується утворенням хімічних сполук кисню з металом (для сталі FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄).

Основними ознаками нормального окислювального зношення, які відрізняють його від різних видів пошкоджень є відсутність будь-яких пошкоджень основного металу, локалізація руйнування в найтонших поверхневих шарах вторинних структур, що утворюються при терті, динамічна рівновага механіко-хімічних процесів утворення та руйнування вторинних структур.

Задир першого роду – процес недопустимого пошкодження поверхонь тертя в результаті виникнення локальних металічних зв'язків, їх деформації й руйнування з відділенням частинок металу або налипанням на поверхню контакту. При цьому виді пошкодження швидкість процесів утворення металічних зв'язків перевищує швидкість інших процесів і стає домінуючою. Металічні зв'язки виникають при інтенсивній деформації поверхневих об'ємів металу, зумовленій термічною пластичністю.

Для здійснення схоплювання металів необхідне зближення ювенільних ділянок на відстані дії міжатомних сил. У місцях фактичного контакту виникають активні дислокаційні центри з різко підвищеною концентрацією вакансій і дислокованих атомів. У зоні активних центрів проходить дифузія між металами, що контактують з утворенням металічних зв'язків.

Задир другого роду – процес недопустимого пошкодження поверхонь тертя, який проявляється у виникненні місцевих металічних зв'язків, їх деформації з виникненням тріщин, намазуванні, перенесенні металу і відділенням часток металу з поверхонь тертя.

Виникнення металічних зв'язків при задирі другого роду зумовлене нагріванням, розм'якшенням, деформацією і контактуванням ювенільних поверхонь. Задир другого роду виникає при терті ковзання з великими швидкостями відносного переміщення і значним питомим тиском, що зумовлює високий градієнт й інтенсивне зростання температури в поверхневих шарах металу і стан його термічної пластичності. Цей стан викликає зниження міцності металу, яка пов'язана з явищами відпуску, розм'якшення і в деяких випадках оплавлення. При цьому утворюються структури рекристалізації, відпуску, загартування і повторного загартування.

13.4.3. Порядок виконання роботи.

Для виконання лабораторної роботи видають експериментальні зразки та шліфи зі зразків пар тертя. Студент повинен провести дослідження поверхонь тертя та шарів матеріалу по глибині і зробити висновок про зовнішній вид поверхонь контакту, висоту мікронерівностей, зміну структури матеріалу по глибині, фізико-механічні властивості поверхні тертя та їх зміну по глибині. Результати досліджень представити у вигляді таблиці. Після проведення досліджень необхідно зробити обґрунтований висновок про фізичні процеси, що виникли на поверхнях контакту, домінуючий механізм процесу і на основі цього класифікувати вид зношування.

Таблиця 13.3

Характеристика стану поверхні матеріалу пар тертя

№ з/п	Критерії оцінювання процесу	Номер зразка		
		№1	№2	№3
1	Матеріал і фізико-механічні властивості зразка			
2	Зовнішній вигляд поверхні тертя			
3	Шорсткість поверхонь тертя			
4	Мікротвердість поверхонь тертя			
5	Наявність пошкоджень і глибина шару пошкоджень			
6	Наявність структурних змін по глибині			
7	Глибина шару пошкоджень			
8	Чим викликані структурні зміни			

13.3.4. Запитання для самоконтролю

1. Будова поверхневих шарів матеріалів деталей машин.
2. Класифікація видів зношування при граничному терті.
3. Механізми виникнення відповідних видів зношування.
4. Роль пластичної деформації при терті матеріалів.
5. Роль теплоти при граничному терті.
6. Роль швидкостей окислення та руйнування окисних плівок при терті.
7. Механізми і види окислювального зношування.
8. Принципи роботи та визначення мікротвердості з допомогою твердоміра ПМТ-3.
9. Параметри та порядок визначення шорсткості поверхні.
10. Принципи роботи та визначення шорсткості з допомогою профілометра-профілографа.
11. Визначення параметрів шорсткості мікрометрії поверхні деталей машин.
12. Основні показники якості поверхні деталей машин.
13. Геометрія поверхні як функція технологічного процесу механічної обробки деталей машин.
14. Залежність мікрометрії поверхні від швидкості різання і виду механічної обробки.

ПЕРЕЛІК КОНТРОЛЬНИХ ЗАПИТАНЬ

1. Загальні відомості про трибологію як науку про тертя і зношування машин.
2. Вклад вітчизняних і зарубіжних учених у створенні й формуванні науки про тертя і зношування машин (трибології).
3. Значення тертя в проблемі матеріало- і ресурсозбереження.
4. Зношування деталей машин і механізмів – одна з найгостріших проблем сучасності.
5. Надійність машин. Показники надійності.
6. Граничний стан технічного об'єкта. Моральне та фізичне зношування.
7. Основні терміни й означення в сучасній трибології.
8. Терміни служби деталей у вузлах тертя.
9. Збитки від тертя і зношування машин.
10. Наука про тертя і зношування деталей машин (трибології) в Україні.
11. Інженерно-технічні проблеми триботехніки.
12. Основні напрямки підвищення зносостійкості деталей, вузлів тертя машин.
13. Оптимізація конструктивних вирішень вузлів тертя.
14. Технологічні методи підвищення зносостійкості машин.
15. Експлуатаційні заходи з підвищення довговічності машин.
16. Загальні відомості про поверхню деталей, її якість.
17. Основні показники якості поверхні деталей машин.
18. Геометрія поверхні деталей (макрогеометрія, хвилястість, шорсткість, субмікрогеометрія).
19. Шорсткість поверхні, її геометричні характеристики ($R_a, R_z, R_{max}, S, S_m, t_p$).
20. Геометрія поверхні як функція процесу механічної обробки деталей.
21. Фактори, які впливають на появу геометричних відхилень поверхні деталей різного виду.
22. Залежність мікрогеометрії поверхні від швидкості різання і виду механічної обробки.
23. Будова поверхневих шарів матеріалів деталей.
24. Вторинні структури 1 і 2 типів, їх будова.
25. Визначення геометричних характеристик поверхні за її профілограмою.
26. Напруження в поверхневих шарах деталей машин.
27. Зміна робочих і залишкових напружень у поверхневих шарах при зовнішньому терті.
28. Класифікація напруженого стану поверхневого шару деталей.
29. Залишкові напруження в поверхневому шарі деталей залежно від виду механічної, термічної або хіміко-термічної обробки.
30. Залишкові напруження і температура поверхневих шарів деталей при зовнішньому терті.
31. Властивості поверхонь і поверхневих шарів деталей. Наклеп металу.
32. Види обробок і властивості поверхневих шарів деталей машин.
33. Зміна механічних і фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів залежно від технологічного методу зміцнення.
34. Пластична деформація поверхневого шару. Дефекти кристалів.

35. Текстурування поверхневих шарів деталей.
36. Поверхнева енергія. Адгезія і когезія.
37. Адсорбція і хемосорбція.
38. Поверхнево-активні речовини (ПАР).
39. Структура адсорбованого шару.
40. Ефект Ребіндера.
41. Взаємне контактування деталей. Номінальна, фактична і контурна площа контакту.
42. Технологічний і експлуатаційний (робочий) рельєфи поверхонь контакту деталей.
43. Нормальні й патологічні процеси тертя деталей машин.
44. Контакти при нормальному і патологічному процесам тертя. Умови й закономірності нормального тертя.
45. Класифікація видів тертя.
46. Класичні закони тертя.
47. Загальні теорії тертя, їх критика.
48. Сучасні теорії тертя. Структурно-енергетична теорія зовнішнього тертя.
49. Забруднення поверхні. Плівки на металічних поверхнях, їх значення і вплив.
50. Умови тертя у вакуумі.
51. Перенесення металу.
52. Твердість матеріалу.
53. Особливості тертя графіту.
54. Особливості тертя дисульфиду молібдену.
55. Особливості тертя слюди і нітриду бору.
56. Особливості тертя фторопласту.
57. Особливості тертя алмазу.
58. Тертя без змащувального матеріалу.
59. Тертя при граничному зношуванні.
60. Маслянистість мастила.
61. Роль і значення присадок (добавок) до мастила.
62. Тверді мастила.
63. Рідинне тертя (тертя при рідинному змащуванні).
64. Гідростатичні і гідродинамічні опори.
65. Режими тертя в підшипниках ковзання.
66. Тертя при напіврідинному змащуванні.
67. Тертя кочення.
68. Ефект аномального низького тертя.
69. Основні положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя.
70. Енергетичні співвідношення $\frac{\Delta E}{A}$ для різних областей тертя при зміні нормального тиску (P)
71. Енергетичні співвідношення $\frac{\Delta E}{A}$ для різних областей тертя при зміні швидкості руху V.

72. Самоорганізація при граничному терті.
73. Класифікація видів зношування і пошкоджуваності.
74. Окисне зношування.
75. Абразивне зношування і пошкоджуваність.
76. Схоплення й заїдання поверхонь при терті.
77. Втомне зношування.
78. Зношування при фретінг-корозії.
79. Зминання.
80. Ерозійне зношування.
81. Кавітаційне зношування.
82. Корозійне зношування.
83. Класифікація методів вимірювання зношування, фактори, що визначають область застосування методів вимірювання. Інтегральні методи.
84. Класифікація методів вимірювання зношування, фактори, що визначають область застосування методів вимірювання зношування. Диференціальні методи.
85. Різновидності методу вимірювання зношування, що базується на дослідженні продуктів зношування. Суть методу хімічного аналізу.
86. Різновидності методу вимірювання зношування, що базується на дослідженні продуктів зношування. Суть методу, який базується на спектральному аналізі.
87. Класифікація методів вимірювання зношування, що базується на мікрометрії. Области застосування. Переваги й недоліки даних методів.
88. Радіометричний і активаційний методи визначення зносу. Особливості даних методів. Переваги й недоліки.
89. Суть методу штучних баз вимірювання зносу. Метод відбитків.
90. Суть методу штучних баз вимірювання зносу. Метод вирізаних лунок.
91. Суть методу штучних баз вимірювання зносу. Метод негативних відбитків.
92. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування.
93. Зовнішні параметри тертя матеріалів. Суть методів вимірювання сил тертя, які ґрунтуються на застосуванні динамометрів з тензорезисторами.
94. Гідродинамічні (манометричні) системи вимірювання моменту тертя.
95. Суть методу вимірювання температур тертя з допомогою штучних термопар. Переваги й недоліки методу.
96. Суть методу вимірювання температур тертя з допомогою природних термопар. Переваги і недоліки методу.
97. Суть методу вимірювання температур тертя, які базуються на кольорах мінливості та зміні структури матеріалів. Области застосування, переваги та недоліки.
98. Суть методу вимірювання температур тертя, які базуються на реєстрації теплового випромінювання поверхонь. Переваги й недоліки. Принципи роботи тепловізійної установки.
99. Класифікація видів тертя.
100. Визначення параметрів шорсткості поверхонь контакту при терті.
101. Класифікація видів зношування.

Рекомендації студентам заочної форми навчання щодо виконання контрольної роботи

У контрольній роботі слід висвітлити 7 питань, передбачених у переліку, які вибирати за останньою цифрою номера залікової книжки.

Наприклад: остання цифра номера залікової книжки 8, тоді номер першого питання буде 8, другого – 18; третього – $18+10=28$; четвертого – $28+10=38$ і т.д.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Закалов, О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин [Текст]: О.В. Закалов. – Тернопіль: ТДТУ, 2000. – 354 с.
2. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах [Текст]: Б.И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 396с.
3. Кондрачук, М.В. Трибологія / М.В. Кондрачук, В.Ф. Хабутель, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К.: Вид-во Національного Авіаційного університету «НАУ-друк», 2009. – 232 с.
4. Гаркунов, Д.Н. Триботехника [Текст]: Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
5. Костецкий, Е.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст]: Б.И. Костецкий. – Киев – Москва: Машгиз, 1959.
6. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность [Текст]: Б.И. Костецкий. – К.: Техника, 1975.
7. Крагельский, И.З. Основы расчетов на трение и знос [Текст]: И.З. Крагельский, М.Н. Добнчин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.
8. Крагельский, И.В. Трение и знос [Текст]: И.В. Крагельский. – М.: Машгиз, 1962.
9. Костецкий, Б.И. Качество поверхности и трение в машинах [Текст]: Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колисниченко. – К.: Техника, 1969.
10. Зозуля, В.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин [Текст]: В.Д.Зозуля, Е. Лубведков, Д.Я. Ровенский, З.Д. Брау; 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наукова думка, 1990.
11. Трение, изнашивание и смазка [Текст]: справочник; в 2-х кн.; под ред. И.В.Крагельского и В.З.Алисине. – М.: Машиностроение, 1978, 1979.
12. Андреев, А.В. Передача трением [Текст]: А.В. Андреев // Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978.
13. Балакин, В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения [Текст]: В.А. Балакин. – М.: Машиностроение, 1980.
14. Внутреннее трение в исследовании металлов, сплавов и неметаллических материалов [Текст]: сборник научных трудов. – М.:Наука, 1989.
15. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст]: И.В. Крагельский и др. – М.: Машиностроение, 1977.
16. Крагельский, И.В. Узлы трения машин [Текст]: И.В.Крагельский, Н.М. Михин // Справочник. – М.: Машиностроение, 1984.
17. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания [Текст]: Г. Польцер, Ф. Майсенер; пер. с нем. О.Н.Озерского; под ред. М.Н.Добычина. – М.: Машиностроение, 1984.
18. Расчетно-экспериментальные методы оценки трения и износа [Текст]. – М.: Наука, 1980.

Зміст

	Вступ.....	3
РОЗДІЛ 1	ЗНАЧЕННЯ ТЕРТЯ В ПРОБЛЕМІ МАТЕРІАЛО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.....	6
1.1.	Загальні аспекти.....	6
1.2.	Вклад вітчизняних і зарубіжних вчених у створенні і формуванні науки про тертя і зношування в машинах.....	10
1.3.	Основні терміни й означення.....	14
1.4.	Тертя й підвищення надійності машин.....	16
1.5.	Терміни служби машин.....	19
1.6.	Збитки від тертя і зношування в машинах.....	22
РОЗДІЛ 2	ОРГАНІЗАЦІЯ БОРОТЬБИ З ТЕРТЯМ ТА ЗНОШУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УКРАЇНІ.....	26
2.1.	Області застосування триботехніки.....	26
2.2.	Інженерно-технічні проблеми триботехніки.....	28
2.2.1.	Підготовка спеціалістів з триботехніки.....	29
2.2.2.	Розроблення сучасної теорії тертя та зношування.....	30
2.2.3.	Проблема створення “беззношуваних” вузлів тертя машин.....	30
2.2.4.	Удосконалення змащувальних систем і розширення їх випуску.....	35
2.2.5.	Фінішна антифрикційна безабразивна обробка (ФАБО) поверхонь тертя.....	36
2.2.6.	Проблема водневого зношування.....	37
2.3.	Основні напрямки підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя машин.....	39
2.4.	Стан науки про тертя і зношування в машинах в Україні.....	42
РОЗДІЛ 3	ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	44
3.1.	Загальні відомості про поверхню твердих тіл і її якість.....	44
3.2.	Геометрія поверхні деталей машин.....	46
3.3.	Геометрія поверхні як функція процесу механічної обробки деталей машин.....	50
3.4.	Будова поверхневих шарів.....	53
3.5.	Напруження в поверхневих шарах.....	55
3.6.	Властивості поверхонь і поверхневих шарів у результаті технологічної обробки. Наклеп.....	59
3.7.	Пластична деформація поверхневого шару.....	61
РОЗДІЛ 4	ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ І КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ.....	64
4.1.	Поверхнева енергія. Адгезія і когезія.....	64
4.2.	Адсорбція і хемосорбція.....	66
4.3.	Взаємне контактування деталей.....	68
4.4.	Поняття про технологічний і експлуатаційний рельєф робочих поверхонь деталей.....	71
РОЗДІЛ 5	ТЕОРІЇ ТЕРТЯ.....	72
5.1.	Класичні закони тертя.....	72

5.2.	Загальні теорії тертя.....	73
5.3.	Структурно-енергетична теорія зовнішнього тертя.....	75
5.3.1.	Основні положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя.....	75
5.3.2.	Самоорганізація при терті матеріалів.....	81
5.4.	Забруднення поверхонь. Плівки на металічних поверхнях.....	84
5.5.	Особливості тертя в умовах вакууму.....	85
5.6.	Перенос металу при тертя	87
5.7.	Твердість металів.....	87
РОЗДІЛ 6	ТЕРТЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	89
6.1.	Особливості тертя шаруватих матеріалів.....	89
6.1.1.	Особливості тертя графіту.....	89
6.1.2.	Особливості тертя дисульфід молібдену.....	90
6.1.3.	Особливості тертя слюди.....	91
6.1.4.	Особливості тертя нітрид бору.....	92
6.2.	Особливості тертя тертя фторопласту.....	93
6.3.	Тертя і зношування алмазу.....	94
РОЗДІЛ 7	ВИДИ ТЕРТЯ.....	95
7.1.	Загальні аспекти. Класифікація видів тертя	95
7.2.	Тертя без змащувального матеріалу.....	98
7.3.	Тертя при граничному змащуванні.....	100
7.4.	Тертя при рідинному змащуванні.....	104
7.5.	Тертя при напіврідинному змащуванні.....	107
7.6.	Режими тертя в підшипниках ковзання.....	108
7.7.	Особливості тертя кочення.....	110
7.8.	Ефект аномально низького тертя.....	112
РОЗДІЛ 8	ВИДИ ЗНОШУВАННЯ І ПОШКОДЖУВАНOSTI ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	113
8.1.	Класифікація видів зношування і пошкоджуваності.....	113
8.2.	Механохімічне окисне зношування.....	115
8.3.	Абразивне зношування.....	117
8.4.	Схоплювання і заїдання поверхонь при терті.....	120
8.5.	Зминання.....	122
8.6.	Втомне зношування.....	122
8.7.	Корозійне зношування.....	125
8.8.	Кавітаційне зношування	128
8.9.	Ерозійне зношування.....	130
8.10.	Зношування при фретінг-корозії.....	131
РОЗДІЛ 9	ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ.....	134
9.1.	Змащувальні матеріали. Класифікація змащувальних матеріалів.....	134
9.2.	Експлуатаційно-технічні вимоги до мастил. Основні властивості мастил.....	138
9.3.	Основні види змащувальних матеріалів.....	149
9.4.	Присадки до змащувальних матеріалів. Загальні відомості.....	152

9.5.	Принцип вибору присадок до змащувальних матеріалів.....	159
РОЗДІЛ 10	ТРИБОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	161
10.1	Антифрикційні матеріали.....	161
10.1.1.	Вимоги до антифрикційних матеріалів.....	161
10.1.2.	Природа антифрикційності.....	162
10.1.3.	Критерії оцінювання підшипникових матеріалів.....	163
10.1.4.	Основні зовнішні фактори, що впливають на несучу здатність антифрикційних матеріалів.....	164
10.1.5.	Основні види антифрикційних матеріалів	164
10.2.	Фрикційні матеріали.....	179
10.2.1.	Класифікація і вимоги до фрикційних матеріалів.....	179
10.2.2.	Основні види фрикційних матеріалів.....	181
10.2.3.	Методи створення нових фрикційних матеріалів.....	186
10.3.	Зносостійкі матеріали.....	194
РОЗДІЛ 11	ДІАГНОСТИКА ВУЗЛІВ ТЕРТЯ.....	194
11.1.	Діагностика за станом поверхонь тертя.....	197
11.2.	Метод віброакустичної емісії.....	197
11.3.	Метод акустичної емісії.....	200
11.4.	Діагностика за продуктами зношування.....	203
11.5.	Перспективи розвитку діагностики зношування.....	205
РОЗДІЛ 12	МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	205
12.1.	Методи вимірювання зношування поверхонь тертя.....	205
12.1.1.	Класифікація методів вимірювання зношування.....	205
12.1.2.	Визначення зношування за вмістом продуктів зношування в змащувальному матеріалі.....	206
12.1.3.	Методи мікрометричних вимірювань.....	207
12.1.4.	Метод штучних баз.....	207
12.1.5.	Метод поверхневої активації.....	208
12.2.	Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування.....	209
12.3.	Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя.....	209
12.3.1.	Вимірювання сили тертя.....	209
12.3.2.	Вимірювання температури.....	210
12.3.3.	Дослідження надійності вузлів тертя машин та розроблення рекомендацій з підвищення їх надійності на основі методу паспортизації.....	213
РОЗДІЛ 13	МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ.....	219
13.1.	Дослідження впливу величини навантаження на коефіцієнт тертя.....	219
13.1.1.	Мета і завдання заняття.....	219
13.1.2.	Порядок виконання роботи.....	219
13.1.3.	Запитання для самоконтролю	220

13.2.	Дослідження впливу змащувального середовища на коефіцієнти тертя і величину критичного навантаження.....	220
13.2.1.	Мета і завдання	220
13.2.2.	Порядок виконання роботи.....	220
13.2.3.	Запитання для самоконтролю.....	221
13.3.	Дослідження трибомеханічних параметрів при абразивному зношуванні та пошкодженні.....	222
13.3.1.	Мета і завдання	222
13.3.2.	Теоретичні відомості.....	222
13.3.3.	Порядок виконання роботи.....	222
13.3.4.	Запитання для самоконтролю.....	223
13.4.	Визначення виду зношування та пошкодження поверхонь контакту вузлів тертя.....	223
13.4.1.	Мета і завдання	223
13.4.2.	Теоретичні відомості.....	223
13.4.3.	Порядок виконання роботи.....	225
13.4.4.	Запитання для самоконтролю.....	225
	ПЕРЕЛІК КОНТРОЛЬНИХ ЗАПИТАНЬ.....	226
	Рекомендації студентам заочної форми навчання щодо виконання контрольної роботи.....	229
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	230