

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Інжинірингу з галузевого машинобудування

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
З ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА «ТРИБОТЕХНІКА»
для здобувачів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD)
очної (денної) та заочної форм навчання

РЕКОМЕНДОВАНО
на засіданні
кафедри Інжинірингу з галузевого
машинобудування
(протокол №2 від «07» жовтня 2024р.)

ПОГОДЖЕНО
на засіданні
Науково-методичної ради
Державного університету економіки і технологій
(протокол №3 від «21» жовтня 2024р.)

м. Кривий Ріг
2024 р.

Конспект лекцій з освітнього компонента «ТРИБОТЕХНІКА» для освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» очної (денної) та заочної форм навчання / укладач: І. ЗАСЕЛЬСЬКИЙ; рецензент: О. УЧИТЕЛЬ. Кривий Ріг: ДУЕТ, 2024. 70 с.

Укладач: Ігор ЗАСЕЛЬСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент кафедри Інжинірингу з галузевого машинобудування навчально-наукового Технологічного інституту ДУЕТ

Рецензент: Олександр УЧИТЕЛЬ, докт. техн. наук, професор кафедри Інжинірингу з галузевого машинобудування навчально-наукового Технологічного інституту ДУЕТ

Відповідальний за випуск: Володимир ЗАСЕЛЬСЬКИЙ, в.о. завідувача кафедри Інжинірингу з галузевого машинобудування, д-р тех. наук., проф.

Конспект лекцій з освітнього компонента «ТРИБОТЕХНІКА» для освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) 133 «Галузеве машинобудування» очної (денної) та заочної форм навчання. Розроблено у відповідності до навчальних планів з метою надання здобувачам допомоги в засвоєнні матеріалів курсу.

ЗМІСТ

Вступ	
Тема 1. Сучасні концепції теорії змащувальних процесів. Досягнення в області Трибології та Триботехніки.	5
Тема 2. Діагностика вузлів тертя.	8
Тема 3. Компоненти змащувальних масел.	17
Тема 4. Конструкційні матеріали триботехнічного призначення.	25
Тема 5. Знос деталей машин та обладнання.	31
Тема 6. Оцінка надійності машини за фактору зносу її елементів.	36
Тема 7. Методи та засоби досліджень тертя і зношування.	41
Тема 8. Вплив середовища на інтенсивність зношування.	47
Тема 9. Зношення спряжених машин та механізмів.	49
Тема 10. Технологічні засоби підвищення зносостійкості.	56
Тема 11. Методи забезпечення зносостійкості та покращення властивостей конструкційних матеріалів триботехнічного призначення.	59
Тема 12. Практичне використання трибо техніки в технології виробництва в машинобудівних галузях.	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

Вступ.

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.

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 капітало-вкладень".

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, носить назву «Триботехніка».

Тема 1. Сучасні концепції теорії змащувальних процесів. Досягнення в області Трибології та Триботехніки.

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 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 контактні 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, носить назву «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.

Триботехніка визначається як наукова і технічна дисципліна, яка вивчає взаємодію поверхонь при їх відносному русі. Завдання триботехніки полягає у дослідженні тертя, змащування 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.

Тема 2. Діагностика вузлів тертя.

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 змашувальних 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 деформуючими 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.

Діагностика за станом поверхонь 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. До діагностичної групи за станом поверхонь тертя 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; введення 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.

Метод віброакустичної діагностики оцінюється з урахуванням його високої інформативності як перспективний для оцінювання стану третьових 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 простоперетворюються 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.

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 мм

2 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. 1 (а) 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. 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.

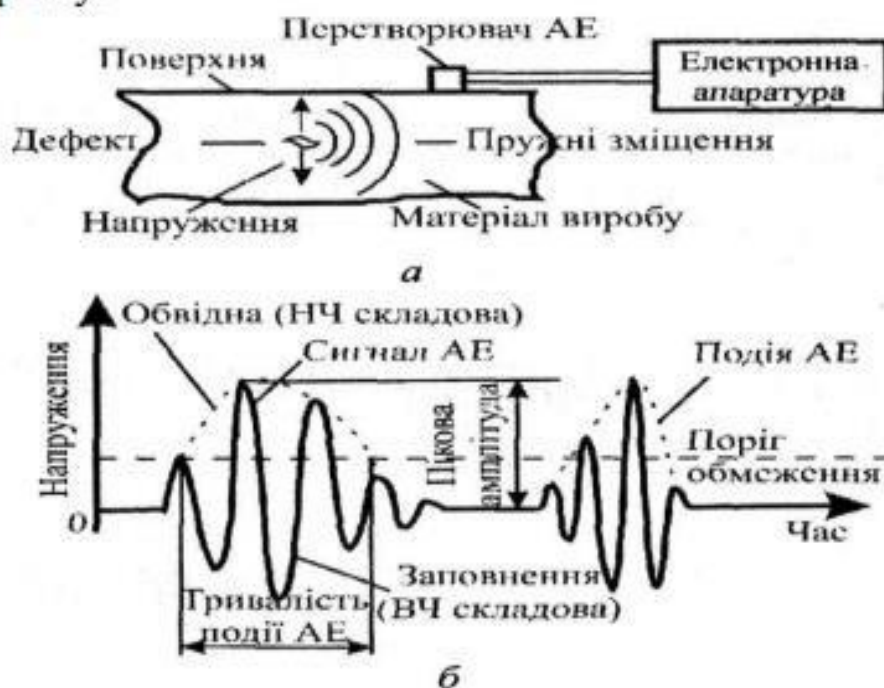


Рис.1. Схема реєстрації пружних зміщень у процесі розвитку дефекту структури матеріалу під дією напружень (а) та оброблення реєстрованого сигналу акустичної емісії (ΔE) (б)

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, сенсibiлізовані до визначеного частотного діапазону.

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.

Хроматографічний метод полягає в поділі компонентів у рідких фазах, причому на першому етапі хроматографічного дослідження багатокомпонентна 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.

Перспективи розвитку діагностики зношування

Розвиток методів діагностики зношування вузлів тертя на тепер один із найважливіших напрямів кардинального підвищення безвідмовної роботимашин 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 ферографії дедалі більше набуває універсальності через використання додаткової апаратури, яка дає змогу досліджувати форму, величину, твердість і хімічний склад продуктів зношування. Проте на сьогодні застосування ферографії стримує невизначеність магнітних характеристик твердих частинок змащувальних середовищах, зокрема тих, що включають оксиди і карбід 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.

Тема 3. Компоненти змащувальних масел.

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 вводять 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 дистилятні, 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.

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 фізикохімічні 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.

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.

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/см³. 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...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 демпфірувальна 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 кг/см² їх об'єм зменшується на 15...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 коливатися залежно від сорту мастила лише у вузьких межах, тож можливості вибору тут досить обмежені.

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. 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.

Теплопровідність (або коефіцієнт теплопровідності) – кількість тепла в калоріях, що проходить за 1 с через площу 1 см² шару товщиною 1 см за різниці температур 1°C.

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.

Емульгування мастильного матеріалу. Повітря, розчинене в мастильному матеріалі, може сприяти утворенню емульсії, повітряномасляної емульсії і піни.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 деемульгуювальну здатність; • для запобігання

заїданню і зниження зношуваності 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.

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.

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.

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.).

Тема 4. Конструкційні матеріали триботехнічного призначення.

Антифрикційні матеріали.

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.

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.

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 тертьових 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.

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.

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. Крім олов'янистих бронз порівняно широке застосування набули сплави, що не містять олова (безолов'яністі).

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.

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.

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.

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 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 металополімерних матеріалів: зміцнених сталевую 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.

Фрикційні матеріали.

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.

Тема 5. Знос деталей машин та обладнання.

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 базуються 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 мало придатний для більшості деталей машин. Оцінювання зношування за зміною вихідних параметрів спряження дає лише побічну уяву про величину зношування.

Механізм зношування металевих поверхонь.

У процесі зношування виділяють три явища: - взаємодія поверхонь тертя; - зміни, що відбуваються в поверхневому шарі металу; - руйнування поверхонь.

Ці явища безупинно переплітаються, взаємно впливаючи один на одного. Взаємодія поверхонь може бути механічним і молекулярним. Механічна взаємодія виражається у взаємному впровадженні й зачепленні нерівностей поверхонь у сукупності з їхнім зіткненням у випадку ковзання грубих поверхонь. Молекулярна взаємодія проявляється у вигляді адгезії й схоплювання. Адгезія не тільки спричиняється необхідність додатка дотичної сили для відносного зрушення поверхонь, але й може привести до виривання матеріалу. Схоплювання властиво тільки металевим поверхням і відрізняється від адгезії більше міцними зв'язками. Молекулярна взаємодія можливо також на ділянках взаємного впровадження поверхонь. Воно обов'язково буде при руйнуванні масляної плівки. Зміни на поверхнях тертя обумовлені пластичною деформацією, підвищенням температури й хімічною дією навколишнього середовища. Зміни, викликані деформацією, полягають у наступному:

1. Багаторазові пружні деформації через недосконалість структури матеріалу приводять у певних умовах до усталостному викрашування поверхностей кочення, а багаторазові пружні деформації мікронерівностей поверхностей ковзання розпушують структуру.

2. Пластичне деформування змінює структуру матеріалу поверхностного шаруючи.

Пластичне деформування твердих тіл складається із чотирьох найбільш важливих елементарних процесів:

1) ковзання по кристаллографическим площинах (ковзання в окремих зернах полікристалічного тіла відбувається звичайно по декількох площинах, число яких зростає з підвищенням напруження);

2) двойникования кристалів;

3) відхилення атомів від правильного розташування в ґратах і їхньому тепловому русі;

4) руйнування структури. Руйнування структури - це заключний етап пластичної деформації.

3. Пластична деформація при температурі нижче температури рекристалізації приводить до наклепу поверхневого шару - його зміцненню. Однак у самої поверхні структура трохи ослаблена, мікротвердість знижена. Мікротвердість досягає максимуму на деякій глибині, далі зменшуючись до вихідної. 4 При сильно відрізняються по твердості структурних складових

матеріала й багаторазовому впливі навантаження відбувається спочатку інтенсивне зношування м'якої основи, внаслідок цього підвищується тиск на выступаючі тверді складові, вони вдавлюються в м'яку основу, деякі з них дробляться й переміщуються додатково під дією сил тертя.

Абразивне зношування.

Абразивним матеріалом називають матеріал природного або штучного походження, зерна якого мають достатню твердість і володіють здатністю різання (царапанія). Абразивне зношування це руйнування поверхні деталі в результаті його взаємодії з твердими частками при наявності відносно швидкості. До таких часток відносяться: а) нерухомо закріплені тверді зерна, вхідні в контакт по дотичній або під невеликим кутом атаки до поверхні деталі (наприклад, шаржування сторонніми твердими частками м'яких антифрикційних матеріалів); б) незакріплені частки, вхідні в контакт з поверхнею деталі (наприклад, насипні вантажі при їх транспортуванні відповідними пристроями, абразивні частки в ґрунті при роботі ґрунтообробних машин і т.д.); в) вільні частки в зазорі сполучених деталей; г) вільні абразивні частки, що утягуються в потік рідиною або газом. Абразивне зношування викликають ґрунт, руда, вугілля і порода, зола, пил, що потрапили на поверхню тертя, металева стружка, окисні плівки, закріплені на поверхні тертя або зруйновані, нагар і продукти зношування, в особливості викрошившиєся частини твердих структурних складових. Зношування поверхонь деталей твердими абразивними частками Абразивна частка вдавлюється в поверхню деталі, якщо вона має більшу твердість, чим металеве тіло. Частка, що впровадилася, при русі щодо поверхні може прошкрятати риску або зрізати мікроскопічну стружку. При твердості металевої поверхні, що перевищує 60 % твердості абразиву, зносостійкість різко зростає. Таке відношення твердостей можна назвати критичним. Абразивне зношування при ударі Процес руйнування деталі при ударній взаємодії між деталлю й абразивом називають ударно-абразивним зношуванням. Цьому руйнуванню піддаються деталі бурових доліт, камене- і рудорозмільних агрегатів, породоруйнівальний інструмент пневмо- і гідроударники, деталі гусеничного ходу машин та ін. Для ударно-абразивного зношування характерне утворення на поверхні тертя лунок у результаті локальної пластичної деформації металу. Зношування від абразивних часток у зазорі пари тертя Абразивні частки тертя, що потрапили в зазори пар, під дією навантаження можуть, залежно від умов, упресовуватися в поверхні тертя, дробитися на більше дрібні фракції, сковзати або перекочуватися уздовж поверхні зношування, пружно й пластично деформуючи неї. Найбільший вплив, що зношує, роблять частки кварцу, твердість яких досягає 11...12 Гпа. Ці частки розміром 1...30 мкм можуть

довгостроково перебувати в повітрі при його русі. Повітряні фільтри двигунів автомобілів і інших машин можуть затримувати тільки великі частки пилу; дрібні частки проникають у двигун разом із засмоктуваним у циліндри повітрям. здатність, Що Очищає, фільтрів 98...99 %, тобто 1...2 % пилу, що втримується в повітрі, попадає в циліндри двигуна. При експлуатації автомобілів і тракторів запыленность повітря звичайно становить 0,5...1 г/м³, при цьому з кожним кубометром повітря в циліндри засмоктується 5...20 мг пилу. Зношування від абразивних часток у потоці рідин або газу При допущенні, що середовище неагресивне до поверхні деталі, варто розрізняти два випадки взаємодії абразивних часток з матеріалом. 1 Прямий удар (кут атаки $\beta = 90^\circ$). Залежно від маси часток, швидкості їхнього падіння, властивостей абразиву й фізико-механічних властивостей матеріалу деталі виникають пружна деформація, пластична деформація, велике руйнування, перенаклеп з відділенням матеріалу у вигляді лусочок. 2 Косий удар ($0 < \beta < 90^\circ$). При кутах атаки не більше кута тертя на характер ушкоджень поверхні сильно впливають дотична складова імпульсу й опір матеріалу впливу дотичних сил на поверхню. У деяких випадках зносостійкість гуми в кілька разів вище, ніж загартованої сталі, в інших випадках (при нульовому куті атаки) зносостійкість гуми нижче, ніж сталі, у зв'язку із фрикційною природою втомлювального ушкодження поверхні. Вплив вологості й агресивності середовища на абразивне зношування Вологість збільшує інтенсивність абразивного зношування, так само, як і агресивність середовища. Абразивне зношування в корозійно-активних середовищах Зміст водню в поверхневому шарі загартованої сталі збільшується в процесі тертя в присутності прісної й морської води в 3...3,6 рази, у незагартованої сталі - в 2,4...2,8 рази, а при терті всередовищі соку рослини в 3,8 і 3,2 рази для загартованої й незагартованої сталі відповідно. Вплив дрібних абразивних частин на зношування Експериментально встановлено, що якщо розмір часток не перевищує 5 мкм, то вони, маючи більшу розвинену поверхню, абсорбують на собі продукти окислювання масла, що може знизити інтенсивність зношування деталі. Багато досліджень показують, що частки з розмірами менш 5 мкм зменшують зношування частки, розміром більше 5 мкм - збільшують зношування.

Особливості фреттинг-корозії.

Фреттинг-корозія (від англійського слова fret - роз'їдати, підточувати) - корозіонномеханічне зношування поверхонь тертя при малих коливальних відносних переміщеннях. Фреттинг-корозія має наступні відмінності від звичайного зношування поверхонь тертя: - швидкості відносних переміщень контактуючих поверхонь досить низки (так, при амплітуді ковзання 0,025 мм і частоті коливань 30 Гц середня швидкість ковзання 3 мм/с); - продуктами

зношування є в основному окисли металів; - ушкодження поверхонь тертя сильно локалізовані на площадках фактичного контакту; - внаслідок малої амплітуди зсувів видалення продуктів зношування із зони тертя утруднено.

Необхідна умова виникнення фреттинг- корозії - наявність прослизання між сполученими поверхнями. Фреттинг- корозія спостерігається при різних пресових посадках, у шліцевих, шпонкових, болтових і заклепувальних з'єднаннях, у канатах, муфтових з'єднаннях, у контактних поверхнях ресор і пружин, запобіжних клапанах і регуляторах, у кулачкових і шарнірних механізмах і т.д. Ушкодження від фреттинг- корозії проявляються у вигляді натиров, налипань металу, виривів і раковин, часто заповнених порошкоподібними продуктами зношування. На поверхнях виникають схоплювання, мікрорізання або усталостное руйнування мікрообсягів, що супроводжуються окислюванням і корозією (усталостно-корозійні процеси). Звичайно ведучим є один з перерахованих процесів руйнування поверхні, а інші - супутніми. У результаті фреттинг- корозії в деталі змінюються конструктивні розміри, порушуються зазори, послабляються натяги, виникає заїдання й заклинювання (що особливо небезпечно у випадках, коли контактуючі деталі при роботі повинні час від часу роз'єднуватися, наприклад, у запобіжних клапанах і регуляторах), значно погіршується якість поверхні - підвищується шорсткість, з'являються мікротріщини, значно знижується втомлювальна міцність деталей.

Захист від фреттинг- корозії, конструктивно-технологічні методи захисту від фреттинг- корозії:

- збільшення натягу у випадку пресових посадок;
- створення додаткових пристроїв, що демпфірують, для гасіння вібрації в з'єднаннях;
- поліпшення системи підведення змащення;
- зниження концентрації напруг;
- підвищення точності виготовлення, зменшення перекручувань геометрической форми поверхонь;
- застосування сферичних посадкових поверхонь замість циліндричних;
- заміна підшипників ковзання підшипниками кочення;
- щільний пригін шпонок;
- зміцнення контактуючих поверхонь (хімічна й хіміко-термічна обробка, пластичне деформування).

Тема 6. Оцінка надійності машини за фактору зносу її елементів.

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-, макроі 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 2)



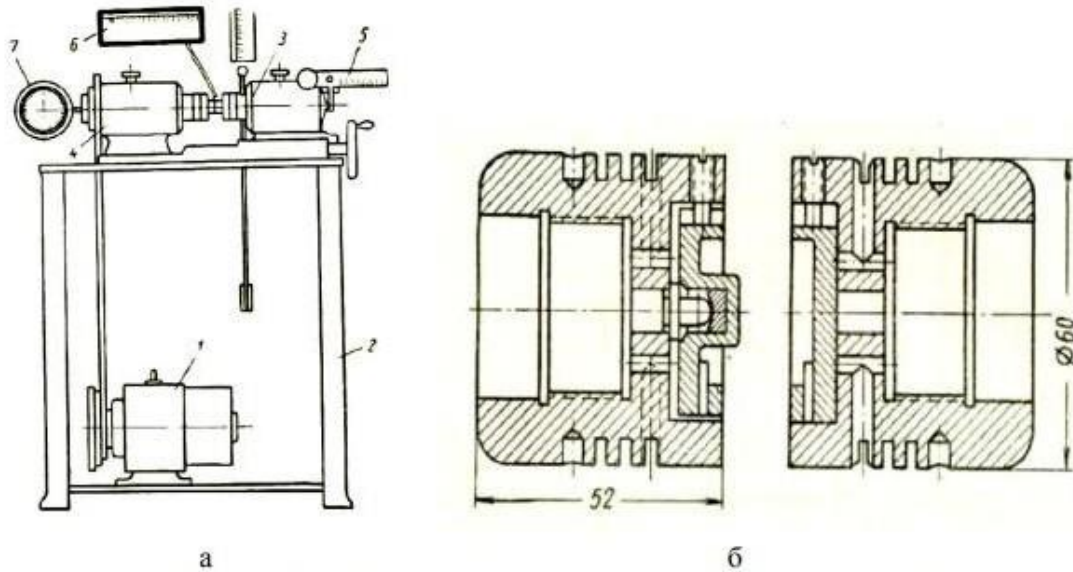
Рис. 2. Класифікації видів зношування і пошкоджуваності деталей машин

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 мінімалізації пластичної деформації, активізації тонких поверхневих шарів металу, миттєвої їх взаємодії з агресивними компонентами навколишнього середовища (газовим і рідинним) і утворення рівномірно розміщених на поверхні вторинних структур, які періодично руйнуються і

знову утворюються. Процес встановленого тертя і зношування в таких умовах має властивості саморегулювання.

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, текстуруванням 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.

Машина I-47-K-54. призначається для оцінки зношування й коефіцієнта тертя металевих і неметалічних матеріалів (рис.3). На кінцях валів укріплені голівки із гніздами для зразків. Голівка, що приводиться в обертання валу має кульову опору для гнізда, що забезпечує самовстановлення зразка. Загальний вид голівок зі зразками показаний на рис. . Випробування ведуться на двох кільцевих зразках, що труться торцями. Зовнішній діаметр зразків 28 мм, внутрішній 20 мм, висота 10- 15 мм. Машина забезпечує обертання зразків зі швидкістю 100- 5000 об/хв і можливість регулювання швидкості обертання при зміні числа оборотів. Навантаження на зразок створюються натискним пристроєм. Сила тертя й коефіцієнт тертя визначаються по попередньо відтарованому відхиленню маятника. Для зміни теплового поля є змінні голівки, які або нагріваються струмом, або прохолоджуються водою (рідким повітрям); зі зміною теплового поля змінюється коефіцієнт тертя й зношування.



1 - електродвигун; 2 - станина; 3 - рухлива бабка з обертовим валом; 4 - нерухлива бабка, у якій вал закріплений на підшипниках; 5 - навантажувальний пристрій; 6 - прилад для виміру температури, що розвивається при терті; 7- прилад для виміру числа оборотів зразків

Рис.3. Загальна схема (а) та вигляд голівок для зразків (б) машини I-47K54

Перевагою машини I-47-K54 є можливість одержання на ній широкого діапазону температур (до 1000°). Вона дозволяє оцінювати теплостійкість фрикційних і антифрикційних матеріалів. Стандартні випробування матеріалів на фрикційну теплостійкість проводяться при стаціонарному режимі тертя.

Для випробування матеріалів на фрикційну теплостійкість самозмащувальних матеріалів у вакуумі було розроблено машину I-47-B2. Вона дозволяє одночасно випробовувати три пари тертя (у вакуумі 10-8 -10-9 мм. рт. ст.- одну пару тертя, у вакуумі 10-5 -10-7 мм. рт. ст. - дві пари тертя). Електродвигун постійного струму 11 (рис.4) приводить в обертання через пасову передачу 10 магнітну муфту 1, що фланцевим з'єднанням кріпиться до патрубку 4. Муфта надає руху валу 2, установленому у підшипниках ковзання з металокераміки з MoS₂ у корпусі 3. На кінці вала є кульова опора для оправки рухливого зразка 7, що полегшує прилягання зразків по поверхні тертя. Нерухомий зразок 8, установлений в оправці 6, має можливість провертатися в підшипнику, поки упорний гвинт не торкнеться тензометричної балочки 5 з тимбільшою силою, чим більше сила тертя. Вузол тертя навантажується важільною системою з вантажем 9. Електродвигун, муфта, корпус вузла тертя охолоджуються водою.

Момент тертя замірюють системою: тензометрична балочка з тензодатчиками - підсилювач - мікроамперметр. Температура поблизу поверхні

тертя вимірюється за допомогою термопари й потенціометра; швидкість обертання вала - фотоелементом, що працює в комплекті із частотоміром. Системи виміру моменту тертя й температури перед випробуваннями таруються.

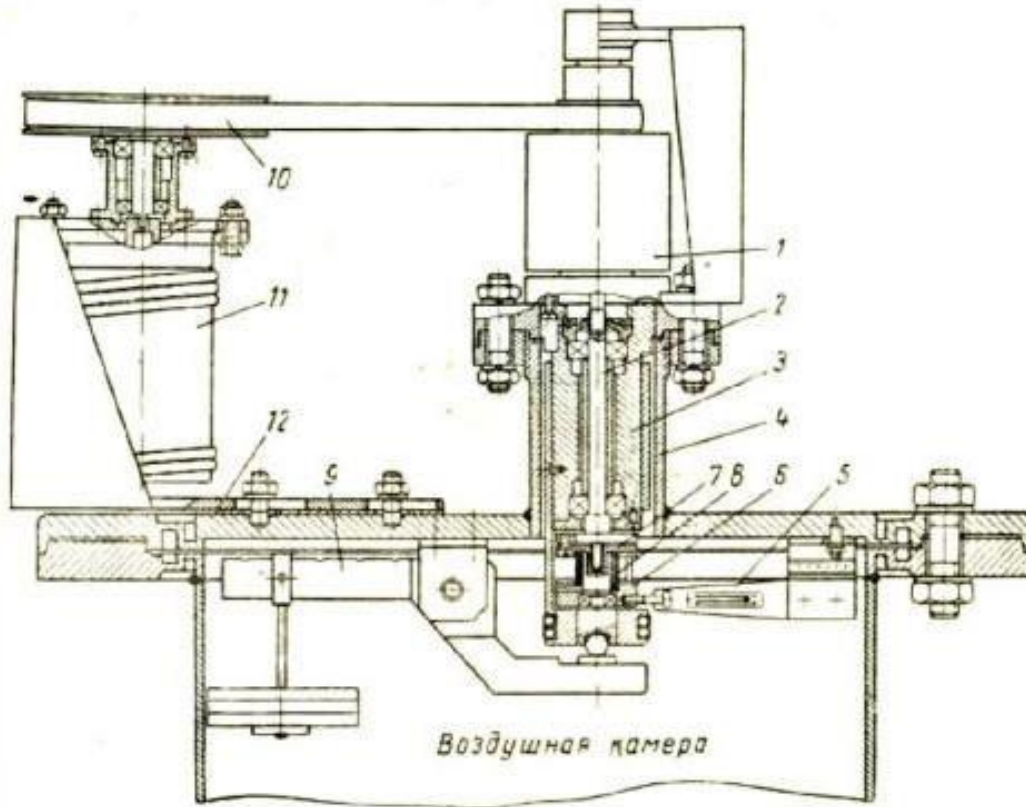


Рис. 4. Робочий вузол машини I47 B2

Машини тертя дозволяють проводити випробування матеріалів у діапазоні швидкостей від 200 до 10 000 об/хв при тиску від 0,1 до 0,5 МПа.

Тема 7. Методи та засоби досліджень тертя і зношування.

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 визначення величини зношування матеріалу й розподілу зношування по поверхні тертя застосовуються різні методи. Найпоширенішим є **метод визначення лінійного зношування**. Вимірюючи розміри елементів пари тертя до й після випробування й визначаючи різницю лінійних розмірів, судять про величину лінійного зношування. Для виміру лінійних розмірів користуються мікрометрами, контактними приладами з індуктивними або дротовими датчиками й безконтактними із пневматичними датчиками. При спільному вимірі зношування пари тертя досить зручним є зміцнення на одній із випробовуваних деталей голки профілографа, яка записує величину зносу в часі. Доцільно лінійне зношування виражати в безрозмірних одиницях. Зношування можна визначати по втраті у вазі, але вагарний спосіб визначення зношування є інтегральним, тому що фактично визначається сумарна втрата ваги по всій поверхні тертя. Вагове зношування невдало виражають у мг/км шляху. Краще виражати його в г/см³. Тоді досить полегшується перехід від лінійного зношування до вагового:

$$I_g = I_h \gamma$$

де γ - питома вага.

Для визначенні величини зношування найбільш широко застосовуються вимірювальні інструменти, мікрометри, мікрометричні нутроміри, індикаторні прилади. Погрішності виміру цих інструментів, якщо величина зношування невелика, бувають відносно великими, а часом і порівнянними з величиною зношування.

Метод штучних баз. В основі цього способу лежить проста ідея: визначити кількісну величину лінійного зношування по зміні розмірів поглиблення, що звужується, профіль якого відомий зробленого на зношувальній поверхні. Геометрична форма цього поглиблення повинна мати вісь, нормальну до поверхні тертя, уздовж якого слід відраховувати місцеве лінійне зношування. Такими поглибленнями можуть бути виділений відбиток у формі піраміди або конуса, висвердлене конічне поглиблення, вирізана, витерта або вишліфувана лунка тієї або іншої форми. Всі ці методи визначення зношування об'єднані під загальною назвою - метод штучних баз, що містить у собі метод відбитків, метод вирізаних лунок та ін. Метод відбитків полягає в тому, що штучна база створюється шляхом вдавнення алмазної піраміди, що служить для виміру твердості, або якого-небудь іншого індентора в поверхню, зношування якої треба замірити. Звичайно в якості індентора застосовується алмазна піраміда з квадратною основою й двограним кутом при вершині, рівним 136° .

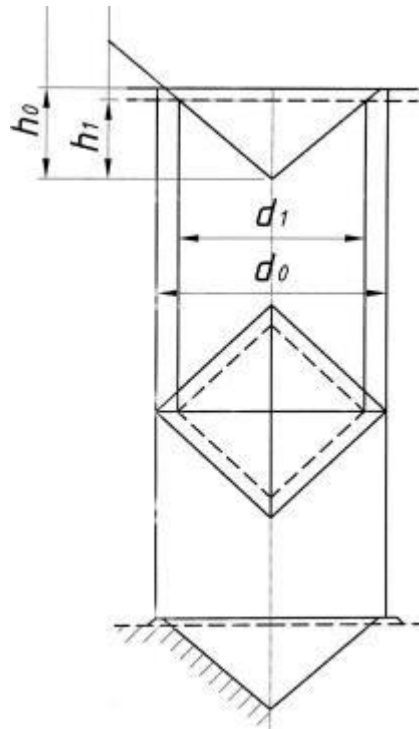


Рис.5. Метод штучних баз

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.

Метод накернених відбитків полягає в тому, що на поверхні, зношування якої слід визначити, ударом молотка або спеціального інструмента роблять відбиток за допомогою конічного керна ($\alpha = 120^\circ \dots 140^\circ$), що є індентором.

Неперпендикулярність осі керна до досліджуваної поверхні служить основним джерелом можливої неточності цього методу, особливо, якщо kern або ударний інструмент утримується від руки. Застосування напрямних втулок дозволяє уникнути цієї неточності. Алмаз у якості індентора тут не придатний через небезпеку руйнування його при ударі, можливості відколу його вістря в результаті неточності напрямку, а також труднощі додання алмазу правильної конічної форми. Як матеріал індентора рекомендується застосовувати загартовану сталь.

Метод вирізаних лунок знайшов широке застосування при дослідженні зношування різних пар тертя. Принципово він відрізняється від раніше описаних способів лише тим, що база на досліджувану поверхню наноситься за допомогою різця, що має форму тригранної піраміди. У методі вирізаних лунок особливо важливим є розташування вимірюваного параметра лунки щодо напрямку ковзання. При цьому слід керуватися правилом, викладеним у методі відбитків. Крім основних недоліків, які можуть бути віднесені до методу штучних баз (місцеве спучування й відхилення лунок і відбитків від справжньої форми), існує ще досить висока трудомісткість (тривалість випробування вимірюється сотнями й тисячами годин), а також необхідність створення механізмів для виміру величини зношування.

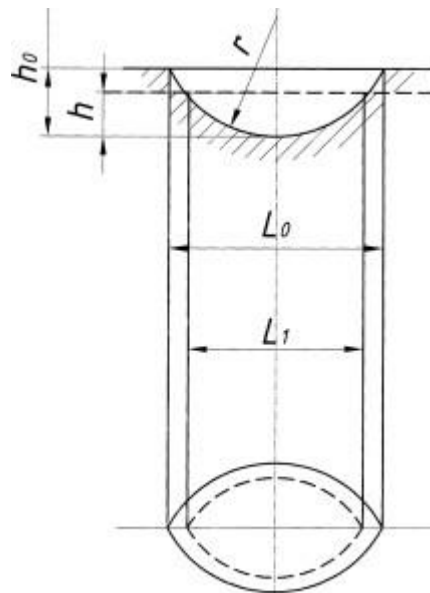


Рис. 6. Метод лунок

Метод радіоактивних індикаторів. Цей метод дозволяє вести безперервний контроль за зношуванням кута тертя в процесі його роботи, не роблячи розбирання досліджуваного вузла машини. Для вивчення зношування деталей при допомозі цього способу необхідно активізувати матеріал деталей,

т. е, тим або іншим шляхом увести в них певний радіоактивний елемент, що надалі буде служити індикатором величини зношування.

Визначення швидкості зношування методом радіоактивних ізотопів дозволяє вивчати процес зношування в динаміці. При цьому в досліджуваній матеріал деталі, зношування якої хочуть вивчити, вводиться радіоактивний ізотоп. У міру зношування разом з продуктами зносу попадає пропорційна їм кількість атомів радіоактивного ізотопу. По інтенсивності випромінювання цього ізотопу в пробі масла можна судити про кількість металу, що потрапив у масло за певний період часу.

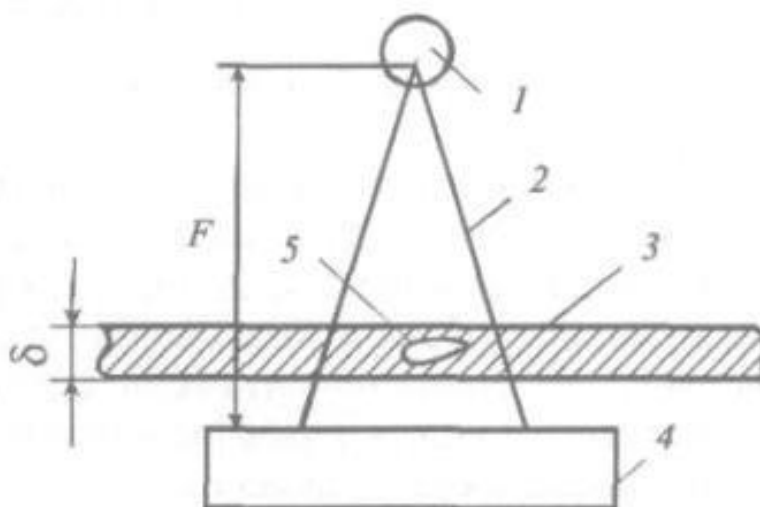


Рис.7. Схема радіаційного контролю: 1 – джерело випромінювання; 2 – прямий пучок променів; 3 – контрольований матеріал; 4 – касета з детектором і екраном; 5 – дефект; F – фокусна відстань; S – товщина матеріалу

Метод віброакустичної діагностики оцінюється з урахуванням його високої інформативності як перспективний для оцінювання стану третєвих 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.

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.

Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя

В установках, призначених для вивчення фрикційних властивостей матеріалів, використовують різноманітні методи визначення сили тертя, швидкості ковзання і температури. 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. 8). 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. 8).

При вимірюванні моменту тертя поряд із тензометричними системами застосовують гідродинамічні (манометричні). Манометричну схему вимірювання моменту тертя зображено на рис.9.

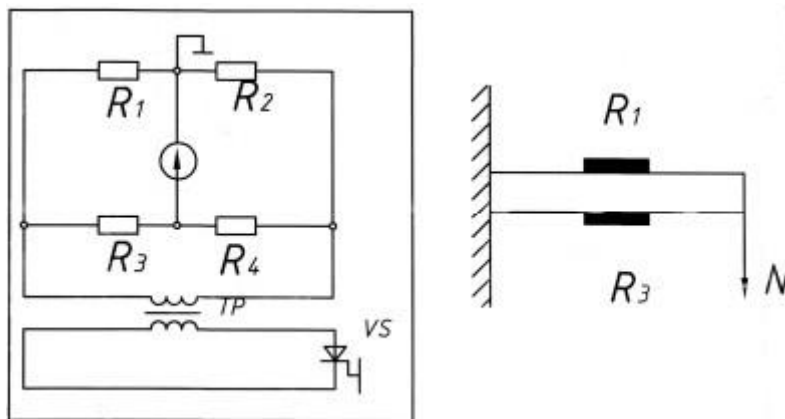


Рис.8. Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя

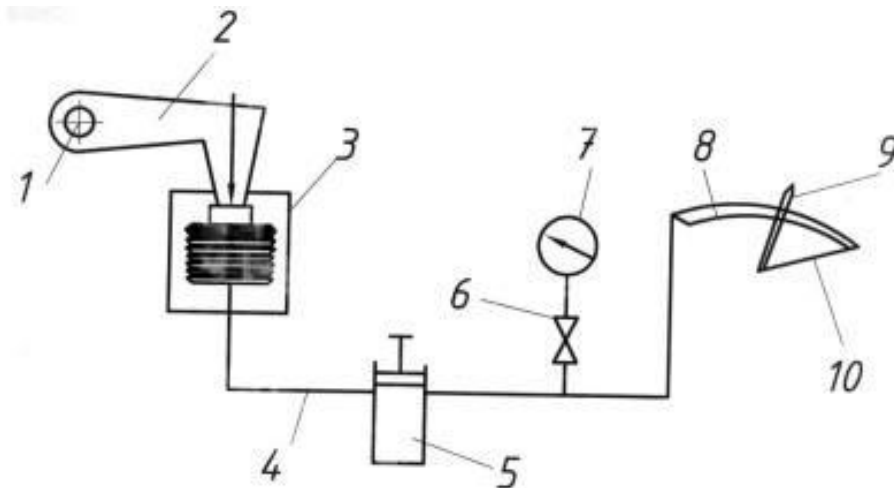


Рис. 9. Манометрична схема вимірювання моменту тертя: 1 – вал; 2 – важіль; 3 – мездоза; 4 – трубопровід; 5 – порошковий компенсатор; 6 – вентиль; 7 – манометр; 8 – трубка Бурдона; 9 – перо самописця; 10 – пружина

Тема 8. Вплив середовища на інтенсивність зношування.

Процес поверхневого руйнування речовини під впливом зовнішнього середовища називається ерозією. У машинобудуванні під ерозією розуміють руйнування поверхні матеріалу внаслідок механічного впливу високошвидкісного потоку рідини, газу або пари. До ерозії відноситься і руйнування металів під дією електричних зарядів (оксидерозія). Ерозійний вплив високошвидкісного потоку рідини, газу або пари містить у собі тертя суцільного потоку і його ударів об поверхню. У результаті відбувається розхитування і вимивання окремих обсягів матеріалів. Якщо потік містить абразивні частки, то зношування стає ерозійноабразивним. Корозійно-механічне зношування – зношування в результаті механічної взаємодії, що супроводжується хімічною та (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем. Окислювальне зношування – зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем або окислюючим оточуючим середовищем. На інтенсивність абразивного зношення значний вплив мають вологість та агресивність середовища.

Рідини і, зокрема, вода володіють великою руйнуючою силою. Вода здатна проникати в мілкі пори і при ударній дії чинити на тіло розклинюючу дію. На відміну від твердого тіла рідини володіють здатністю руйнувати окремі мікроділянки металу. До переліку важливих показників, які характеризують руйнуючу здатність рідин в умовах мікроударного навантаження, відносяться в'язкість і поверхневий натяг. При великих швидкостях деформації рідина веде себе як тверде тіло і за відповідних умов проявляє здатність до крихкого руйнування. Здатність рідини до розриву визначається об'ємною міцністю, яка залежить від поверхневого натягу, в'язкості, газонаповнення і т.д. Так, при наявності в абразиві вологи (водопровідної води) біля 1% інтенсивність зношування збільшується в 1,2...2,7 рази. Вчені Л.А. Юакши, І.Р. Клейс провели лабораторні дослідження на центробіжному прискорювачі з метою дослідити залежність зношування від вологості абразиву та агресивності середовища. Для дослідів застосували воду, а також слабкі розчини оцтової та щавлевої кислоти. Дослідження демонструють, що вода діє як окислювач і може привести до корозії. При дослідженні впливу кислотності середовища на процес наводнення сталі та її зносостійкості були взяті такі електроліти: 3%-ний розчин оцтової кислоти, 3%-ний розчин лугу (NaOH), рослинний сік, морська та прісна вода. Результати дослідів показують, що найбільш інтенсивно зношуються зразки, що змочуються 3%-ним розчином оцтової кислоти (рН=2,5). У випадку змочування рослинним соком, морською або прісною

водою ($\text{pH}=5,2\dots7$) зношування було в межах 150...200 мг. При застосуванні 3%-ного розчину NaOH ($\text{pH}=11,5$), тобто лужного середовища, зношення мінімальне (14...40 мг). При терті сталених зразків в кислотному середовищі (розчин оцтової кислоти) питомий вміст водню в поверхневих шарах збільшується в 4,2...4,8 разів. При терті в лужному середовищі велика зносостійкість обумовлена відсутністю збільшення питомого вмісту водню; це можна пояснити тим, що виділений при трибохімічних процесах водень вступає в реакцію з іонами OH з утворенням води.

Практично всі поверхні тертя сталевих і чавунних деталей містять підвищену кількість водню і, отже, піддаються водневому зношуванню при терті. Механізм водневого зношування полягає у наступному:

1. Тертя у результаті трибодеструкції матеріалів, що містять водень, створює умови для утворення дифузійно-здатного водню (атомарний стан) змастильного матеріалу, палива, парів води, з матеріалів пари тертя.
2. Далі відбувається адсорбція водню на поверхню деталі.
3. Відбувається дифузія водню в деформований шар сталі, швидкість якої залежить від температури і напруження.
4. Водень, що дифундує, концентрується на деякій глибині від поверхні тертя, там, де знаходиться максимум температури при терті.
5. Далі відбувається утворення молекул водню (H_2), питомий об'єм яких значно більше, ніж атомів водню, внаслідок чого поверхневі шари стають крихкими, що приводить до підвищеного зносу контактуючих поверхонь. Титанові сплави також піддаються водневому зношуванню при терті (водень утворює з титаном хімічне з'єднання, що володіє високою крихкістю). Основні методи зменшення і попередження водневого зношування: - введення в сталь Cr , Ti , V знижує проникнення в неї водню; - введення в мастильний матеріал присадочних сполук, що містять хлор (хлор з'єднується з воднем, який виділяється на поверхні), знижує дифузію в деталі, що труться. - зниження температури, швидкості ковзання і тисків, – все це також зменшує насичення деталей воднем.

Тема 9. Зношення спряжених машин та механізмів.

Класифікація спряжень

До конструкторських засобів підвищення зносостійкості можна віднести: оптимальний вибір кінематичної схеми спряження; масштабний фактор трібосистем, тобто оптимальне співвідношення площ тертя й об'ємів тертя; вибір сумісних матеріалів; розташування їх по твердості для рухомих і нерухомих деталей. Це далеко не повний перелік конструкторських засобів підвищення зносостійкості трібосистем машин на етапі їхнього проектування, однак найбільш ефективний. Можливі кінематичні схеми контакту трібосистем наведені на рис. 10.

Розподіл спряжень за такою класифікацією широко використовується в теорії машин, механізмів і деталей машин. Така класифікація важлива також для досліджень тріботехнічних характеристик, оскільки від схеми сполучення деталей залежить питомий тиск у місцях дотику матеріалів і частота їх контакту між собою при обертанні, яка визначається коефіцієнтом взаємного перекриття.

В основу вибору кінематичної схеми спряження переважно закладають тип переданого руху, тобто конструктивну схему усього виробу. І все-таки при проектуванні трібосистем необхідно прагнути до нижчих кінематичних трібосистем з односпрямованим переміщенням. В односпрямованому і знакозмінному рухах різко відрізняються характери руйнування поверхонь тертя. Так, зворотно-поступальний рух призводить до значного зносу (наприклад, у результаті фретинг-корозії при малих амплітудах переміщення або в результаті утомного зносу, при великих амплітудах переміщення). Порядок зростання зносу при знакозмінних рухах щодо односпрямованого не встановлений.

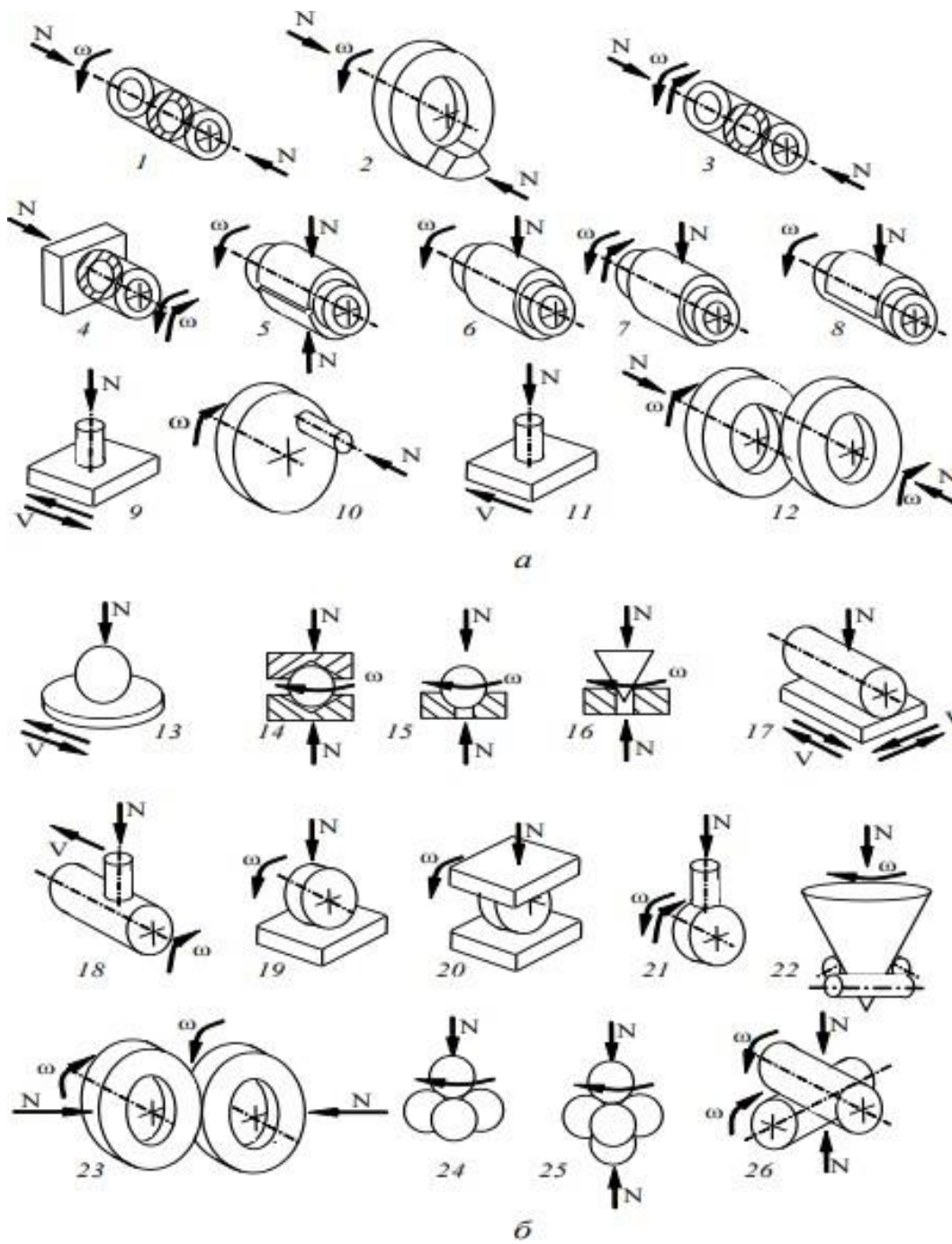


Рис.10. Кінематичні схеми трибосистем:
а – нижчі кінематичні пари; б – вищі кінематичні пари

В усіх трібосистемах потужність підводиться через рухомий елемент, з'єднаний із приводом, а перетворюється в роботу на нерухомому елементі. Якщо рухомий елемент трібосистеми буде мати високу твердість і велику робочу площу тертя, то це забезпечить гарні умови передачі через нього потужності або крутного моменту, а також можливість тривалого контакту робочої поверхні тертя із середовищем, що поліпшить умови роботи цього елемента. Отже, нерухомий елемент повинен мати меншу твердість і меншу робочу площу тертя, що забезпечить його швидке припрацювання до рухомого елемента. Трібосистема, яка відповідає названим умовам, називається прямою трібосистемою. Широко розповсюджений приклад такої трібосистеми – обертовий сталевий вал у спряженні з нерухомих антифрикційним вкладишем або підшипником (рис. 11).

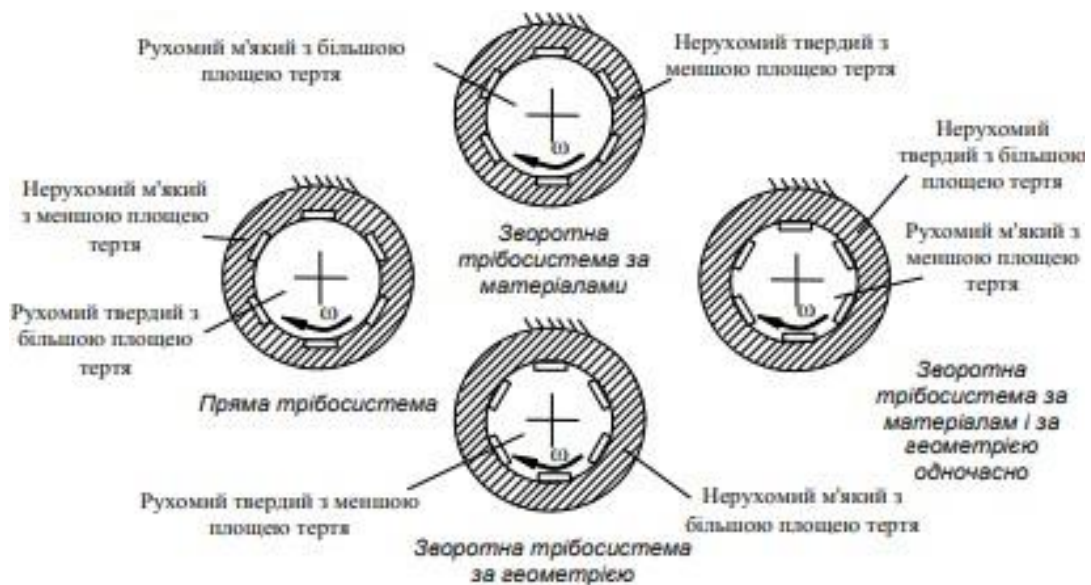


Рис. 11. Схеми прямих і зворотних трібосистем для спряження "вал – підшипник"

Шляхи зменшення зовнішнього тертя в конструкціях трібосистем

Ця група методів реалізується на стадії проектування трібосистем. Вона включає вибір матеріалів для виготовлення елементів трібосистем, оптимізацію геометрії і раціональне спряження матеріалів тіл, захист зони тертя від потрапляння хімічно активних речовин, абразивних часток і інших видів забруднень, компенсацію макрогеометричних відхилень деталей, заміну зовнішнього тертя внутрішнім, застосування систем подачі мастильних речовин і регулювання температури і інші методи.

Вибір матеріалів.

Застосування матеріалів для виготовлення елементів трібосистем є досить складним завданням, оскільки їх вибір повинен здійснюватися з урахуванням досить великої кількості факторів. До них відносять: рівень статичного і динамічного навантажень, швидкість відносного переміщення тертьових тіл, температура експлуатації, властивості мастильного матеріалу, вид тертя, конструкція трібосистеми. Матеріал повинен також задовольняти вимоги зносостійкості і коефіцієнта тертя, мати низьку вартість, добру припрацьовуваність і технологічність.

Найбільш важливою вимогою є раціональне спряження або урахування сумісності матеріалів тіл, що сполучаються. Іншими словами, повинна бути виключена можливість схоплювання поверхонь. Дотримуючись цієї умови, матеріали трібосистем необхідно підбирати так, щоб вони не утворювали при терті міцних адгезійних зв'язків, а руйнування цих зв'язків здійснювалося по границі розділу. Один з матеріалів повинен мати низький опір зрушенню, у контакті повинні мати місце переважно пружні деформації. Отже, нераціонально використовувати спряження однойменних матеріалів (мідь – мідь, бронза – бронза, мідь – бронза, титан – титан), а також трібосистеми, обидва елементи яких виконані з м'яких матеріалів (алюмінієвий сплав – мідь, мідний сплав – свинець тощо).

Спряження твердого матеріалу з м'яким забезпечує високу довговічність трібосистеми при низьких навантаженнях і температурі. У важконавантажених і низькошвидкісних трібосистемах ковзання і в опорах кочення доцільно спряження твердих матеріалів. У трібосистемах зі збідненим мащенням або при його відсутності добрий ефект є спряження твердих матеріалів з пористими, утримуючими мастильну рідину матеріалами і самомащувальними композитами.

Оптимізація макрогеометрії поверхонь тертя.

Цей метод спрямований на досягнення якомога більш рівномірного розподілу напруг у зоні контакту, зниження фрикційного нагрівання і поділу поверхонь тертя шаром мастильного матеріалу. Останнім часом розвиваються напрямки, в основу яких покладений такий принцип. При виробництві поверхні тертя повинна задаватися така форма, яку вона має у період сталого тертя. Слід зазначити, що цей принцип не позбавлений недоліків, оскільки в міру

зношування безупинно змінюються зазори, теплове навантаження, відбувається перерозподіл тисків і відповідно до цих факторів змінюється макрогеометрія третьових тіл. Тіла, що спряжуються, повинні мати форму, близьку до ідеальної. У протилежному випадку можлива локалізація напруг, утворення припиків і інтенсивний знос окремих ділянок контакту. Макрогеометричні відхилення тіл кочення сприяють виникненню вібрацій, росту динамічних навантажень і об'ємному утомному руйнуванню. Одним з методів підвищення зносостійкості є вибір оптимальної хвилястості. При великому кроці S і висоті хвилі H_x тиск на контурних площадках контакту може досягати межі плинності для незмазаних поверхонь можливе заїдання. При малих S і H_x , шорсткість не здатна виконувати роль кишень для мастильного матеріалу.

Розповсюдженим конструкційним прийомом підвищення зносостійкості є надання деталі такої форми, при якій у міру зносу одних ділянок поверхні тертя в контакт вступають сусідні, менш зношені. Такий прийом використовується в ущільненнях з еластичних матеріалів і підшипниках ковзання (розточення з восьми центрів), трібосистемах зі змінним навантаженням, а також у трібосистемах, що вимагають високої піддатливості одного з тіл. Як правило, конструкції, що реалізують цей прийом, виконують й іншу функцію. Вони компенсують знос тіл, що спряжуються, і макрогеометричні відхилення їхніх поверхонь тертя.

Компенсація макрогеометричних відхилень деталей.

Компенсація зносу, макрогеометричних відхилень поверхонь тертя і биття елементів трібосистем досягається з допомогою застосуванням еластичних прокладок. Так, між внутрішнім і зовнішнім шарами підшипника ковзання розташовують шар з еластичного матеріалу. При цьому робочий (антифрикційний) шар може бути виконаний у вигляді сегментів. Еластичні прокладки встановлюють також між корпусом і зовнішнім кільцем підшипника кочення. В ущільнених елементах завдання підвищення зносостійкості вирішується за рахунок використання еластичних матеріалів і надання поверхні тертя оптимальної форми. Наведемо розповсюджені прийоми компенсації зносу елементів трібосистем. Це використання змінних елементів конструкції (твердосплавні зуби гірничодобувних машин, струмознімачі електродвигунів); деталей, що плавають, (поршневі пальці, втулки, шайби); конструкцій з регульованим зазором (конструкції, що реалізують тертя вертіння).

Досягнення високої точності установалення деталей трібосистем.

Підвищення довговічності трібосистем неможливо без зменшення або виключення додаткових напруг, що виникають у тертьових тілах внаслідок невідповідності взаємного розташування поверхонь тертя і площини дії дотичних сил. Виникають додаткові напруги при низькій точності установалення рухомих зчленувань, наприклад, при неспіввісності веденого і ведучого валів, вала і підшипника, розташуванні площини ковзання напрямних під кутом до дотичного навантаження або поверхні, що спряжуються, тощо. Для вирішення цього завдання застосовують трьохточкове установалення на амортизаторах або балансірне підвішування джерела руху, розчленовування вала на опорні секції і їх з'єднання за допомогою компенсаційних муфт, пружні прокладки, що самовстановлюються, опори або осі. В опорних підшипниках самоустановалення досягається за рахунок виконання опорної поверхні вкладиша сферичних або застосування пружних опор.

Заміна зовнішнього тертя внутрішнім. При малих лінійних або кутових переміщеннях тертьових тіл застосовується принцип заміни зовнішнього тертя внутрішнім. Для реалізації цього принципу між двома тілами, що рухаються, відносно один одного розміщують еластичний елемент, жорстко закріплений з їх поверхнями. При переміщенні тіл еластичний елемент зазнає циклічних знакозмінних деформацій, амплітуда і асиметрія циклу з яких визначають його довговічність. Переваги таких конструкцій полягають в забезпеченні можливості їхнього застосування при впливі ударних навантажень і вібрацій в середовищах з абразивом. Вони не вимагають високої точності виготовлення і встановлення рухомих зчленувань, застосування мастильних речовин і пристроїв, що ущільнюють.

Раціональний вибір виду тертя. Не завжди перехід від ковзання до кочення тертьових тіл приводить до позитивного результату, хоча сила тертя в першому випадку на 1...2 порядки вище, ніж у другому. Застосування опор кочення найбільш виправдане у трібосистемах, що експлуатуються при малих і середніх навантаженнях і швидкостях, відсутності хімічно активних речовин, вібрацій і ударних навантажень. Крім того, їх застосування вимагає подачі мастильного матеріалу в зону тертя, високої точності виготовлення і монтажу

деталей рухомих зчленувань. Нераціональним їх застосування при реверсивному русі тіл з малими кутами повороту. У цьому випадку на доріжках кочення утворюються поглиблення, що нагадують відбитки кульки при оцінюванні твердості за Бринелем. Це явище (бринелювання) призводить до швидкого руйнування опор кочення. Застосування опор ковзання можливе в широкому інтервалі навантажень і швидкостей, у трібосистемах працюючих без мастильного матеріалу. Вони менш чутливі до вібрацій, ударних навантажень та впливів абразивів і хімічно активних середовищ. Ці переваги досягаються головним чином за рахунок того, що на відміну від опор кочення вони можуть бути виготовлені зі значно більш широкого класу матеріалів. До основних недоліків опор ковзання відносяться високі коефіцієнти тертя й інтенсивність зношування, знос поверхні, що спряжується, залежність тріботехнічних характеристик від температури.

Істотним недоліком опор кочення є великі габаритні розміри. Це призвело, наприклад, до розробки голчастих підшипників кочення. Усунення цього та ряду інших недоліків обох типів опор досягається розроблюваним в останні роки методом, сутність якого полягає у тому, що у мастильний матеріал для опор ковзання вводять дрібнодисперсні частки (розміром до 1 мкм) твердих матеріалів. Це ультраалмази, оксиди, бориди і карбід металів. Завдяки близькій до сферичної форми і високій твердості частки, потрапляючи в зону тертя, виконують роль тіл кочення. Це сприяє зниженню коефіцієнта тертя і інтенсивності зношування тіл, що спряжуються.

Зниження теплового навантаження контакту.

Тепловиділення на фрикційному контакті є причиною інтенсивного зношування тертьових тіл в наслідок зміни умов тертя, структури і властивостей поверхневих шарів. Наявність температурних градієнтів по дотичній і нормалі до поверхні тертя приводить до виникнення високих температурних напруг, зміни зазорів і рельєфу поверхні тертя. У результаті можливе схоплювання поверхонь, заїдання і заклинювання рухомого спряження. Заходи боротьби з цим явищем включають: розрахунок зазорів з урахуванням величини температурних деформацій елементів трібосистеми; вибір матеріалів із близьким значенням коефіцієнтів теплового розширення; застосування схем контактування з оптимальним коефіцієнтом взаємного перекриття поверхонь тертя; реалізацію засобів теплозахисту і тепловідведення.

Тема 10. Технологічні засоби підвищення зносостійкості.

Довговічність машин і механізмів багато в чому визначається зносостійкістю застосовуваних в їх конструкції деталей. Численні дослідження показують, що до 70-80% відмов машин відбувається через зношування вузлів тертя. У сучасному виробництві призначення і технологічне забезпечення параметрів стану поверхонь деталей недостатньо обґрунтовано, що призводить або до завищення вимог і дорожчання машин, або до їх заниження і зниження надійності. Існує досить велика кількість різних технологічних методів підвищення якості поверхонь деталей. Один з способів підвищення зносостійкості деталей - підбір матеріалів, з яких вони виготовляються. Однак, застосовуючи даний метод, можна лише знизити швидкість зношування, але не управляти самим процесом. Широке застосування мають термодифузійні методи: - цементация - насичення поверхні вуглецем, здійснювана при витримки деталі в печі-камері при температурі вище точки аустенітного перетворення 8-12 годин в середовищі карбюризатора. Зміст вуглецю в поверхні - максимум 1,7% для деталей, що працюють без удару. - термодифузійне хромування, в результаті якого вміст хрому в поверхні становить до 60%, але зменшується до 0% на глибині частки міліметра. При цьому твердість по Бринеллю до 900 одиниць, збільшується стійкість до азотної кислоти.

Серед способів підвищення зносостійкості без зміни розмірів можна відзначити, крім об'ємного гартування, поверхневе гартування струмами високої частоти (СВЧ), при якому нагрів деталі здійснюється за рахунок вихрових струмів при переміщенні уздовж неї мідного індуктора з підведенням до нього СВЧ. Процес може бути автоматизований, дозволяє отримати необхідну глибину загартованого шару, практично без деформації деталі та окалини. Дозволяє використовувати замість легованих сталей звичайні вуглецеві інструментальні сталі. Особливо сприятливе гартування СВЧ для зубчастих коліс: забезпечує тверду зносостійку поверхню і м'яко-в'язку серцевину. Збільшення довговічності деталей машин, що труться немислимо без застосування методів розрахунку на знос, в яких враховуються фізико-механічні характеристики матеріалів тертьових тіл, режими роботи вузла тертя (навантаження, швидкість), зовнішні умови тертя (навоколишнє середовище, температура, мастило) а також конструктивні особливості деталей.

Підвищення опору деталі руйнуванню при різних видах експлуатаційного навантаження може бути досягнуто технологічними методами об'ємного або поверхневого зміцнення.

Об'ємне зміцнення підвищує статичну міцність деталей, у яких робочі напруги розподілені по перетину більш-менш рівномірно. Для таких деталей використовують високоміцні сталі і сплави, композиційні матеріали. Однак більшість деталей працює в умовах, при яких експлуатаційне навантаження (тиск, нагрівання, дія навколишнього середовища і т. п.) сприймається головним чином їх поверхневим шаром. Тому зносостійкість, зародження і розвиток втомної тріщини, виникнення вогнищ корозії залежить від опору поверхневого шару руйнуванню. Для деталей, руйнування яких починається з поверхні, розроблено велику кількість методів поверхневого зміцнення, заснованих не нанесенню покриттів або зміни стану (модифікації) поверхні.

При нанесенні покриттів зміцнення деталей досягається шляхом осадження на її поверхню матеріалів, які за своїми властивостями відрізняються від основного металу, але найбільш повно відповідають умовам експлуатації (знос, корозія, хімічний вплив і т. п.). При зміні стану (модифікації) поверхневого шару відбувається фізикохімічне зношування в металі, що підвищує його опір руйнуванню. Модифікування поверхневого шару може здійснюватися деформаційним зміцненням (ППД), поверхневою термообробкою, дифузійним нанесенням легуючих елементів. У виробництві і техніці відомі та використовуються багаточисельні технологічні способи для підвищення зносостійкості деталей.

Основні технологічні заходи, що підвищують зносостійкість і довговічність машин, можна розділити на наступні 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 відмовам у різних умовах експлуатації.

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

Серед найбільш розповсюджених необхідно назвати наступні:

- хіміко-термічна обробка: цементація, азотування, хромування;

- ціанування, силіціювання, алітування, сульфоціанування і сульфідуювання та ін.;
- термічна обробка: поверхнєве гартування полум'ям, високочастотне гартування, поверхнєве гартування з нагрівом в електроліті, лазерне зміцнення;
- хімічна обробка: глибоке анодування, оксидування, фосфатування;
- поверхнєве пластичне деформування: обкатка кульками і твердосплавними роликками, шротоструменева обробка, алмазне виглажування, 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 придання 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; -наплавка: електродугова, електрошлакова, вібродугова; - електроіскрове зміцнення тощо. Технологічні способи зниження інтенсивності зношування спрямовані на досягнення оптимальної топографії поверхні тертя, забезпечення низького опору зсуву на межі розділу тіл, що труться і поліпшенню структури поверхневого шару зношеного тіла.

Нанесення захисних покриттів. Найбільш перспективним методом підвищення зносостійкості є нанесення захисних покриттів на поверхню тертя деталей. Для цього використовують матеріали, що мають високу адгезійну здатність до деталі, низький опір зсуву і здатність витримувати без руйнування багаторазові деформації.

Хіміко-термічна обробка поверхні. Цей метод дозволяє змінювати структуру та властивості поверхневого шару металів шляхом насичення його атомами легуючих елементів у процесі теплової обробки в хімічно активному середовищі.

Як термообробка застосовується поверхнєве загартування: - полум'яна - нагрівання поверхні деталі газовими пальниками (газове середовище - суміш кисню з ацетиленом) або за допомогою плазмотрона (пристрій, що генерує плазму)

Тема 11. Методи забезпечення зносостійкості та покращення властивостей конструкційних матеріалів триботехнічного призначення.

Механотермічне формування зносостійких покриттів.

Метод механотермічного формування полягає в тому, що захисний шар кристалізується з розплаву металу в стиснутих умовах під навантаженням. При цьому в ньому відсутні порожнини і наскрізні пори, основний метал практично не плавиться і не потрапляє в наплавлений шар, що надійно з'єднується з основою. Використовують дві технологічних схеми: фрикційне і електроконтактне формування. Перша технологічна схема містить у собі притиснення з певним зусиллям до поверхні деталі сухарів з матеріалу майбутнього покриття. Можливий і інший варіант, коли за допомогою пуансона притискається брикет із гранул або стружки. Поверхня, що потім покривається, із заданою швидкістю приводиться в циклічний рух. Матеріал, який наноситься, треться об поверхню деталі і на межі виділяється теплота. У певний момент часу температура контакту досягає точки плавлення. Плавлення, а отже формування зносостійкого шару, відбувається під тиском від 5 до 100 МПа при швидкості ковзання 1...8 м/с. При цьому час формування шару складає 5...70 с. Цим способом створюється покриття товщиною від 0,5 до 10 мм. На сталеву основу наносяться шари з мідних, алюмінієвих та інших сплавів. Метод має ряд обмежень. Він застосовується лише для деталей циліндричної форми, які приводяться в обертання. Температура плавлення матеріалу покриття повинна бути менше, ніж матеріалу основи. Цей метод успішно застосовується для створення мідного покриття на поверхнях гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання, що стимулює виникнення режиму виборчого переносу. При електроконтактному формуванні тепло виділяється в результаті проходження електричного струму через гранульований матеріал, що має великим опором, який притискається з заданим тиском до поверхні деталі. Тут форма поверхні деталі може бути будь-якою. Температурні обмеження теж відсутні. Таким методом на сталь наноситься широкий спектр матеріалів: леговані сталі, тверді сплави, зносостійкі композиції. У такий же спосіб здійснюється електроконтактне наплавлення, засноване на принципі контактної зварювання. Матеріал який наплавляється (звичайно у вигляді стрічки), притискається до поверхні деталі електродом. Між електродом і деталлю прикладається різниця потенціалів від 2 до 12 В. Як джерело струму можна використовувати зварювальний трансформатор. Якщо наплавляють довгомірні деталі, то електрод роблять у вигляді ролика, який котиться по деталі здійснює приварку захисного покриття.

Наплавлення зносостійких шарів

Наплавлення – це один з найбільш розповсюджених способів відновлення зношених деталей. Існує велика кількість методів наплавлення, що відрізняються джерелами теплової енергії, способами захисту наплавленого металу, рівнем автоматизації. У процесі наплавлення розплавлений метал, взаємодіючи з навколишнім середовищем (газами, шлаками та ін.), зазнає тих чи інших змін, пов'язаних з випаром деяких його складових при високих температурах, утворенням різних хімічних сполук, нерозчинних у металі. Ці зміни характерні як для основного металу, що перебуває у зварювальній ванні, так і для додаткового металу. Як відомо, останній при різних способах відновлення (наприклад, дугове наплавлення електродом, що плавиться, електрошлакове наплавлення) нагрівається до більш високих температур, ніж температура у ванні, і має більшу контактуючу із середовищем питому поверхню (відношення поверхні до обсягу). Тому всі процеси взаємодії з навколишнім середовищем, що відбуваються через поверхню, й інтенсифіковані більш високою температурою, призводять до більшої зміни складу додаткового металу, ніж розплавленого основного. Цей змінений у процесі зварювання додатковий метал називається наплавленим металом. Для більшості металів при газовому або дуговому зварюванні звичайних металів на залізній й іншій основах спостерігається збільшення в рідкому металі концентрації водню. Розчинений водень у міру зниження температури прагне виділитися з розчину й вийти назовні. Він концентрується в охолодженому основному металі в окремих порожнинах усередині нього, а в металопокритті дифундує у бік поверхні наплавленого металу і пришовних зон. Накопичуючись у різних нещільностях (вакансіях, дислокаціях, макропорожнечках), водень приводить до підвищення крихкості, виникненню додаткових внутрішніх напружень і пор, і появі мікротріщин у відновлюваному виробі. Тому на практиці досить важливим є максимальне видалення з металу наплавлення водню, кисню й азоту. Зменшити наводнення металу в процесі його наплавлення можна шляхом застосування попереднього нагрівання деталі, а також наступною нормалізацією, а вміст кисню й азоту за рахунок надійного захисту зварювальної ванни й зони горіння дуги. Це досягається застосуванням відповідного складу зварювальних матеріалів, газового середовища (захисних газів, вакууму), шлаків і шлакових розплавів (флюси), активно взаємодіючих з навколишнім матеріальним середовищем. Одним з найбільш ефективних засобів поліпшення механічних характеристик металопокриттів є оптимальний підбір хімічного складу металу шва. Використання (при конкретному способі відновлення) правильно підібраних зварювальних матеріалів (припадочного або

електродного дроту), а також введення у зварювальну вану легуючих добавок (через флюс, електродні покриття й ін.) і наступна обробка забезпечує відносно вирівнювання металопокриття із властивостями основного металу. При цьому виріб стає міцнішим. Крім того, для забезпечення спрямованого формування властивостей металопокриттів необхідний вибір раціонального способу та режимів відновлення. При цьому варто враховувати, що важливу роль серед наплавочних матеріалів мають сплави заліза, нікелю і кобальту зі значними кількостями хрому. Останній збільшує жароміцність, корозійну стійкість, твердість й ін. Найбільше поширення отримало електродугове наплавлення, здійснюване ручним і напівавтоматизованим способами. При механізованому наплавленні замість окремих електродів застосовується згорнутий в бухту дріт або електродна стрічка. Якщо наплавлений метал містить достатню кількість вуглецю ($>0,4\%$), то зміною швидкості його охолодження можна одержати різні гартівні структури (троостит, мартенсит) і, отже, різну твердість. Твердість наплавленого металу залежить від його структури. Присутність у структурі різного роду карбідів, нітридів й інших хімічних сполук сприяє значному збільшенню твердості й зносостійкості наплавленого металу.

Переваги плазмового методу наплавлення деталей: - плазмове наплавлення внаслідок малого проплавлення поверхні виробу дозволяє одержати заданий склад металу у першому шарі, завдяки чому у два - три рази (у порівнянні з дуговим наплавленням під шаром флюсу) знижуються витрати наплавочних матеріалів і значно скорочуються трудові витрати; - завдяки локальному тепловому впливу на основний метал при плазмовому наплавленні залишкові напруги розтягання в наплавленому шарі значно менші, ніж при електродуговому наплавленні, це підвищує стійкість наплавленого металу проти розтріскування при різких теплозмінах; - плазмове наплавлення характеризується гарним формуванням наплавленого валика, що дозволяє призначати малі припуски на механічну обробку; - висока температура плазмового потоку дозволяє розплавляти й наносити будь-які матеріали, навіть найтугоплавкі; - потік плазми дає можливість одержувати сплави різні за властивостями або наносити багат шарові покриття з різних сплавів. Це відкриває можливість одержувати наплавлений метал з будь-якими заданими властивостями; - можливості цього способу не обмежені формою і розмірами оброблюваного виробу; - плазмова дуга найбільш гнучке джерело нагрівання, що дозволяє в широкому діапазоні регулювати його енергетичні та теплові характеристики; - завдяки високій кінетичній енергії часток у плазмовому струмені можливо одержання більш щільного й однорідного покриття, ніж при інших способах наплавлення; - забезпечується можливість рівномірного

нанесення покриттів на деталі складної форми і практично будь-якої товщини; - застосування безкисневих газів (аргон, азот, водень, гелій) та їхніх сумішей зменшує здатність до окислення відновленого шару.

Напилювання покриттів з порошкових матеріалів.

Метод напилювання є одним з найбільш ефективних способів створення зносостійких шарів. Якщо у високотемпературний струмінь газу подати частки порошку або краплі розплаву, то при зіткненні з поверхнею вони деформуються і міцно прикріплюються до деталі. Існує два різновиди такої технології: газополуменевого напилювання і електричне напилювання.

Головною перевагою методу напилювання є його універсальність та незалежність від природи матеріалу деталі. Можна наносити покриття не тільки на метали, але і на кераміку, дерево, бетон, полімери, тканини, папір. Це пов'язано з тим, що напилювання не здійснює помітного теплового впливу на основу. Те саме можна сказати і про матеріали, що напилюються. Напиляють кольорові метали і сплави, сталі, тверді сплави і кераміку, пластмаси, що декорують суміші. Не мають також особливого значення форма і розміри деталей.

Іонно-плазменні методи.

Іонно-плазменні методи досить ефективні. У зв'язку з тим, що їх застосування вимагає високого розрідження, вони здійснюються у вакуумних камерах, тому є досить дорогими і застосовуються лише для досить відповідальних деталей, які працюють при високих температурах в умовах адгезійного і окиснювального зношування. В умовах вакууму метал, який наноситься, перетворюється на газ, пар, іонізований пар і плазму, а потім в атмосфері реакційного або інертного газу осідає на поверхні деталі. Покриття може бути отримане способами термічного випаровування, катодного або іоно-плазмового розпилення або за допомогою бомбардування поверхні потоком з часток речовини, що осаджується. Як реакційний газ застосовуються азот або вуглеводень, у результаті формується покриття нітриду або карбіду.

Плакування

Метод створення товстошарових покриттів (плакування) застосовується при виготовленні деталей або при відновленні їхньої форми після зношування. При цьому товщина шару може складати кілька міліметрів. Плакування також використовується при виготовленні елементів ковзних електричних контактів для економії дорогих матеріалів з високою електропровідністю (н.п. срібла).

Механічне зміцнення поверхонь

Метод механічного зміцнення поверхонь приваблює своєю простотою і дешевизною. Тут використовується явище значного росту межі плинності, а отже, і твердості матеріалу, при високому ступені пластичної деформації – деформаційне зміцнення. Метод реалізується шляхом обкатування поверхонь роликками або кульками, вигладжування сферичними алмазними наконечниками, обробки струменем із дрібних сталевих або скляних кульок. Основними особливостями та недоліками засобів чистової обробки різанням є:

- загострена форма виступів та впадин мікронерівностей; - відносно низька несуча здатність, обумовлена загостреною формою мікронерівностей та відповідно малою опорною поверхнею при початкових зближеннях в процесі приробки; - пряма залежність між кроком та висотою мікронерівностей і, як наслідок, мала маслоємність поверхонь; - неможливість регулювання форми мікронерівностей при одній тій же самій висоті; - висока ступінь неоднорідності мікрорельєфу; - шаржирування оброблюваної поверхні осколками абразивного інструменту; - припалювання внаслідок абразивної обробки. Ці недоліки більшості способів чистової та зміцнюючої обробки різанням і тиском ускладнюють рішення таких задач, як:

а) отримання та оптимізація мікрорельєфу робочих поверхонь деталей за рахунок нормування та технологічного забезпечення геометричних параметрів якості поверхні;

б) застосування розрахункових методів нормування та технологічного забезпечення геометричних характеристик якості поверхні.

Одним із рішень задач з усунення вище перерахованих недоліків є прогресивний спосіб зміцнення – вібронакатування (вібровигладжування).

Вібронакатування – чистова (фінішна) обробка, яка забезпечує утворення оптимального для різних умов експлуатації мікрорельєфу поверхні, збільшує стомлюючу міцність, контактну жорсткість та зносостійкість. Вона супроводжується наклепом, збільшенням мікротвердості оброблюваного металу, підвищенням класу шорсткості поверхні, зменшенням або повністю виключенням приробки спряження.

При вібронакатуванні утворюється мікрорельєф, в якому радіус мікровиступів та мікровпадин у сотні, тисячі раз більше, ніж при традиційних способах механічної обробки. Цей мікрорельєф відрізняється більшою опорною поверхнею при достатній її маслоємності та високим ступенем однорідності. Канавки, утворені вібронакатуванням, служать масляними кишнями. Продукти зносу та абразивний пил осідає на дно канавок та разом з маслом під тиском виноситься за межі зони тертя спряжених деталей. При цьому в зоні тертя зменшується температура, коефіцієнт і момент тертя, різко підвищується зносостійкість спряжених поверхонь. Існує ще й технологічний спосіб деформаційної формозміни поверхонь деталей вузлів, що зміцнює. Спосіб

відкриває великі можливості для підвищення зносостійкості, навантажувальної здатності, контактної твердості та інших важливих в експлуатації характеристик трибосистем. Зміцнююча деформаційна формозміна поверхонь деталей здійснюється накатним інструментом у вигляді роликів 2, на периферії яких розташована замкнута система клиноподібних інденторів, наприклад гексагональної структури (рис. 12). Можливі варіанти холодного накочування і накочування при нагріванні. Розроблено гаму інструментів, що реалізують цей спосіб, визначена сфера його застосування, оптимізовані технологічні режими обробки, виготовлені допоміжні пристрої і устаткування для обробки типових деталей циліндричної, сферичної і плоскої форми.

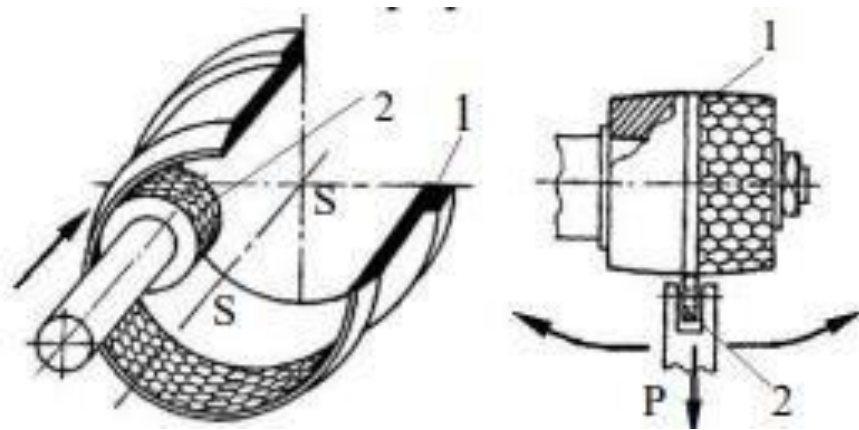


Рис. 12. Схема процесу деформаційної формозміни поверхонь

Основними об'єктами застосування деформаційної формозміни поверхонь є технології обробки втулок і вкладишів підшипників ковзання, прямолінійних напрямних, номінально нерухомих сполучень з чорних (сталь, чавун) і кольорових металів (латунь, бронза, титанові сплави), коли формозмінна поверхня не піддається подальшій механічній обробці і є робочою; обробки контактуючих поверхонь підшипників ковзання або нерухомих сполучень з чорних і кольорових металів та сплавів під металеві і твердомастильні покриття; обробки контактуючих поверхонь під металізацію при відновленні, під час ремонту або при одержанні біметалічних трибосистем; обробки поверхонь деталей трибосистем з наступним їхнім обдуванням мікрокульками; обробки поверхонь деталей трибосистем з наступним хіміко-термічним зміцненням тощо.

Тема 12. Практичне використання триботехніки в технології виробництва в машинобудівних галузях.

Області застосування.

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 найбільшрозповсюдженою в техніці і виробництві.

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

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.

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;
- б) захист деталей машин від водневого зношування.

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.

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 (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 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 глобoidних 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.

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.

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.

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

Етапи розвитку триботехніки, 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 розвиненої країни. В більшості університетів і технічних вузів світу нині створені і функціонують кафедри трибології. В усіх розвинених країнах створені організації трибологів.

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", Військовоповітряних 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".

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антифрикційні матеріали / Н. О. Макаренко // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] /Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-42922>
2. Корбут. - К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту "НАУ-друк", 2009. - 391 с. : рис., табл. - (Сучасний університетський підручник). - Бібліогр.: с. 385. - 500 прим. - ISBN 978-966-598-609-6
3. Zaselskiy, I., Sokur, M., Biletskyi, V., Fyk, M., Fyk, O. The study of the lining layer abrasing wear in the semiautogenous grinding mill/E3S Web of Conferences, 2020, 166, 03008 <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85084958406&origin=inward&txGid=8e5ff62c9555178b9d32a8697a968393>
4. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький [та ін.]. - Львів : Простір-М, 2018. - 335 с.
5. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А. та ін. / За ред.. Войтов В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342 с.
6. Основи тертя і зношування в машинах / О.В. Закалов, І.О. Закалов – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.
7. Триботехніка: посібник до лабораторно-практичних робіт / Д.П. Журавель, О.Ю. Новік, А.М. Бондар, К.Г. Петренко. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 138 с.
8. Студент М. М., Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів/ М. М. Студент, С. І. Маркович, В. М. Гвоздецький [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2022. – № 1, - С. 90-97
9. Д.П. Журавель, О.Ю. Новик, А.М. Бондар, К.Г. Петренко «Триботехніка». Курс лекцій / . Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 280 с.
10. Popolov, D., Shved, S., Zaselskiy, I., Pelykh, I., Studying of movement kinematics of dynamically active sieve/Mechanics and Mechanical Engineering, 2019, 23(1), p. 94–97. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85069804653&partnerID=MN8TOARS>
11. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice. / 8th Edition. – Springer-Verlag GmbH, Deutschland, 2017. – 666 p. – ISBN 3662542080.
12. Камель Г.І. Дослідження конічних трибосполучень у промисловому транспорті: монографія / Г.І. Камель, В.В. Перемицько, А.В. Ершов, Р.А. Куліковський. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 313 с.