

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Будник А.Ф., Юскаєв В.Б.

**ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА
ТРИБОДИЗАЙНУ МАТЕРІАЛІВ**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів

Суми
Вид-во СумДУ
2008

ББК 34.412075
Б-90
УДК 620.179.112

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1.4/18-Г-83 від 14.01.2008 р.)*

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. Є.П.Калінушкін
(Національна металургійна академія, м. Дніпропетровськ);
д-р техн. наук, проф. В.Б.Тарельник
(Національний аграрний університет, м. Суми);
д-р техн. наук, проф. О.Б.Гірін
(ВДНЗ «Український хіміко-технологічний
університет, м. Дніпропетровськ)

Будник А.Ф., Юскаєв В.Б.

Б-90 Фізика та механіка трибодизайну матеріалів: Навчальний посібник. –Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 203 с.

ISBN 978-966-657-191-8

Посібник містить відомості про фізичні та механічні явища, які відбуваються під час тертя та зношування матеріалів деталей вузлів машин, обладнання та приладів.

Викладено фізичну суть явищ тертя і зношування та наведено основні фактори, що впливають на інтенсифікацію процесу.

Розглянуто питання формування і руйнування поверхневих шарів матеріалу, основи трибодизайну матеріалів та технологічні засоби підвищення зносостійкості й експлуатаційних властивостей матеріалів деталей вузлів тертя.

Для студентів-матеріалознавців III-IV рівнів акредитації під час вивчення дисципліни «Фізика та механіка тертя і зношування» та виконання курсових, комплексних і дипломних проектів та самостійних робіт студентами з дисциплін навчального плану спеціальності 8.090101 «Прикладне матеріалознавство».

Посібник може бути корисним викладачам та аспірантам під час виконання навчальних і науково-дослідних робіт.

ББК 34.412075

© А.Ф.Будник, В.Б.Юскаєв, 2008

ISBN 978-966-657-191-8

© Вид-во СумДУ, 2008

ЗМІСТ

С.

Зміст та структура курсу «Фізика і механіка тертя та зношування» і його роль в освіті матеріалознавця.....	5
Передмова.....	7
1 Основні уявлення про контакт і тертя дотичних поверхонь.....	14
1.1 Аналіз контакту й оцінка площі стикання.....	15
1.2 Тертя ковзання.....	17
2 Будова, фізико-хімічні властивості та особливості стану поверхневого шару матеріалу тертьових деталей.....	22
2.1 Будова, структура і дефекти матеріалів пар тертя.....	22
2.2 Фізичні властивості поверхневих шарів.....	31
2.3 Вплив механічної обробки на службові властивості поверхневого шару.....	38
2.4 Коротка характеристика деяких питань теорії будови, природи властивостей і стану матеріалу поверхневих шарів.....	41
3 Зношування тертьових матеріалів.....	47
3.1 Основні характеристики і види зношування.....	47
3.2 Кінетична інтерпретація зношування.....	54
3.3 Термодинамічна інтерпретація зношування.....	58
4 Конструкційні матеріали вузлів тертя.....	62
4.1 Металеві антифрикційні матеріали.....	64
4.2 Антифрикційні матеріали з порошків і пластмас.....	66
4.3 Фрикційні матеріали.....	70
4.4 Полімерні матеріали.....	71
5 Технологічні методи забезпечення високої зносостійкості матеріалів вузлів тертя.....	78
5.1 Вибір технологічного процесу.....	79
5.2 Формування оптимальної топографії поверхні.....	80
5.3 Обробка деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД).....	81
5.4 Нанесення захисного покриття.....	83
5.5 Опромінювання потоками енергії високої густини.....	84
5.6 Хіміко-термічна обробка (ХТО).....	84
5.7 Поверхнєве гартування.....	86
5.8 Електрохімічні покриття.....	90

5.9 Хімічна обробка.....	91
5.10 Механотермічне формування зносостійких покриттів.....	95
5.11 Наплавлення зносостійких шарів.....	96
5.12 Напилення покриттів з порошкових матеріалів.....	97
5.13 Іонно-плазмові методи.....	100
5.14 Плакування.....	102
5.15 Механічне зміцнення поверхонь.....	102
5.16 Експлуатаційні методи.....	103
5.17 Правила сполучення матеріалів.....	107
5.18 Розміщення матеріалів за твердістю у парах тертя.....	110
5.19 Заміна у вузлах машин тертя ковзання на тертя кочення.....	111
6 Властивості мастильних матеріалів.....	112
6.1 Класифікація та експлуатаційні властивості мастильних матеріалів.....	112
6.2 Компоненти змащувальних масел.....	114
6.3 Основні характеристики твердих змащувальних матеріалів.....	124
6.4 Мастила.....	132
7 Види мащення в трибомеханічних системах.....	135
7.1 Діаграма Герсі-Штрибека.....	135
7.2 Тертя без змащувального матеріалу.....	137
7.3 Гідродинамічний режим мащення.....	138
7.4 Реологічні властивості мастильних середовищ.....	141
7.5 Еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення.....	145
7.6 Змішаний і граничний режим мащення.....	149
8 Тестовий контроль засвоєння лекційного матеріалу.....	157
9 Лабораторний практикум з предмета та методичні вказівки і завдання до виконання самостійних робіт з курсу.....	163
9.1 Завдання до виконання самостійних робіт з курсу.....	197
Список використаної і рекомендованої літератури.....	201

ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА КУРСУ «ФІЗИКА І МЕХАНІКА ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ» І ЙОГО РОЛЬ В ОСВІТІ МАТЕРІАЛОЗНАВЦЯ

Курс «Фізика і механіка тертя та зношування» викладається після засвоєння студентами фундаментальних дисциплін (математики, фізики, загальної та фізичної хімії тощо) та ряду спеціальних дисциплін (матеріалознавства, технології виробництва і обробки матеріалів, теорії тепломасопереносення в матеріалах, термічної обробки матеріалів та ін.).

При цьому одночасно з вивченням фізично-хімічних закономірностей теплотехнічних процесів тертя та зношування у курсі «Фізика і механіка тертя та зношування» студенти вивчатимуть методи оптимізації цих процесів, створення бажаного контакту матеріалів вузлів тертя, модифікації поверхні матеріалу для забезпечення мінімально можливого зносу пари тертя.

Таким чином, під час вивчення курсу студент уперше ознайомиться зі змістом та способами досягнення (створення) матеріалів з необхідними триботехнічними властивостями в цілому. Це служить підґрунтям для вивчення і засвоєння низки таких дисциплін, які передбачаються загальним навчальним планом і охоплюють певні характерні питання трибоматеріалознавства та триботехніки (термічна обробка, фізичні властивості і методи дослідження матеріалів, механічні властивості та конструкційна міцність і ряду інших).

Матеріал курсу дозволяє майбутнім спеціалістам вільно орієнтуватися у проблемах сучасного трибоматеріалознавства та правильно оцінити перспективне використання сучасних матеріалів у вузлах тертя машин, приладів та апаратів для забезпечення мінімальних витрат на тертя, недопущення задирів і заїдання поверхонь тертя без змашувального матеріалу, підвищення терміну служби спряжених мате-

ріалів деталей і, у кінцевому результаті, підвищення економічних показників та зниження витрат.

Лекційний матеріал курсу представляє досягнення в галузях триботехнічного матеріалознавства й інженерного застосування теорії тертя та зношування при розрахунку, конструюванні і випробувальні матеріалів вузлів тертя.

На основі викладеного можна стверджувати, що курс «Фізика і механіка тертя та зношування» відіграє важливу роль у матеріалознавчій освіті.

Поряд із лекційним курсом навчальною програмою передбачено виконання лабораторних робіт, які можуть бути оформлені для захисту відповідно до розділу 16 цього навчального посібника.

Навчальний план підготовки фахівця з вищою освітою за напрямом 090101 з дисципліни “Фізика і механіка тертя та зношування” передбачає значний обсяг навчального часу для самостійної роботи студентів. Він використовується для підготовки та засвоєння лекційного матеріалу, підготовки до захисту лабораторних робіт та виконання індивідуальних завдань. Завдання на виконання індивідуальних завдань з курсу наведено в розділі 9.1 цього посібника.

Опанування студентами зазначеними розрахунками допоможе їм під час виконання курсового та дипломного проектування.

ПЕРЕДМОВА

Першим практичним застосуванням доісторичною людиною властивостей тертя стало використання тепла, що виділяється під час тертя, для добування вогню. Другим практичним завданням було подолання тертя при транспортуванні матеріалів. Людина використовувала сани для транспортування ще 9000 років тому. При вирішенні складних транспортних завдань під час зведення пірамід єгиптяни використовували рідку оливу, замінюючи зовнішнє тертя твердих тіл внутрішнім тертям рідини. Одним із найбільших винаходів людини стало колесо. Воно дало змогу істотно знизити роботу, потрібну для подолання тертя, тому що тертя ковзання було замінено тертям кочення. За результатами археологічних досліджень відомо, що переваги кочення порівняно з ковзанням були визнані більше 5000 років тому в Месопотамії. Шляхом удосконалення конструкції підшипників ковзання і застосування змащувальних матеріалів удалося зменшити тертя ковзання. Перший перелік змащувальних матеріалів був складений Плінієм - старшим (23 - 73 р. нашої ери). Застосовувалися рослинні олії, мазі зі смоли дерев, тваринні жири. Мінеральні масла почали застосовувати в XIX ст., а з 1930 року набули поширення синтетичні масла.

Разом із практичними вирішеннями щодо зменшення тертя з'явилися перші наукові роботи. Леонардо да Вінчі (1452 -1519 рр.) уперше вказав на пропорційність опору тертя навантаженню на контактні поверхні. За результатами своїх експериментів він установив, що сила тертя дорівнює чверті навантаження і є сталою для всіх матеріалів. Г.Амонтон у 1699 р. і Ш.Кулон у 1781 р. запропонували правила, які описують тертя твердих тіл на основі тривалих експериментів. Кулон розробив спеціальний прилад для вимірювання сили тертя - трибометр. Згідно з експериментальними результатами Амонтона і Кулона сила тертя пропорційна нормальному

навантаженню. Експериментально було доведено, що коефіцієнт тертя не залежить від геометричної площі контакту. Для пояснення цих результатів була висунута гіпотеза шорсткості, згідно з якою поверхні покриті нерівностями і тертя виникає на взаємопроникаючих нерівностях контактуючих поверхонь. Кулон також урахував можливість адгезійних процесів під час тертя, на що вказував Т. Дезагюльє, який зафіксував сильну адгезію між свинцевими сферами, притиснутими одна до одної, і висунув гіпотезу про вплив на тертя сил молекулярної взаємодії. У другій половині ХХ ст. Б. Тауер випадково відкрив явище динамічного тиску при відносному русі шарів змащувальних матеріалів. На основі експериментів Тауера О. Рейнольдсом була розроблена гідродинамічна теорія мащення (1886 р.), а в 1883 р., незалежно від Рейнольдса, основи гідродинамічної теорії мащення були розроблені М.П. Петровим.

Створення експериментальних основ теорії граничного тертя і розроблення концепції структури граничного шару належать У. Гарді (1936 р.). У 30-ті роки ХХ ст. У. Гарді, Ф. Боуден і Д. Тейбор створили адгезійну теорію тертя. У цій теорії передбачалося, що сила тертя необхідна для подолання сил молекулярного зчеплення, які діють між контактуючими поверхнями. У 60-ті роки вони запропонували й експериментально підтвердили адгезійно-деформаційну теорію тертя.

Припущення про подвійну природу тертя і розроблення молекулярно-механічної теорії тертя належать І.В. Крагельському (1939 р.).

Початком систематичних досліджень природи зношування твердих тіл під час тертя можна вважати 30-ті роки ХХ ст. Так, Е. Зібель у 1938 р. виділив такі типи зносу залежно від природи зовнішніх умов:

- знос сухих поверхонь під час тертя ковзання;
- знос змащених поверхонь під час тертя ковзання;

- знос сухих поверхонь під час тертя кочення;
- знос змащених поверхонь під час тертя кочення;
- знос при вібраційному контакті;
- знос рухомими твердими частинками (ерозія);
- знос рухомою рідиною (кавітація).

Вивченню природи зношування і встановленню основних механізмів зношування присвячені роботи М.Є.Жуковського, Е.А.Чудакова, В.Д.Кузнецова, П.А.Ребіндера, Б.В.Дерягіна, В.А.Білого, Б.І.Костецького, І.В.Крагельського, А.К.Зайцева, М.М.Хрущова та багатьох інших. За кордоном відомими вченими в цій галузі є Ф.Боуден, Д.Тейбор, С.Баходур, К.Лудема, Н.П.Су, Д.Баклі, Р.Куртель, Н.Краузе, Г.Утц, Н.Чіхос, Г.Фляйшер, Г.Польцер, М.Хебда, Г.Данов та ін.

Дотепер тертя в багатьох його аспектах залишається загадкою. Під час тертя (і тільки під час тертя) одночасно відбуваються механічні, електричні, теплові, вібраційні й хімічні процеси. Тертя може зміцнити або знеміцнити метал, підвищити або зменшити в ньому вміст вуглецю, наситити метал воднем або обезводнити його, перетворити золото й платину в окисли, відполірувати деталі або зварити їх. Тертя є процесом, що самоорганізується, при якому з певною послідовністю й досить «розумно» проходять явища, спрямовані на руйнування поверхні або ж (навіпаки) - на створення цілої серії систем, що знижують зношування й тертя.

Сьогодні з тертям пов'язана одна із найбільш гострих проблем сучасності - зношування машин і механізмів. Витрати на відновлення машин величезні, причому щорічно вони збільшуються. Навіть незначне подовження терміну служби машин й устаткування відповідає введенню значних нових виробничих потужностей. Так, згідно з аналізом численних експериментальних досліджень тертя поглинає близько чверті всієї енергії, яка використовується людиною.

Розвиток техніки, й зокрема машинобудування, додав проблемі підвищення довговічності машин величезну значущість з погляду економії матеріальних ресурсів і робочої сили й залучив до цієї проблеми широке коло конструкторів, технологів, експлуатаційників, а також учених різних спеціальностей. Це дозволило не тільки розробити конструктивні й технологічні заходи щодо підвищення терміну служби машин і створити раціональні методи догляду за ними, але й на базі досягнень фізики, хімії та дизайну матеріалів закласти основи вчення про тертя, зношування й змашування машин. Цією проблемою широко займаються в об'єднаннях, фірмах, у вищих навчальних закладах і науково-дослідних інститутах, їй присвячують наради й конференції, що проводяться систематично, із цих питань видають монографії й публікують численні журнальні статті та патенти.

На відміну від високого рівня постановки розрахунків деталей і конструкцій на міцність, твердість і стійкість сучасний стан теорії тертя й зношування не дає конструкторові надійних методів розрахунку сполучених пар на зношування й більшості деталей, що зношуються, на довговічність, на термін служби, що наперед передбачений. Навіть гідродинамічна теорія змащення, розвиток якої почався понад 90 років тому, не дозволяє виконати розрахунок підшипника з рідинним змащенням з тією самою надійністю результатів, як розрахунок балки методами опору матеріалів. Однак теорія й інженерна практика підвищення зносостійкості та надійності роботи матеріалів тертьових деталей мають у своєму розпорядженні значну кількість важливих якісних залежностей, результатів експериментальних досліджень і спостережень, використання яких дозволяє істотно підвищити терміни служби машин.

Основні терміни й поняття предмета

Триботехніка – наука про контактну взаємодію твердих тіл при їхньому відносному русі, що охоплює весь комплекс питань тертя, зношування й змазування машин. Останніми роками в триботехніці набули розвитку нові розділи - трибохімія, трибофізика й трибомеханіка.

Трибохімія – вивчає взаємодію контактуючих поверхонь із хімічно активним середовищем. Вона досліджує проблеми корозії під час тертя, хімічні основи вибіркового перенесення й вплив на поверхню деталей хімічно активних речовин, що виділяються під час тертя внаслідок деструкції полімерів або мастильного матеріалу.

Трибофізика – вивчає фізичні аспекти взаємодії контактуючих поверхонь при їхньому взаємному переміщенні.

Трибомеханіка – вивчає механіку взаємодії контактуючих поверхонь під час тертя. Вона розглядає закони розсіювання енергії, імпульсу, а також механічну подібність, релаксаційні коливання під час тертя, реверсивне тертя, рівняння гідродинаміки та ін. стосовно до завдань тертя, зношування й змашування матеріалів тертя.

У деяких країнах замість терміна триботехніка вживають терміни трибологія й трибоніка. *Трибологія* – це наука про тертя, зношення, вид мащення і взаємодію контактуючих поверхонь при їх взаємному переміщенні. Назва цієї наукової дисципліни утворена з грецьких слів "трибос" – тертя і "логос" – наука. Трибологія як наукова дисципліна охоплює експериментально-теоретичні дослідження фізичних, механічних, електричних, магнітних, теплових, хімічних, біологічних та інших явищ, пов'язаних із тертям. У технічній літературі трапляється термін *динамічне металознавство* – це розділ металознавства, що вивчає структуру й властивості поверхневих шарів металів і сплавів у процесі тертя.

Ряд термінів, що належать до триботехніки, стандартизований. ГОСТ 23.002 містить 98 термінів, які класифіковані за видами тертя, зношування, змащення, методами змазування й мастильними матеріалами.

До загальних понять триботехніки відносять такі терміни:

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

Зношування – процес руйнування й відділення матеріалу з поверхні твердого тіла й (або) нагромадження його залишкової деформації під час тертя, що проявляється в поступовій зміні розмірів й (або) форми тіла.

Знос – результат зношування, обумовлений у встановлених одиницях. Знос може виражатися в одиницях довжини, об'єму, маси й ін.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, оцінюване величиною, зворотною швидкості зношування або інтенсивності зношування.

Мастильний матеріал – матеріал, що вводиться на поверхні тертя для зменшення сили тертя й (або) інтенсивності зношування. *Змащення* – дія мастильного матеріалу, у результаті якого між двома поверхнями зменшуються сила тертя й (або) інтенсивність зношування.

Змазування — підведення мастильного матеріалу до поверхні тертя.

Тертя спокою — тертя двох тіл при мікропереміщеннях до переходу до відносного руху.

Тертя руху — тертя двох тіл, що перебувають у відносному русі.

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

Тертя з мастильним матеріалом – тертя двох тіл за наявності на поверхні тертя уведеного мастильного матеріалу будь-якого виду.

Тертя ковзання – тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл у точках торкання різні за величиною й напрямком, або за величиною або напрямком.

Тертя кочення – тертя руху двох твердих тіл, при якому їх швидкості в точках торкання однакові по величині й напрямку.

Сила тертя – сила опору при відносному переміщенні одного тіла по поверхні іншого під дією зовнішньої сили, спрямованої по дотичній до загальної межі між цими тілами.

Найбільша сила тертя спокою – сила тертя спокою, будь-яке перевищення якої веде до виникнення руху.

Попередній зсув – відносне мікропереміщення двох твердих тіл під час тертя в межах переходу від стану спокою до відносного руху.

Швидкість ковзання – різниця швидкостей тіл у точках торкання під час ковзання.

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

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

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

Видано словник-довідник із тертя, зношування й змащення деталей машин, що містить більше 1200 термінів.

1 ОСНОВНІ УЯВЛЕННЯ ПРО КОНТАКТ І ТЕРТЯ ДОТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

У сучасній механіці під тертям розуміють широке коло явищ, що спричиняються взаємодією дотичних поверхонь твердих тіл при відносному переміщенні, а також внутрішнім рухом у твердих, рідких і газоподібних середовищах при їх деформації.

Перш за все одержало вивчення зовнішнє тертя як сила опору відносному руху дотичних тіл при зрушенні з місця, ковзанні, коченні, вертінні, при змазуванні в гідродинамічному режимі, утворенні на поверхнях тонких шарів у декілька молекул (граничне змащування) або за відсутності змащування (сухе тертя).

Внутрішнє тертя у твердих, рідких і газоподібних середовищах детально вивчено в аеро- і гідродинаміці і пов'язане з незворотним розсіюванням механічної енергії, тобто її перетворенням у внутрішню енергію.

У техніці тертя є ініціатором деформаційних, динамічних, теплових, акустичних, електричних, адгезійних та інших процесів, що визначають ресурс працездатності вузлів тертя машин, їх енергетику й ефективність.

Первинною проблемою під час вивчення тертя є контакт дотичних поверхонь. У поняття контакту входить взаємодія поверхонь, що належать твердим тілам, під дією відносного зсуву і стискаючих сил з урахуванням їх відхилення від ідеальної форми і впливу середовища (гази і змащувальні матеріали), наявного в зоні контакту.

Відхиленнями від ідеальної форми, які вважаються макроскопічними, є неплоскостність, викривлення, хвилястість і т.п. Вони, як правило, мають масштаб, вимірюваний у діапазоні 10^{-3} - 10^{-4} м. Макроскопічні нерівності несуть на собі мікронерівності, вимірювані на рівні 10^{-5} - 10^{-6} м. У свою

чергу, мікронерівності мають субшорсткість порядку молекулярних розмірів.

В основу уявлень про фрикційну взаємодію шорстких поверхонь покладене поняття про площу зіткнення тіл, що труться.

1.1 Аналіз контакту та оцінка площі стикання

При випадковому розміщенні шорсткостей на поверхнях контактуючих тіл контактне зближення цих тіл під дією зовнішнього навантаження лімітує фактична площа зіткнення, визначувана геометрією контактуючих поверхонь.

На рис. 1.1 показані основні характеристики геометрії шорстких поверхонь: шорсткість із максимальною висотою профілю R_{\max} , хвилястість із максимальною висотою хвилі $R_{w\max}$ і макровідхилення від горизонтальної базової площини з розміром δ .

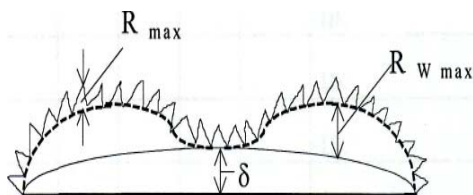


Рисунок 1.1 - Основні характеристики геометрії шорстких поверхонь

Для оцінки шорсткості використовуються: оптичні, щупові, електронно-мікроскопічні та інші методи. Промислового вживання набув щуповий метод. Використовуючи стандартні характеристики, вирішують задачу оцінки фактичної площі контакту шорстких поверхонь (ФПК). На рисунку 1.2 показана структурна схема площі контакту.

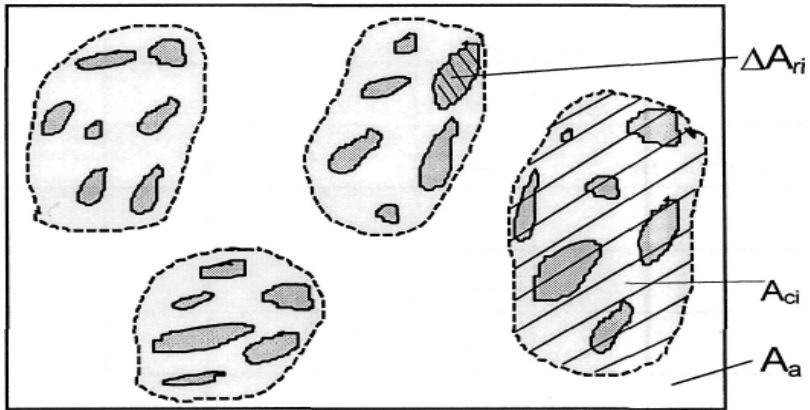


Рисунок 1.2 - Структурні компоненти реального контакту шорстких поверхонь: A_a – номінальна площа контакту; A_{ci} – контурна площа; ΔA_{ri} – фактична площа одиначної плями контакту

Площинки фактичного контакту ΔA_{ri} згруповані на площах дотику хвиль, сукупність яких складає контурну площу контакту ΔA_{ci} (КПК). Загальна площа дотику тіл (уявна), в межах якої містяться ФПК і КПК, називають номінальною площею контакту A_a (НПК). Сумарна площа фактичного контакту $A_r = \sum_1^n \Delta A_{ri}$. З метою розрахунку ФПК шорсткість поверхні, як правило, моделюють набором сферичних сегментів, вершини яких розкидані по висоті так, щоб зберегти закон розподілу матеріалу в шорсткому шарі, який задається за допомогою одержаної з досвіду опорної кривої.

Для статистичного аналізу і представлення характеристик шорстких поверхонь використовують закон розподілу матеріалу по глибині шорсткого шару на вибраній базовій довжині L , який характеризує опорна крива (див. рис. 1.3 б). Цю криву одержують як залежність від-

носної суми перетинів мікровиступів $t_p = \frac{1}{L} \sum_1^m \Delta L_I$

від відносного зближення $\varepsilon^* = \frac{a}{R_{\max}}$. Стандартом передбачено 14 класів шорсткості.

Відзначимо, що для прироблених поверхонь вузлів тертя характерний пружний контакт. Пластичний контакт може частково виявитися при перших навантаженнях, коли стискаються найвищі виступи. Подальші навантаження відбуваються вже в умовах, наближених до пружного контакту. Пластичний контакт має місце також при обробці матеріалів різанням, куванням, штампуванням, пресуванням, накаткою та ін.

1.2 Тертя ковзання

Під тертям розуміють опір, що виникає при переміщенні одного тіла стосовно іншого, притиснутого до першого. При цьому розрізняють тертя спокою, ковзання і кочення (рис. 1.3).

Силою тертя спокою ($F_{\text{сп}}$) називають зсувне зусилля, що прикладається до контактуючих тіл і що не викликає їх взаємного ковзання (див. рис. 1.3 а). При цьому взаємне переміщення ($L_{\text{сп}}$) досягається за рахунок деформації матеріалу виступів шорсткості в зоні контакту і називається попереднім зсувом. Воно носить в основному пружний характер і зникає при знятті зсовуючого зусилля. Проте у міру зростання зсовуючого зусилля попередній зсув набуває пластичного характеру і стає частково незворотним. На рисунку показана гранична величина попереднього зсуву ($L_{\text{нз}}$) і відповідно граничне значення сили тертя спокою, яке називають статичною силою тертя. При подальшому збільшенні переміщення починається ковзання.

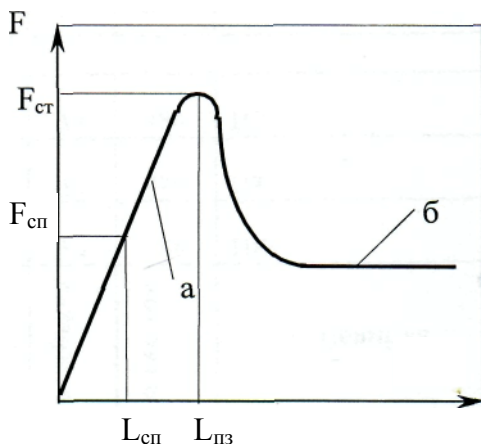


Рисунок 1.3 - Характерні випадки формування сил тертя:
 а – сила тертя спокою; б – сила тертя ковзання

Силу тертя можна представити у вигляді добутку питомої сили тертя (τ) і фактичної площі контакту (A_f)

$$P = \tau A_f.$$

Під коефіцієнтом тертя розуміють відношення сили тертя до діючого на контакт нормального зусилля

$$\mu = F/N.$$

Тут також розрізняють коефіцієнти тертя спокою (статичний) і ковзання (кінетичний).

Залежно від характеру змащувального прошарку розрізняють 4 види тертя: сухе, граничне, гідродинамічне (рідинне) і змішане (одночасно є елементи сухого, граничного і гідродинамічного тертя). В першому випадку контактують незмащені поверхні, покриті окисними плівками і якнайтоншими шарами молекул газів та води, адсорбованими з навколишнього середовища. В другому випадку, крім перелічених плівок, наявні молекули змащувальних

матеріалів у вигляді тонкого шару товщиною в декілька молекул, які міцно зв'язані з поверхнею. У третьому випадку шар рідкого мастила повністю розділяє контактні поверхні.

Сухе і граничне тертя схожі за своєю природою і мають спільні закономірності. Причиною є та обставина, що при граничному терті мономолекулярні шари мастила міцно пов'язані з твердою поверхнею, володіють твердоподібними властивостями і ніби служать продовженням твердої фази. Тому, як і при сухому терті, фактично має місце контакт двох твердих поверхонь. Відмінність виявляється в різних значеннях коефіцієнта тертя. Якщо при сухому терті він, як правило, більше 0,2, то при граничному його величина знаходиться в інтервалі 0,05-0,2.

Механізм виникнення тертя пояснює молекулярно-механічна теорія тертя, в розроблення якої внесли великий вклад російські вчені (Б.В.Дерягин, І.В.Крагельський та ін.) і зарубіжні (Боуден, Тейбор, Томлінсон та ін.). Відповідно до цієї теорії тертя має подвійну молекулярно-механічну природу. Силу тертя можна представити як суму молекулярної (адгезійної) і механічної (деформаційної) складових

$$F = F_A + F_D. \quad (1.1)$$

Молекулярна складова обумовлена опором розриву молекулярних або міжатомних зв'язків, які виникають між контактуючими тілами. Механізм цього процесу аналогічний руйнуванню кристалічних ґраток при зсуві. Розсіяння роботи тертя в теплоту пов'язане з пружною деформацією кристалічних ґраток. Робота зовнішньої сили переходить у потенційну енергію ґраток. Після розриву зв'язку потенційна енергія переходить в енергію коливальних атомів - у внутрішню.

Механічна складова викликана опором пружному і пластичному відтисненню виступів контактуючих тіл, що заглиблюються під час руху в контрповерхні (рис. 1.4).

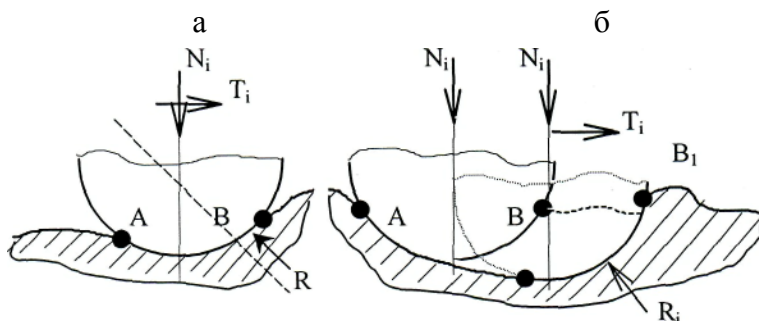


Рисунок 1.4 – Пружне (а) і пластичне (б) відтиснення матеріалу під час ковзання

На рис. 1.4 а показано ковзання жорсткого сферичного виступу за в'язко-пружним напівпростором. Матеріал після проходження виступу через запізнювання деформації стосовно до навантаження не встигає відновлювати форму. Тому виступи перед індентором і після несиметричні, а реакція опору, прикладена в центрі контактної поверхні, не збігається за напрямком з нормальним зусиллям. Це явище характеризується гістерезисом деформації. Тому слід, який залишився під час руху виступу, не встигає відновлюватися повністю, чого варто чекати для ідеального пружного середовища.

На рис. 1.4 (б) показана поведінка шорсткого виступу під час ковзання по пластичному середовищу. На початку, поки ковзання відсутнє, під дією нормального зусилля виступ заглиблюється. Контактна крива АВ симетрична. Під час ковзання задня межа виступу відривається від лунки. Все навантаження концентрується на передній межі, а дуга контакту займає положення A_1B_1 . Попереду виникає

вал матеріалу, що відтісняється. Реакція опори не збігається за напрямком з нормальним зусиллям.

Оскільки молекулярна і механічна взаємодія здійснюється на ФПК, то сила тертя, виражена формулою (1.2), записується у вигляді

$$\tau = F/A_T = \tau_A + \tau_\Delta, \quad (1.2)$$

де τ_A , τ_Δ - адгезійна і деформаційна складові питомого зусилля.

Численні спроби вивести розрахункове співвідношення для адгезійної складової (τ_A) не увінчалися успіхом через неможливість урахувати вплив плівок вторинних структур, що покривають поверхні. В той же час для ювенільних металевих поверхонь встановлено, що при їх контакті ґратки матеріалів обох поверхонь зрощуються (холодне зварювання) і питома сила тертя близька до опору зсуву ґраток. Останні дослідження показали, що на фізичних площинах контакту, обумовлених змінанням субмікронерівностей, опір зсуву контактуючих кристалів наближається до теоретичної міцності. Проте для реальних поверхонь, покритих плівками, адгезійна складова значно нижча. Роботи Б.В.Дерягіна, І.В.Крагельського, Н.М.Міхіна та ін. показали, що залежність адгезійної складової питомої сили тертя від фактичного тиску ($\sigma_T = N/A_T$) виражається у вигляді двочленного закону

$$\tau_A = \tau_0 + \beta \sigma_T, \quad (1.3)$$

де τ_0 і β - молекулярні константи тертя, визначувані експериментально.

2 БУДОВА, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ОСОБЛИВОСТІ СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МАТЕРІАЛУ ТЕРТЬОВИХ ДЕТАЛЕЙ

Явища, що мають місце під час тертя і зношування, багато в чому визначаються властивостями матеріалів, з яких виготовлені деталі машин, а також станом їх поверхневих шарів. Для їх розуміння необхідно володіти мінімальною сукупністю знань з термодинаміки, фізики твердого тіла і фізичного матеріалознавства.

Вважається, що під час тертя навантажені ділянки поверхонь одержують енергетичну дію до 100 еВ/атом·с, тобто на рівні руйнування атомних зв'язків. Проте в реальній дійсності частка латентної (запасеної) енергії, що призводить до руйнування, знижується на 4-5 порядків. Це зниження руйнівної енергії, її розсіяння обумовлені дисипативними властивостями поверхневих структур. Виходячи з термінології фізичного матеріалознавства, у трибології їх прийнято називати дисипативними структурами. Сучасні підходи до розуміння явищ, що відбуваються, пов'язують ці процеси із самоорганізацією дисипативних структур, що вивчаються синергетикою і термодинамікою нерівноважних процесів.

2.1 Будова, структура і дефекти матеріалів пар тертя

Конструкційні матеріали, що застосовуються у вузлах тертя, діляться на кристалічні та аморфні. З фізичної точки зору твердими тілами вважаються тільки кристали. Їх атоми розміщуються у вузлах регулярної просторової структури - кристалічної ґратки, структурною одиницею яких є елементарний осередок. Приклади ряду структурних схем кристалів наведені на рис. 3.1.

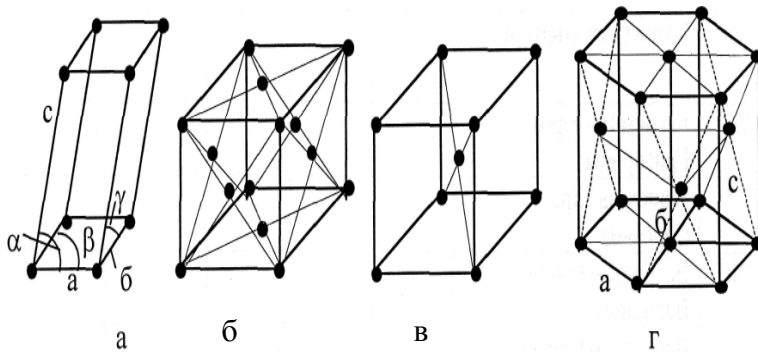


Рисунок 3.1 - Схеми елементарних осередків

У загальному випадку елементарний осередок має вигляд косокутного паралелепіпеда (рис. 3.1 а), що характеризується значеннями сторін a , b , c і кутів α , β , γ . За співвідношенням сторін і кутів виділяють 7 кристалічних систем. Найпоширенішими є ґратки кубічні (рис.3.1 б,в) і гексагональні (рис.3.1 г). Якщо в центрах граней куба розміщуються додаткові атоми, то ґратки називаються гранецентрованими (ГЦК), якщо атом упроваджується в центр куба - ґратки об'ємноцентровані (ОЦК). Гексагональна щільноупакована ґратка має осередок з основою у вигляді правильного шестикутника. Кубічні ґратки типу ГЦК і ОЦК характерні для сталей. Між атомами в ґратках можливі зв'язки 3-х типів: іонний, ковалентний, металевий. У першому випадку у вузлах знаходяться позитивні й негативні іони, в другому - нейтральні атоми, валентні електрони яких утворюють пари, що рухаються в полі сусідніх ядер. Зв'язок має квантово-механічну природу. Металевий зв'язок виникає між атомами металів. Валентні електрони в цьому випадку узагальнюються, полишають свої атоми й утворюють хаотичний тепловий рух у

загальному полі атомних залишків, що знаходяться у вузлах ґраток (вільні електрони).

Між молекулами в молекулярних ґратках діють *сили Ван-дер-Ваальса*, енергія яких приблизно на 2 порядки нижче, ніж у атомних зв'язків. Особливим видом молекулярної взаємодії є *водневий зв'язок*. Слабоекрановане одним електроном ядро атома водню, що бере участь в ковалентному зв'язку, може притягуватися до дуже електронегативних атомів (кисень, фтор) і утворювати з ними зв'язок. Водневий зв'язок міцніший за інші міжмолекулярні. Він характерний для взаємодії молекул вуглеводнів, зокрема полімерів, з киснем оксидів металів, є найважливішою формою зв'язку між молекулами води в рідкому стані й у вигляді льоду. У таблиці 2.1 представлені величини енергії перелічених видів зв'язків і подані характерні властивості кристалів.

Потенційна енергія взаємодії між парою ізольованих атомів E виражається формулою

$$E = A/r^m - B/r^n, \quad (2.1)$$

де A , B , m , n - коефіцієнти. Перший член рівняння характеризує енергію сил відштовхування, другий - сил притягання. Оскільки сила взаємодії виражається у вигляді

$$F = -dE_n/dr, \quad (2.2)$$

то

$$F = \frac{mA}{r^{m+1}} - \frac{bn}{r^{n+1}}. \quad (2.3)$$

Таблиця 2.1 - Енергія зв'язку і деякі властивості кристалів

Тип зв'язку	Приклади кристалів	Енергія зв'язку, кДж/моль	Деякі властивості кристалів
Іонний	NaCl, LiF, MgO	≈ 1000	Мала електропровідність при низьких і хороша іонна провідність при високих температурах. Висока міцність, твердість і температура плавлення, крихке руйнування
Ковалентний	C (алмаз), Si, Ge, TiN, WC, SiC	≈ 700	Висока твердість, низька електропровідність при малих температурах, крихкість. Деякі матеріали є напівпровідниками
Металевий	Fe, Cu, Al, Ag, Na	≈ 400	Висока електропровідність і пластичність
Молекулярний	Молекули в полімерах	≈ 10	Низька температура плавлення, сильна стисливість, пластичність
Водневий	Ar, CH ₄ , H ₂ O, HF	≈ 50	Схильність до утворення розгалужених багатомолекулярних структур

На рис. 2.2 (а) показані функції $E_n(r)$, $F(r)$. Мається на увазі, що один атом розміщений на початку відрізка, другий можна переміщати уздовж осі r . При цьому r_0 - положення стійкої рівноваги, в якій знаходяться атоми при $T = 0$ К. Якщо речовина нагріта, то другий атом коливатиметься щодо першого, і чим вище температура, тим більше розмах коливань. Якщо ж кінетична енергія перевищить висоту потенційного бар'єра на ΔE_n , то даний атом може відірватися від першого і відбудеться дисоціація. Пунктиром показаний графік залежності сили від відстані між атомами. При $r = r_0$ сила взаємодії дорівнює нулю. Ліва крута гілка характеризує сили відштовхування, а права полого - сили тяжіння. Часто r_0 беруть за умовний діаметр атома, хоча істинна середня відстань між центрами атомів, як впливає зі сказаного, збіль-

шується зі зростанням температури через асиметрію потенційної кривої, що і є причиною теплового розширення.

Коли атоми об'єднуються в кристал, то потенційні криві накладаються й у атомів (рис. 2.2 б), що розмітилися в ланцюжок, результуюча крива має періодичний характер. Періодичний характер має і залежність сили від координати, графік якої зображений тонкою лінією. Виходячи з цього, напруга, що викликає зсув однієї частини кристала щодо іншої уздовж площини паралельної осі X, так само, як і сила, перешкоджаюча зсуву атома А у положення А₁, може бути представлено у вигляді

$$\tau = K \sin \frac{2\pi x}{b} . \quad (2.4)$$

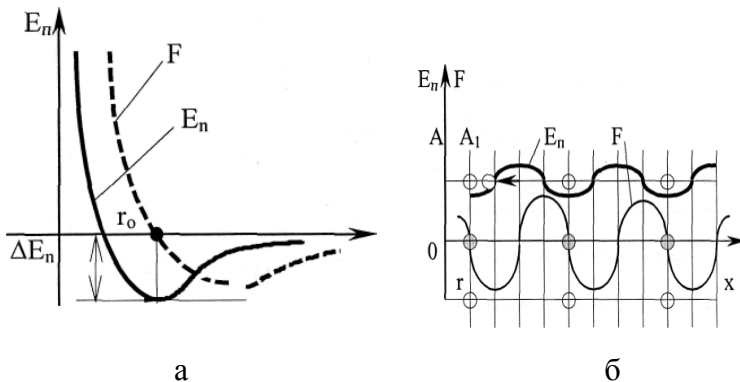


Рисунок 2.2 - Силві і енергетичні характеристики міжатомної взаємодії

З іншого боку, за законом Гука $\tau = GX/h$. Тут G - модуль зсуву, b і h - параметри ґратки. Оскільки зсувні деформації починаються при $X \ll b$ (в алюмінії при $X/b = 0,002$), то $\sin(2\pi x/b) \approx 2\pi x/b$.

Тоді $K \cdot 2\pi x \approx GX/h$, отже, $K \leq Gb/2\pi b$, а зсувна напруга

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi h} \sin \frac{2\pi x}{b} \quad (2.5)$$

Максимального значення сила опору досягає при зсуві, що дорівнює $b/4$ (мал. 3.2,б), тому

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{2\pi h} \cdot \frac{2\pi}{b} \cdot \frac{b}{4} \quad (2.6)$$

Обраховуючи $h \approx b$, одержуємо, що *теоретичне значення опору зсуву* $\tau_{\max} \approx G/4$. Це досить велика величина. Зокрема, для сталі $G \approx 80$ ГПа, отже, $\tau_{\max} \approx 20$ ГПа. Насправді опір зсуву конструкційної сталі принаймні на 2 порядки нижче. Причиною такої великої розбіжності між теоретичною та істинною міцністю є дефекти кристалічних ґраток. Через дефекти зсув відбувається не одночасно по всій атомній площині, а ковзання починається на одній або декількох ділянках, а потім поширюється по всій площині з кінцевою швидкістю, як це відбувається при розриві паперу, тканини. Якнайменший опір зсуву спостерігається при ковзанні уздовж найбільш щільно заселених атомами площин.

Дефекти кристалів ділять на нульмірні (точкові), одновимірні і двовимірні. До точкових відносять енергетичні, електронні та атомні. Найбільш поширені енергетичні дефекти - фонони - кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі). Тепло в кристалі поширюється також у вигляді механічних хвиль із звуковою швидкістю. У квантовій механіці поширення звукових хвиль, як і електромагнітних, розглядається як рух частинок - фононів. Енергія фонона, як і фотона, за формулою Планка дорівнює $h\nu$. До електронних дефектів відносять надлишкові електрони, дірки, екситони. Останні є парою електрон-дірка, зв'язану кулонівськими силами.

Основні види атомних дефектів включають вакансії, атоми в міжвузлах, чужорідні атоми у вузлах. Відстані між атомами у різних напрямках ґратки різні. Оскільки від міжатомної відстані залежать фізичні властивості кри-

талів: міцність, електропровідність, показник заломлення та ін., то ідеальні кристали є анізотропними середовищами (у різних напрямках різні властивості).

Анізотропія властивостей характерна для ідеальної кристалічної ґратки-монокристала. Монокристали вирощуються при строго контрольованих температурі й тиску з ретельно очищеного від домішок матеріалу. Їх міцність близька до ідеальної. Якщо при відливанні виробу такі заходи не дотримуються, то кристалізація починається одночасно на безлічі центрів, якими є домішкові атоми та інші дефекти. В результаті виникає безліч довільно орієнтованих монокристалів з розмірами порядку десятків мікрометрів (рис. 2.3). У той час як кожний кристаліт володіє анізотропією, тверде тіло, що складається з багатьох тисяч кристалів, у середньому однорідне, практично ізотропне і називається полікристалом. Звичайні конструкційні матеріали є полікристалами.

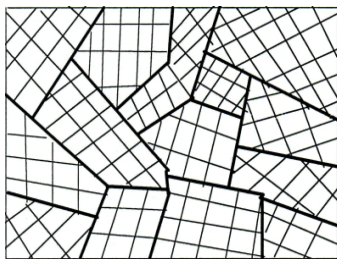


Рисунок 2.3 - Схема полікристала

Одновимірні дефекти - *дислокації* - відіграють величезну роль у поведінці кристалів при деформації. Найпростіша лінійна дислокація є відсутнім рядом атомів. Складнішою є гвинтова дислокація, яка виникає в результаті повороту однієї частини кристала щодо іншої. Пластична деформація кристалів здійснюється при зсувних напруженнях, у багато разів менших, ніж теоретичні, завдяки руху

дислокацій, який починається при порівняно невеликій відносній деформації порядку $10^{-4} - 10^{-3}$. Коли дислокація проходить через весь кристал, одна частина останнього зміщується щодо іншої на величину міжатомної відстані. Враховуючи те, що густина дислокацій велика (становить на початку зсуву $\sim 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$), то зсув приводить до однорідного ковзання безлічі блоків кристала один щодо одного з виходом дислокацій і утворенням сходинок на межах тіла. Рухливість дислокацій, а отже, швидкість пластичної деформації, експоненціально підвищуються зі зростанням температури. На рис. 2.4 показана залежність міцності від густини дефектів. Спочатку зростання числа дефектів (дислокацій) призводить до падіння міцності. Після досягнення мінімуму міцність наростає. В цьому випадку виявляється взаємодія дислокацій одна з одною і іншими дефектами, що приводить до загальмовування руху дислокацій. Тому існують *два способи зміцнення матеріалів*: зниження числа дефектів, тоді міцність

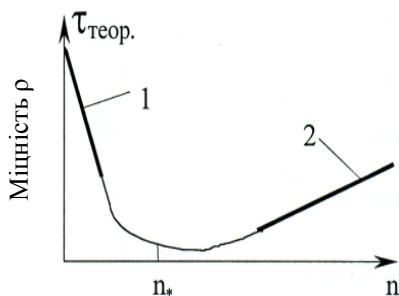


Рисунок 2.4 - Крива міцності

прагне теоретичної (ділянка 1 на кривій міцності), або збільшення густини дефектів (ділянка 2). Обидва шляхи реалізовано в промисловості. В строго контрольованих умовах одержують високоміцні волокна (наприклад з бо-

ру), близькі за будовою до бездефектних монокристалів. На основі цих волокон виготовляють металокпозиційні матеріали з величезною міцністю на розрив. Іншим прикладом одержання виробів з металів, що містять якнайменше число дефектів, є технологія виготовлення лопаток турбін турбореактивних двигунів. У даний час лопатку вирощують як монокристал у спеціальних формах за строго контрольованих умов. Другий шлях полягає в насиченні кристала дефектами за рахунок гартування, легування або механічного наклепу. Легування приводить до появи в ґратках чужорідних атомів. Гартування викликає подрібнення зерен полікристала, причому межі зерен є двовимірними дефектами, на них розсіюються дислокації. Деформаційне зміцнення - наклеп - приводить до утворення величезної кількості нових дислокацій, які перешкоджають їх взаємному переміщенню.

Аморфні речовини, на відміну від кристалічних, мають ближній порядок у розміщенні молекул, який стає хаотичним при віддаленні від даної молекули на декілька діаметрів. У таких речовин відсутня точка плавлення. Вони ізотропні. Текучість, як і у рідин, відбувається при будь-якому навантаженні й різко інтенсифікується з підвищенням температури, тому вони не володіють межею текучості. Напруги та деформації є функціями навантаження, часу і температури. До таких речовин відносять багато *полімерів*. Макромолекули полімерів мають ланцюг із сотень і тисяч атомів вуглецю, до якого бічними зв'язками приєднані групи OH, COOH, NH₂, атоми водню, хлору, фтору. До молекул можуть входити бензоліві кільця й інші поєднання атомів. Між макромолекулами діють сили Ван-дер-Ваальса. Як конструкційні матеріали використовують термопластичні та термореактивні полімери. До термопластичних належать поліетилен,

вініпласт, капрон, нейлон та ін. Вони розм'якшуються під дією температури. У них разом з аморфними є і кристалічні ділянки. Прикладом практично повністю кристалічного полімеру є фторопласт - унікальний хімічно інертний теплостійкий матеріал з надзвичайно низьким коефіцієнтом тертя.

Термореактивні полімери мають просторову сітчасту структуру. Макромолекули з'єднуються поперечними ковалентними зв'язками. До них відносять пластмаси на основі фенол-формальдегідних, епоксидних та інших смол. Такі пластики термостійкі, зберігають міцність до температури 300- 400°C.

Особливу групу складають еластомери, що мають здатність до великих, порядку сотень відсотків відносних пружних деформацій (гуми, поліуретани). Великі деформації пов'язані з особливою формою макромолекул, скручених у клубки, які розпрямляються при розтягуванні. За рахунок введення різних наповнювачів з полімерів створюють композиції, які володіють заданим комплексом фізико-механічних і хімічних властивостей.

2.2 Фізичні властивості поверхневих шарів

Атоми та інші частинки, що знаходяться всередині тіла, взаємодіють при найщільнішому укладанні з 12 сусідніми (рис. 2.5). Результируюча всіх сил взаємодії прямує до нуля. Частинка, що знаходиться на поверхні, взаємодіє з 6 сусідніми. Рівнодіюча сил притягання з боку сусідів F направлена всередину тіла. Інакше кажучи, F діє на граничну молекулу. Оскільки енергія сил притягання негативна, то поверхнева частинка володіє енергією, надмірною в порівнянні з тими, що знаходяться всередині (*поверхневою енергією*). *Надмірна енергія* характеризує здібність до міжмолекулярного притягання поверхонь, яке

називають *адгезією*. Адгезія виявляється в прилипанні. Притягання між шарами атомів усередині тіла називають *когезією*.

Наявність зв'язків, що не компенсуються, у граничних частинок призводить до осідання на поверхні молекул

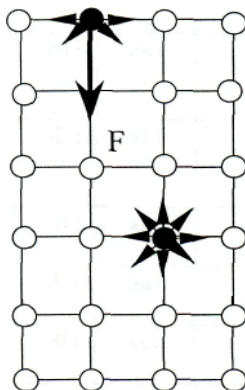


Рисунок 2.5 - Атоми в об'ємі і на межі

навколишнього середовища, що знижує запас поверхневої енергії. Процес поглинання поверхнею молекул називається *адсорбцією*. Внаслідок зменшення запасу поверхневої енергії виділяється теплота адсорбції. Процес, зворотний адсорбції, називають *десорбцією*. Розрізняють адсорбцію фізичну і хімічну. *Фізична адсорбція* пов'язана з притяганням чужорідних молекул за рахунок сил Ван-дер-Ваальса. *Хемосорбція* викликана дією валентних зв'язків. Поверхня в різних точках має різну поверхневу енергію. Мікродфекти володіють підвищеною адсорбційною активністю. За рахунок фізичної адсорбції на поверхні молекули газів і води осідають у першу чергу на активних ділянках - центрах адсорбції.

Сорбовані молекули вступають у хімічну реакцію з матеріалом. Так проходять окиснення поверхонь, що ви-

кликає корозію. Утворюється *окисна плівка*. Сорбована волога і температура стимулюють процес окиснення. Зростання окисної плівки спочатку відбувається швидко, потім сповільнюється. Плівки розрізняють за товщиною: тонкі (товщина до 40 нм), середні (до 500 нм), товсті - видимі (товщиною більше 500 нм). Оксиди бувають м'якими і крихкотілими, наприклад, у міді, заліза та його сплавів (іржа). Тверді й суцільні плівки утворюються на алюмінії, благородних металах. Властивості окисних плівок, як правило, істотно відрізняються від властивостей матеріалу основи. Найважливішими є коефіцієнт теплового розширення, крихкість, співвідношення адгезійної і когезійної міцності. Через відмінність у властивостях плівки можуть розтріскуватися і відшаровуватися, що істотно впливає на зношування під час тертя.

Особливе значення має фізична адсорбція молекул *поверхнево-активних речовин* (ПАР). До них відносять, зокрема, органічні речовини, молекули яких мають полярні групи (ОН, СООН, NH₂) і неполярні -CH₂ (рис. 2.6). Молекули ПАР активними групами сорбуються на активних центрах поверхні, утворюючи молекулярний ворс, який розділяє пару контактуючих поверхонь і істотно знижує тертя.

ПАР, адсорбовані на поверхні твердого тіла, здатні змінювати характер взаємодії з рідиною (*змочування*). Залежно від того, як орієнтуються молекули ПАР стосовно до твердої поверхні, остання може добре змочуватися (гідрофільна) або погано (гідрофобна поверхня). Так, якщо молекулярний ворс направлений полярними групами до поверхні, а протилежні кінці є неполярними, то змочування добре, якщо орієнтація молекул протилежна - змочування погане. Оцінка гідрофільності проводиться за величиною кута змочування Θ (рис. 2.7). При змочуванні $0 \leq \Theta < \pi/2$, при незмочуванні $\pi/2 < \Theta < \pi$.

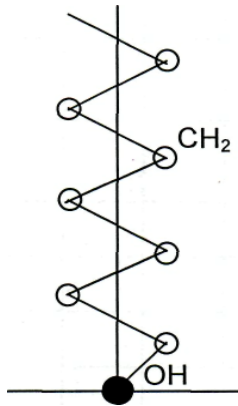


Рисунок 2.6 - Молекула ПАР

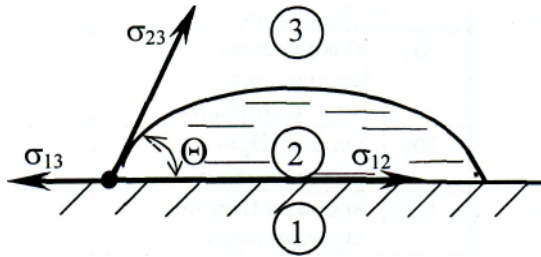


Рисунок 2.7 - Сили натягу

Оскільки система прагне скоротити запас поверхневої енергії, то тіло намагається зменшити площу поверхні. Крапля рідини набирає сферичної форми, оскільки сфера має якнайменше відношення площі поверхні до об'єму. Тому поверхня знаходиться в розтягнутому стані, і якщо з неї виділити елемент, то дію частини, що залишилася, на елемент можна замінити рівнорозподіленими за контуром силами натягу. Мірою надмірної поверхневої енергії є *коефіцієнт поверхневого натягу* σ , що дорівнює надмірній енергії з розрахунку на одиницю площі поверхні або

силі натягу, діючій на одиницю довжини контура елемента поверхні. На рис. 2.7 показані сили натягу на межах розділу фаз: σ_{12} - тверде тіло - рідина; σ_{23} - рідина-газ; σ_{13} - тверде тіло-газ. Оскільки система знаходиться в рівновазі, сума сил дорівнює нулю, а $\cos\Theta = (\sigma_{12} - \sigma_{13} / \sigma_{23})$. За рахунок сил натягу, рідина в капілярах утворює меніски (рис. 2.8), під якими виникає тиск, що розраховується за формулою Лапласа, і направлений до центра кривизни:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (2.7)$$

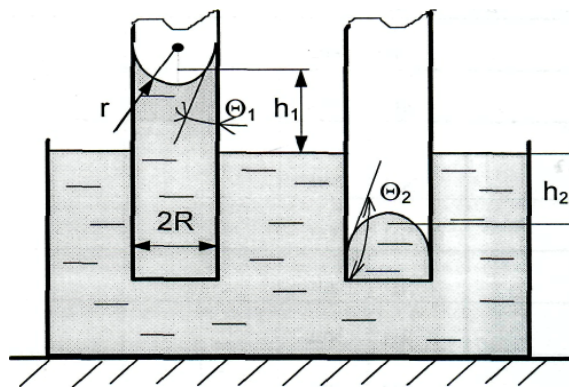


Рисунок 2.8 - Капілярний ефект

Під дією цього тиску спостерігається *капілярний ефект*, що полягає в підйомі або опусканні рівня рідини в капілярі на висоту

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{R\rho g}, \quad (2.8)$$

де ρ - густина рідини; g - прискорення вільного падіння. Капілярний ефект має велике значення для пористих тіл. Він використовується для подачі масла в зону тертя в підшипниках з пористими втулками.

Адсорбовані молекули ПАР, знижуючи поверхневий натяг, зменшують опір пластичної деформації поверхневого шару, пластифікують його.

За наявності в змащувальному матеріалі ПАР виявляються ефекти Ребіндера.

Зовнішній ефект Ребіндера. Елементарні структурні складові твердого тіла (атоми, молекули), які розміщені всередині об'єму, взаємодіють з оточуючими частками у всіх напрямках. Результуюча цих сил взаємодії наближається до нуля, що відповідає мінімуму потенційної енергії. Поверхневі частки твердого тіла внаслідок некомпенсованих зв'язків характеризуються надлишковою енергією, що зумовлює їх взаємодію з молекулами навколишнього середовища або з атомами (молекулами) контртіла.

При адсорбції ПАР вільна енергія твердого тіла зменшується. При цьому знижується опір поверхневого шару твердого тіла пластичному деформуванню, полегшуються пластичний зсув у зернах та вихід дислокацій на поверхню. Верхній шар металу може мати меншу мікротвердість, ніж нижче розміщені, насичені дислокаціями шари, а також більш низькі межі текучості та коефіцієнт зміцнення. Деформований за наявності ПАР поверхневий шар металу характеризується більш дрібною зернистою структурою. *Це явище адсорбційної пластифікації твердих тіл під дією поверхнево-активних речовин називають зовнішнім ефектом Ребіндера.* Товщина пластифікованого шару становить орієнтовно 0,1 мкм. На відміну від хімічного модифікування поверхні ефект Ребіндера має виявлення при одночасній дії середовища (ПАР) та ме-

ханічних навантажень, а при видаленні ПАР адсорбційне пластифікування поверхні не виявляється.

Внутрішній ефект Ребіндера (адсорбційно-розклинюючий) - це явище адсорбційного пониження міцності (виникнення крихкого руйнування при низьких напруженнях аж до самовільного диспергування). Реалізується при дифузії активних компонентів мастильного матеріалу до вершин новоутворених тріщин, коли активні центри молекул досягають ділянки, розмір якої менше двох розмірів молекул, останні розклинують її. При цьому тиск на стінки у вершині тріщини досягає 10 МПа, що зумовлює розрихлення кристалічної решітки металу в цих місцях та ініціює подальший розвиток тріщини. За таких умов знижується опір матеріалу атомному руйнуванню.

Полімолекулярні шари, чинячи опір потоншенню, виявляють розклинюючу дію (ефект Дерягіна). Розклинюючий тиск залежить від природи ПАР і поверхні твердого тіла. У розчинів жирних кислот товщина граничного шару і міцність розклинюючої дії - лінійна функція вуглеводневого радикала.

Найважливішими для трибології фізико-механічними показниками поверхневих шарів є *мікротвердість* (H_{μ}), модулі Юнга і зсуву (E , G), *межа зсувної міцності* (τ_s). Ці показники визначають процеси тертя і зношування. Мікротвердість визначають частіше за все методом удавлювання в досліджувану поверхню алмазної піраміди з кутом між гранями 136° під навантаженням N . Під мікроскопом вимірюють діагональ відбитка (d). Величину мікротвердості розраховують за формулою

$$H_{\mu} = 1,854 \cdot N/d^2 . \quad (2.9)$$

Метод стандартизований. Величина мікротвердості пов'язана з межею текучості при розтягуванні (σ_s) і межею зсувної міцності

$$H_{\mu} = 3\sigma_s = \sigma\tau_s. \quad (2.10)$$

З пониженням температури (починаючи від кімнатної) мікротвердість міняється слабо у бік підвищення. При збільшенні температури мікротвердість істотно знижується для багатьох металів згідно із законом

$$H_{\mu} = A \cdot \exp(-\alpha T/T_{пл}), \quad (2.11)$$

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

Для оцінки фізичних властивостей поверхневих шарів застосовують методи оптичної, електронної, іонної мікроскопії, рентгенівського спектрального мікроаналізу, дифракції повільних електронів і рентгенівського проміння з малими кутами ковзання, екзоелектронної емісії та ін.

2.3 Вплив механічної обробки на службові властивості поверхневого шару

Механічна обробка конструкційних матеріалів у ході виготовлення деталей вносить істотні зміни в будову і властивості поверхневих шарів. Одна з причин - пружна і пластична деформація. При механічній дії інтенсивно утворюються і переміщаються дислокації, виникають нові структури, пов'язані з подрібненням та орієнтацією зерен у напрямі дії сил. Деформація (витягування) зерен і їх орієнтація відбуваються не тільки при механічній обробці поверхонь, а й під час тертя. Подібну зміну структури в поверхневих шарах називають текстурованням. Наявність орієнтації текстурованих зерен, що відбувається у напрямі руху оброблювального інструмента або тертя, змінює міцність, твердість матеріалу, магнітні, електричні та інші властивості, рис. 2.9. Текстуровані шари мають високий ступінь анізотропії.



Рисунок 2.9 - Текстурування

При текстуруванні, утвореному при обробці або терті, в самому поверхневому шарі і в підшарі виникають залишкові напруги розтягування-стиснення, різні дефекти у вигляді мікротріщин і шпарин. Пластична деформація супроводжується тепловиділенням. Зростання локальних температур прискорює окислювальні процеси, чому сприяє середовище (охолоджувальні емульсії, мастила). В поверхневому шарі під час тертя можуть відбуватися фазові перетворення.

Зміну міцності при деформації поверхневого шару називають деформаційним зміцненням або наклепом. На рис.2.10 показана схема граничного шару після механічної обробки. Верхня частина 1 є шаром адсорбованих молекул рідин і газів, включаючи ПАР. Наступний шар 2 складається з оксидів. Його товщина, як правило порядку 10 нм. Сюди входять пилові вclusions, продукти зносу інструменту. Шар 3 складається з кристалітів, що піддалися змінам під дією пластичної деформації і температури. Саме він і визначає експлуатаційні властивості (зносоустійкість) деталі. Далі йде основа 4, не зачеплена обробкою. Чим глибше поширюється пластична деформація, наприклад, при обробці різанням, розкочуванні, калібруванні, тим товщий шар 3. З обробних опера-

цій найбільшої товщини цей шар досягає при лезовій обробці. В табл. 2.2 наведені дані про властивості шару 3.

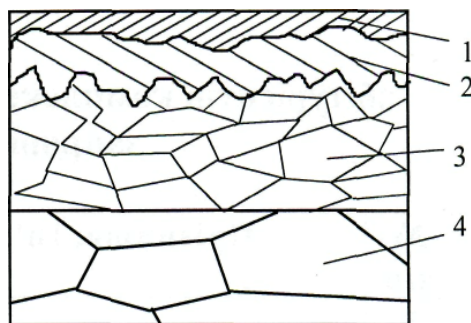


Рисунок 2.10 - Будова граничного шару

Таблиця 2.2 - Властивості деформованого шару

Вид обробки	Hц пов / Hц об'ємн.	Товщина шару 3, мкм
Точіння	1,2-2	30 – 200
Фрезерування	1,4-2	40 - 200
Чистове точіння	1,5-2	20-75
Шліфування	1,5-2,5	30-60
Притирання	1,1–12	3 - 7

Після механічної обробки найбільша твердість спостерігається не на поверхні, а на глибині близько 10-20 мкм. На сталевих поверхнях верхній шар під впливом тертя або багатократної пластичної передеформації може знеміцнюватися. В ньому відбувається тонке подрібнення кристалів і структура наближається до аморфної. Такий шар, товщина якого, як правило, становить порядку 5 мкм, називають *шаром Бейльбі*.

2.4 Коротка характеристика деяких питань теорії будови, природи властивостей і стану матеріалу поверхневих шарів

У матеріалофізичному підході на мікрорівні вивчаються властивості дефектів, природа їх утворення і міграції, можливість накопичення та анігіляції, характерні масштаби і т.д. Таким чином, у матеріалофізичному аспекті під поверхневим шаром розуміють недосконале кристалічне тверде тіло, що володіє анізотропією механічних властивостей.

Для оцінки властивостей поверхневих шарів використовуються електронна і ОЖЕ-спектроскопія, металографія і рентгеноструктурний аналіз, що дозволяє виявити домінуючий вид дефектів і будову дисипативних структур, що розвиваються під час тертя, а також глибину їх розміщення.

Підхід металографії до вивчення процесів, що відбуваються при зношуванні, є особливо цікавим і багатообіцяючим для пояснення спостережуваних змін у стані матеріалу з позицій кінетичної і синергетичної теорій, які дозволяють встановити зв'язки між процесами, що проходять у поверхневих шарах на різних масштабних рівнях.

Мікроскопічні акти утворення дефектів є основою, що визначає поведінку матеріалів на мікро- і макрорівнях. Поява кожного дефекту спричиняє відповідну зміну загального стану поверхневого шару, що характеризується внутрішньою енергією і ентропією.

Згідно з термодинамікою поверхневий шар можна розглядати як відкриту термодинамічну систему, здатну обмінюватися енергією і речовиною з навколишнім середовищем, яка характеризується комплексом інтенсивних характеристик. Наявність сорбційних процесів на поверхні матеріалів робить їх схожими з мембранами, але на відміну від звичайних мембранних систем поверхневий

шар володіє ще й об'ємними характеристиками і, отже, комплексом власних інтенсивних характеристик. У рамках термодинамічного підходу стало можливим користуватися загальними поняттями і використовувати параметри стану, придатні для опису будь-яких макроскопічних систем, а також у зручній формі, через зміну термодинамічних потенціалів, враховувати адсорбційні та інші ефекти. Стосовно опису зношування були спроби встановити рівняння стану поверхневого шару у вигляді загальних рівнянь балансу енергії, або балансу ентропії. Це привело до створення енергетичних моделей, наприклад Ю.К.Машковим, що представляють функціональну залежність швидкості зношування від термодинамічних чинників:

$$J = f(U, S, t, \dots), \quad (2.12)$$

де J - інтенсивність зношування; U - внутрішня енергія; S - ентропія; t - час.

В основу термодинамічного підходу покладені такі ідеї:

- у поверхневому шарі матеріалу, що зношується, можна виділити об'єм, що знаходиться в стані локальної рівноваги;

- процеси тертя і зношування можуть бути описані рівнянням енергетичного балансу;

- швидкість деструкції контролюється швидкістю виробництва ентропії.

Рівняння балансу ентропії, записане для локальної ділянки (локальна термодинамічна рівновага), має вигляд

$$\rho \, dS/dt + \operatorname{div}S = \sigma[S], \quad (2.13)$$

де ρ - швидкість приросту ентропії в даній ділянці;

$\text{div}S$ - швидкість відтоку ентропії з даної ділянки в навколишнє середовище; $\sigma[S]$ - швидкість виникнення або вироблення ентропії всередині даної ділянки.

У подібних моделях, проте, не врахований той факт, що в процесі деформації активуються дисипативні процеси, в результаті яких перед руйнуванням у матеріалі, що деформується, замість очікуваного хаосу і деградації спостерігаються високовпорядковані структури, що самоорганізуються, тобто з системи безперервно «відкачується» ентропія, утворювана в ході накопичення дефектів. Крім того, відомий факт, що на стадії вичерпання пластичності переважна роль відводиться колективним процесам, що охоплюють масштаб більший, ніж розміри локальних ділянок усередині осередків дислокацій, урахування яких у виразі не передбачений.

Об'єднує різні підходи до розуміння процесів, що відбуваються, кінетична теорія міцності, що розвивається під впливом ідей російського академіка С.Н.Журкова. Спираючись на успіхи, досягнуті у галузі вивчення деформації і руйнування матеріалів, ця теорія висуває положення про загальну термоактиваційну природу хімічних, механохімічних і механічних процесів, здійснюваних шляхом подолання енергетичного бар'єра. З позиції кінетичної теорії поверхневий шар розглядається як тіло, що складається з безлічі структурних складових - кінетичних одиниць, якими можуть прийматися атоми і молекули речовини, тобто елементи, що викликають теплові коливання. При кінетичному описі явищ, що відбуваються за термоактиваційним механізмом, використовуються такі припущення:

- в основу механізмів накопичення пошкоджень та атомного руйнування поверхнього шару покладені термоактивуючі кінетичні процеси;

- залежність між швидкістю деструкції матеріалу J і зовнішніми чинниками встановлюється через його активаційні параметри: енергію активації U_0 і структурно-чутливий коефіцієнт γ :

$$J = f(U_0, \gamma, \sigma, T \dots). \quad (2.14)$$

Так, при дослідженні кінетики процесу повзучості матеріалів виявилось, що швидкість деформації залежно від зовнішніх чинників може бути достатньо добре описана виразом Арреніуса подібно опису швидкості хімічних реакцій

$$\ln k = -E/R \cdot T + B, \quad (2.15)$$

де $\ln k$ - константа швидкості реакції; E - енергія активації хімічної реакції.

Це дало привід припустити, що в процесі деформації на мікрорівні реалізуються елементарні акти, що мають термоактиваційну природу, а швидкість процесу, за аналогією з кінетикою реакцій, контролюється висотою енергетичного бар'єра, який утримує активаційну частинку матеріалу в стійкому стані.

У кінетичній теорії за активаційні частинки беруть атоми і молекули речовини, для яких можливі акти руйнування зв'язків під дією теплових флуктуацій. Оскільки теплове поле кристалів на мікрорівні не є однорідним, у результаті випадкової взаємодії окремі атоми можуть набутися надмірної кінетичної енергії, достатньої для самостійного подолання енергетичного бар'єра і переходу в новий стійкий стан.

Стосовно вивчення тривалої міцності і довговічності твердих тіл теорія термофлуктуацій знайшла якнайповніший розвиток у працях академіка С.Н.Журкова і його учнів, які на основі аналізу вірогідності прояву теплових

флуктуації одержали вираз довговічності одиничного зв'язку в полі діючих механічних напруг.

Основною думкою цієї концепції є те, що руйнування міжатомного зв'язку відбувається в результаті випадкової появи надлишку кінетичної енергії в атома (термічної флуктуації), а зовнішня напруга робить вплив тільки на величину потенційного бар'єру, зменшуючи його. Таким чином, було встановлено, що нестійкість матеріалу, що призводить до його деформації або руйнування, може бути викликана за рахунок термоактиваційного і атермічного механізмів. У термінах кінетичної теорії в першому випадку енергетичний бар'єр долається «знизу», як це відбувається при нагріванні матеріалу, який викликає збільшення кінетичної енергії всіх частинок і відповідно вірогідність появи руйнівної флуктуації. В другому - бар'єр долається «зверху», оскільки за рахунок механічного відхилення частинок від положення рівноваги зменшується величина енергії активації критичної флуктуації.

Великий експериментальний матеріал з дослідження тривалої міцності матеріалів показав, що вираз для оцінки довговічності одиничного атомного зв'язку залишається справедливим і для опису довговічності макроскопічних тіл, що знаходяться в полі діючих навантажень і температур. Дослідження енергії активації руйнування металевих зразків при високотемпературній повзучості показали, що її величина тотожна енергії активації сублімації атомів. Аналогічна тотожність була знайдена і для процесу деформації, що виражається близькими значеннями енергій активації повзучості матеріалів і самодифузії атомів.

Таким чином, відповідно до термофлуктуаційної теорії міцності можна записати вираз для довговічності оди-

ничного зв'язку (довговічність тут - час існування одиничного зв'язку під навантаженням)

$$\begin{aligned}\tau_p &= \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U(\sigma)}{R \cdot T}\right); \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \cdot \exp\left(\frac{U(\sigma)}{R \cdot T}\right)\end{aligned}\quad (2.16)$$

$$U(\sigma) = U_0 - \gamma \cdot \sigma, \quad (2.17)$$

де ε - швидкість повзучості; ε_0 і τ_0 - постійні, залежні від дебаївської частоти атомних коливань; $U(\sigma)$ - ефективна енергія активації; U_0 , γ - активаційні параметри.

Проте дослідження кінетики деформації показали, що активаційні параметри під час переходу певних значень температур здатні стрибком змінюватися. Причому було встановлено, що кожна зміна параметрів відповідає зміні домінуючого дисипативного механізму. Вперше цей ефект був знайдений Дорном при дослідженні повзучості металів, коли для різних механізмів деформації був одержаний спектр значень енергії активації. В.І.Владимировим було також встановлене існування під час тертя різних механізмів дисипації енергії, хоча таке ускладнення моделі об'єкта, що вивчається, вже виходить за межі можливостей кінетичного підходу.

Об'єднання мікро-, мезо- і макроскопічних процесів виявилось під силу новій теорії, названій «синергетика».

Сам термін «синергетика» походить від грецького «синергос» - «разом діючий».

Синергетика займається вивченням процесів самоорганізації, стійкості і розпаду структур різної природи, що відбуваються в нерівноважних системах на основі з'єднання принципу матеріальної єдності світу з принципом розвитку.

Матеріал поверхневого шару, що з цієї точки зору деформується, може розглядатися як функціональна система, яка в умовах безперервного підводу енергії ззовні починає проявляти ознаки живої матерії; виявляються ефекти пам'яті, спадковості, самоорганізації, фазових перетворень, реакції системи на зміни зовнішніх чинників і т.д. Синергетичний підхід, що розвивається в працях Г.Хакена, Д.Кайзера, В.С.Іванової, Л.І.Бершадського та ін., розглядає руйнування матеріалу поверхневого шару як наслідок катаклізмів, у яких система або її локальні складові досягають точки біфуркації - нестійкості, що передує зміні дисипативного механізму.

3 ЗНОШУВАННЯ ТЕРТЬОВИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Основні характеристики і види зношування

Відносні переміщення контактуючих поверхонь і їх механічні взаємодії приводять не тільки до змін стану і властивостей матеріалів поверхневих шарів, але і до їх руйнування.

Як правило руйнування відбувається у формі відділення від поверхонь тертя дрібних частинок матеріалу, що призводить з часом до зміни розмірів і форми контактуючих деталей. Це явище і називають *зношуванням*.

Необхідно мати на увазі, що зношування є складним багаторівневим процесом.

Основним ініціатором зношування є деформація матеріалу контактуючих поверхонь під дією контактних напруг і температурної флуктуації. Їх наслідком є накопичення дефектів структури з концентрацією в поверхневому шарі: текстурування матеріалу у напрямі ковзання; хімічні реакції матеріалу пари з активними компонентами середовища; перенесення речовини з поверхні тертя в

глибину або назад і обмін речовиною контактуючих тіл тощо.

Основні поняття, терміни і визначення в галузі зношування регламентовані ГОСТом 23.002. Зокрема, за цим ГОСТом результат зношування визначений терміном *знос*.

Величину зносу визначають в одиницях довжини, об'єму, маси, а знос за одиницю часу - як *швидкість зношування*, м/год:

$$J = \Delta h/t,$$

де Δh - величина зносу (лінійний знос) або товщина видаленого шару, м; t - час, год.

Широко поширена інша характеристика зношування - *інтенсивність зношування*:

$$J = \Delta h/L \quad (\text{безрозмірна величина}),$$

де Δh - величина зносу, м, а L - шлях тертя, м.

Уявлення про характер зношування можна одержати з короткого огляду основних різновидів зношування. У трибології прийнято за основу класифікації видів зношування брати виразно спостережуваний або іншим чином встановлений переважаючий вид руйнування поверхонь тертя.

3.1.1 Утомне зношування

До втомного зношування відносять випадки, коли під час роботи вузлів тертя відсутні аномальні пошкодження (схоплювання, задири, мікрорізання, припали поверхонь і т.п.), тертя проходить в нормальних умовах, є мастило, але проте внаслідок тертя матеріал поверхневого шару «втомлюється» і починає відділятися у вигляді частинок зносу. Тут ніби проводиться аналогія з поняттям «утомна міцність».

Розрізняють утомне зношування двох видів: багатоциклове і малоциклове. Багатоциклове зношування виникає при пружному контакті. Багатократна дія на мікрівиступ призводить до поступового накопичення мікроефектів, утворення мікротріщин, при злитті яких утворюються поверхневі макротріщини, що викликають руйнування матеріалу і відділення частинок зносу. При малоцикловому зношуванні сумісна дія нормального і дотичного навантажень під час тертя призводить до того, що максимальна дотична напруга виникає не на поверхні, а під п'ятном контакту на невеликій глибині, де нагромаджуються пошкодження й утворюються тріщини. У крихкого матеріалу тріщина виникає на поверхні. Малоциклове зношування спостерігається при пластичній деформації поверхонь (без різання) більш м'якого матеріалу виступами більш твердого. В місцях такої деформації нерідко утворюються бічні навалювання, які при подальших проходах теж можуть відділятися у вигляді продуктів зносу.

Особливим проявом багатоциклового зношування є так званий пітинг (англ. pit -углубление), що виникає на доріжках кочення підшипників під час пульсації навантаження.

Пітинг виникає в результаті багатократної деформації поверхонь, навантажуваних тілами кочення. Виразки пітингу часто називають викришуванням. Окрім підшипників і напрямних кочення, такий знос характерний для зубів шестерень, шліцьових з'єднань і ряду інших контактних пар.

3.1.2 Абразивне зношування

Абразивні частинки призводять на поверхнях тертя руйнівну дію в двох основних формах. Гострі абразивні частинки дряпають, скоюють хаотичний процес мікрорізання, що спостерігається, наприклад, під час роботи гру-

нтообробних або гірських машин. Другий характерний механізм зношування - деформаційна дія «тупих» абразивних частинок, які не дряпають, а видавлюють лунки або борозенки і викликають при багатократному повторенні локальні втомні руйнування.

Ще одним різновидом абразивного зносу є *гідроабразивний знос*. Гідро- і газоабразивний знос виникає під час дії на поверхню потоків газу або рідини, що містять частинки абразиву.

За відсутності абразивних частинок в струменях рідин або газів спостерігається *ерозійний знос*.

До даного різновиду зношування близький *кавітаційний знос*. Кавітаційний знос виникає, коли рідина обтікає краї перешкод, наприклад лопаток насосів, турбін. На краях перешкод різко змінюється швидкість течії, утворюються її розриви, й кавітаційні утворення, заповнені паром, які, закриваючись, створюють ударні хвилі. Багатократна ударна дія розхитує кристали металевої поверхні, які через деякий час викришуються.

3.1.3 Корозійно-механічне зношування

До такого різновиду зношування відносять окислювальний знос, фретинг-корозію і водневий знос. *Окислювальний знос* пов'язаний з активацією окислювальних процесів поверхневих шарів поверхонь, що труться, за рахунок пластичної деформації, підвищеної температури, дії циклічних навантажень і наявності кисню в мастилi й навколишньому середовищі.

При окислювальному зношуванні спочатку, коли плівки оксидів тонкі (порядку часток мікрметра) і еластичні, вони відіграють позитивну роль і оберігають поверхні від пошкоджень. Але у міру зростання вони стають товстими, крихкими і руйнуються при навантаженнях, які спочатку легко переносили. Продукти зносу вносяться з мастилом. Тим часом окислювальний процес триває, плі-

вки знову нарастають і захищають від зносу основний матеріал. Таким чином, окислювальне зношування - це процес, при якому руйнується не матеріал деталі, що зношується, а його вторинні структури - оксиди, що утворюються в процесі тертя.

Найагресивнішою формою окислювального зносу є *фретинг-корозія* (англ. fret - роз'їдати). Фретинг-корозія, як правило спостерігається в номінально нерухомих з'єднаннях, схильних до вібрації. При фретинг-корозії циклічні мікропереміщення в контакті викликають локальні теплові флуктуації, багатократну пластичну деформацію, інтенсивне накопичення дефектів структури, утворення мікро- і макротріщин, по яких у глибину від поверхонь дифундує кисень та інші активні компоненти середовища. Частинки, що відділилися, абразивно впливають на поверхню. Характерні об'єкти подібного зношування - замки лопаток різних турбін, різьбові з'єднання та інші деталі машин, що працюють у динамічно напружених умовах.

Водневий знос спостерігають у різьбових з'єднаннях, золотникових і плунжерних парах, гальмівних дисках і інших вузлах тертя.

Водень у парах тертя утворюється в атомарній формі при електрохімікотермічному розкладанні води, мастил, пластмас. Такий водень по мікродефектах матеріалу дифундує до поверхневого шару. При цьому металеві зв'язки замінюються слабкими водневими, а матеріал стає крихким.

Водневе зношування вперше було відкрито і досліджене російськими трибологами Д.Н.Гаркуновим і А.А.Поляковим.

Відомий ще один досить своєрідний різновид зношування, при якому, навпаки, спостерігається аномально низький знос деталей. Цей вид зносу умовно називають *незносністю*, або вибіркоким перенесенням. Вибіркове

перенесення також відкрите російськими трибологами І.В.Крагельским і Д.Н.Гаркуновим у 1963 р. під час дослідження пар тертя ковзання «сталь-мідні сплави», мащених гліцерином.

Під час тертя в таких парах на сталевій поверхні виникає м'який, близький до аморфного стану шар міді. При цьому в процесі тертя відбувається взаємне безперервне перенесення атомів міді з однієї поверхні на іншу, а плівка міді на сталі постійно поновлюється. Можливий і інший варіант, коли обидві деталі, що труться, сталеві, але в системі машини є деталі з мідних сплавів, що не беруть участі в терті. Кислоти, що виникають у мастилі в ході його термічного розпаду, розчиняють мідний сплав, причому іони міді осідають на обох сталевих поверхнях, утворюючи захисні плівки. В третьому випадку в мастило вводять колоїдний розчин частинок, необхідних для утворення захисних плівок. Вибіркове перенесення забезпечує багаторічну експлуатацію вузлів тертя без помітного зношування. В такому режимі, наприклад, працюють компресори побутових холодильників. Є позитивний досвід створення режиму вибіркового перенесення в ДВЗ та інших агрегатах і вузлах тертя автомобілів.

Особливий механізм зношування виявляється у гум. Володіючи низьким модулем пружності, гуми здатні до високої відносної пружної деформації в 100% і більше. Через високий коефіцієнт тертя елементи гумової поверхні захоплюються контртілом, витягуються, відриваються і скручуються, утворюючи продукти зносу у вигляді руна.

Є й інші менш виражені і специфічні форми зносу, які цікаві при вузькій спеціалізації.

Проте, незважаючи на широку специфіку, у всіх видів зношування є загальні закономірності.

Типова характеристика зносу в часі представлена на рис. 3.1.

Початкова частина кривої тут характеризує період притирання ($t_{\text{притир}}$). Потім зношування проходить з постійною швидкістю ($t_{\text{притир}}$; $t_{\text{критич}}$). Цю ділянку прийнято називати періодом нормальної експлуатації. При $t > t_{\text{критич}}$ знос різко зростає, стає катастрофічним, що призводить до виходу вузла тертя з ладу.

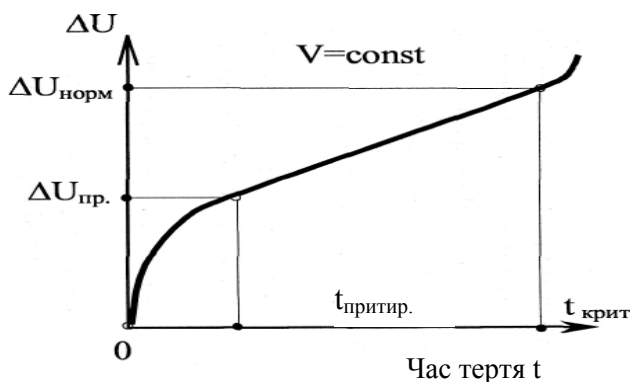


Рисунок 3.1 – Крива зносу

На етапі притирання формуються експлуатаційні властивості вузла тертя.

Шорсткість, що сформувалася до кінця притирання, прийнято називати рівноважною. Рівноважна шорсткість пов'язана з початковою, але її параметри головним чином визначаються фізико-механічними властивостями матеріалів деталей і мастила, а також характеристиками режиму тертя (навантаження, швидкість, температура і т.д.). При введенні в експлуатацію вузлів тертя після виготовлення або капітального ремонту в технічній документації ретельно обумовлюються режими притирання або обкатки, щоб вона пройшла в найкоротший строк і створила сприятливі умови для тривалої експлуатації. Як правило та-

кож обумовлюється і гранично допустима величина зносу (Δh_{\max}), що визначає ресурс усього вузла тертя або змінних деталей, наприклад, вкладишів підшипників ковзання, підшипників кочення, гальмівних колодок.

На закінчення короткого огляду форм прояву зношування варто зазначити, що в чистому вигляді кожний з відзначених механізмів зношування практично не трапляється, частіше за все переважають ведучий механізм зношування і супутні форми залежно від особливостей конструкції та умов роботи вузла тертя.

Основним способом руйнування матеріалу на поверхнях тертя при всіх видах зношування є утворення і накопичення пошкоджень у тонких поверхневих шарах матеріалу. При цьому наявність абразиву, хімічних перетворень або явища перенесення може лише змінювати інтенсивність руйнування або у бік прискорення, або уповільнення.

Завдання трибології полягає в розробленні засобів і методів управління цими процесами або направлено зменшення зношування, забезпечення високих ресурсних характеристик матеріалів вузлів тертя.

3.2 Кінетична інтерпретація зношування

Престиж і корисний ефект будь-якої машини або агрегату перш за все складають характеристики працездатності, надійності і безпеки. Якщо безпека машини чи агрегату багато в чому визначається міцністю елементів систем, механізмів і окремих деталей, то при їх оцінці в категоріях надійності зростають значення і питома вага ресурсних характеристик, визначуваних конструктивними, технологічними та експлуатаційними чинниками. Серед ресурсних характеристик найважливіше значення має

зносостійкість деталей - збереження ними розмірів, форми і міцнісних властивостей у ході експлуатації.

Сучасна точка зору на фізичний механізм зношування під час тертя склалася під впливом досліджень післявоєнних років. Найбільший внесок у наукове розуміння фізики явищ зношування в СРСР внесли такі вчені, як В.Д.Кузнецов, І.В.Крагельський, Б.І.Костецький, А.С.Ахматов, Н.А.Буше, Н.Н.Давиденков, Ю.С.Термінасов, а за кордоном - Д.Арчард, Ф.Боуден, Д.Тейбор, Т.Куїн та ін.

Ці учені вперше зіставили зносостійкість із роллю структурних чинників матеріалів у формуванні фізико-механічних властивостей поверхонь, знайшли зміцнення і знеміцнення матеріалу тертям, відмінність деформації зерен полікристалічних матеріалів на поверхнях тертя й у внутрішньому об'ємі та інші фундаментальні явища, що визначають зношування.

Разом з інструментальними дослідженнями (рентгєнівські, оптичні, електронно-мікроскопічні та інші методи вивчення матеріалу на вільних поверхнях) у той самий період відбувається формування теоретичного підходу до вивчення зношування на основі *теорії дислокацій*.

У центрі уваги цього підходу стоять проблеми структурно-енергетичного тлумачення зародження, розмноження і динаміки руху точкових дефектів і дислокацій поблизу вільної поверхні твердого тіла, дії локальних контактних температур і напруг, що викликаються тертям.

Загальна картина вироблених уявлень у цьому підході коротко виглядає таким чином.

Під час тертя поле зовнішніх напруг і температурних флуктуацій змінює хімічний потенціал точкових дефектів (вакансій, міжвузлів) і формує їх направлені дифузійні потоки, під час руху яких утворюються вакансійні петлі,

кластери та інші форми дефектів, а швидкість їх руху посилюється під дією осмотичних сил. В.П.Алехін назвав цей процес дифузійним накачуванням дефектів у поверхневі шари під час тертя.

Сама вільна поверхня при цьому є областю полегшеного зародження і стоку точкових дефектів і дислокацій.

Хімічні явища на поверхнях кристалів (Т.Судзукі, Японія) посилюють поверхневі джерела зсуву, а поблизу від вільної поверхні (І.Р.Крамер, Англія) утворюється бар'єрний шар з підвищеною густиною дислокацій, який затримує рух дислокацій, що генеруються внутрішніми джерелами. Цей шар названий дебріс - шаром (debris - англ, осколки, сміття, звалище).

Підвищена концентрація дислокацій поблизу поверхні твердого тіла (Л.М.Рібакова і Л.І.Куксенова та ін.), що деформується, неминуча, зважаючи на утворення великої кількості гомогенних і гетерогенних джерел. Ці джерела генерують не тільки велике число петель у порівнянні з джерелами в глибині від поверхні, але і забезпечують їх поширення на великі відстані. Оскільки швидкість їх руху є функція ефективної напруги зсуву, вона вище поблизу поверхні.

Ще один чинник істотно впливає на вихід дислокацій і утворення бар'єрного шару. Цей чинник - сама поверхня, місце стоку мікрodefektів. Завдяки цьому чиннику поблизу вільної поверхні густина дефектів мінімальна, але вона наростає у міру віддалення від вільної поверхні, що і є модельною схемою утворення градієнта густини дефектів на деякій глибині.

Фізичні чинники, діючі поблизу вільної поверхні і в тонкому шарі матеріалу пар, що труться, позначаються на розвитку всієї сукупності фізико-механічних процесів.

Обрив періодичності ґратки викликає зміни координаті поверхневих атомів і молекул, порядку їх розмі-

щення і міжатомних відстаней. Підвищена активність підсилює фізичні і хімічні явища, що проходять при контактах з іншими поверхнями і зовнішнім середовищем.

Особливо посилюються фізична адсорбція, дифузія, прискорюється утворення вторинних структур та ін.

Деформація тертям створює в поверхневому шарі запас надмірної енергії у вигляді порушення суцільності або однорідності матеріалу. Одночасно посилюються процеси релаксацій, обумовлені взаємодією електронів один з одним і з дефектами кристалічних ґраток. Посилюються всі види розсіяння енергії (механічної, теплової, фононне, електронне та ін.), а неупорядкований рух атомів, лінійних, точкових й інших дефектів замінюється рухом направленим. При цьому частинки або дефекти, що рухаються, прагнуть позбавити тіло від виниклої нерівноважності й надмірної вільної енергії.

Тертя інтенсифікує дифузійні потоки завдяки багаторазовому повторенню теплових і силових дій при взаємодії мікронерівностей, що створює нестационарні поля з великим градієнтом температур і тиску.

Дифузія і пластична деформація ініціюють фазові перетворення. Так, наприклад, різні автори експериментально встановили, що в поверхневому шарі деталей зі сталей, що труться, кількість вуглецю може зрости від декількох до 30 %. При цьому виникають специфічні структури - аустеніт і мартенсит тертя.

Так, наприклад, при схоплюванні (вибуховий характер процесу) фаза аустеніту зростає до 90%. На різних етапах притирання спостерігається також квазізворотний процес переходу $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ фаз. Характерно, що структурні й фазові переходи мають локальний характер і відбуваються в мікроскопічних об'ємах.

У той же час детально досліджена і взаємна дифузія матеріалів пар тертя, які взаємодіють з матеріалом

контрповерхонь, утворюють у поверхневих шарах тверді розчини зі своїм елементним складом, періодом кристалічних ґраток, густиною дефектів та ін.

3.3 Термодинамічна інтерпретація зношування

Найважливішою перевагою термодинамічного підходу до оцінки зношування є можливість аналізувати різномірні процеси з єдиної точки зору, що ним відкривається.

Деформація тертям проходить в умовах неоднорідності механічних напруг, температур, хімічного потенціалу, перенесення енергії, речовини та імпульсу - фундаментальних перетворень енергетичного типу.

Процес зношування в термодинамічному підході відносять до явища масоперенесення. Безпосередньою причиною масоперенесення є локальна зміна хімічного потенціалу речовини і середовища, а розвиток масоперенесення спирається на загальні термодинамічні закони, зокрема на принцип Ле-Шательє, згідно з яким будь-яка зовнішня дія, що виводить систему з рівноваги, ініціює в ній процеси, що прагнуть повернути систему в початковий стан.

Загальною ознакою перетворень у трибосистемах є їх необоротний характер, що виражається у виробництві ентропії.

Баланс енергії під час тертя з позицій термодинамічного аналізу можна представити у формі, що відображає перший і другий початки термодинаміки:

$$\rho T dS = \rho dU - \sigma_{ik} \cdot d \cdot \epsilon_{ik} - Y_j dZ_i A_{k a_k}, \quad (3.1)$$

де S і U - питоме значення ентропії і внутрішньої енергії матеріалу; ρ і T - густина і температура; σ_{ik} - тензор на-

пруг; ε_{ik} - тензор деформацій (пружних і пластичних); Y_i і Z_i - локальні значення хімічного потенціалу і концентрації компонент; A_k і a_k - узагальнені сили і координати.

$$\rho \frac{\partial^i s}{\partial t} = \left\{ \rho \frac{\partial^i s}{\partial t} \right\}_p - \frac{q}{T^2} \text{grad}(\varphi^{(e)} - \varphi) - \left\{ \rho \frac{\partial^i s}{\partial t} \right\}_d, \quad (3.2)$$

де $\left\{ \rho \frac{\partial^i s}{\partial t} \right\}_p$ - дисипація механічної енергії за рахунок в'язкості матеріалу; $\frac{q}{T^2} \text{grad}(\varphi^{(e)} - \varphi)$ - потік тепла, густина якого характеризує тензор теплопровідності ($\lambda_{ik} = \lambda_{ki}$).

З урахуванням теплопровідності $q_i = -\lambda_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}$ - потік речовини (масоперенесення) визначається за допомогою хімічних потенціалів ($\varphi_i - \varphi$), що дають значення надмірного локального хімічного потенціалу даного компонента.

Густина потоку речовини має вигляд

$$j = \gamma_{ik}^{(j)} \frac{\partial(\varphi_i - \varphi)}{\partial x_k} \quad (3.3)$$

Тут γ_{ik} - кінетичний коефіцієнт масоперенесення; $\gamma_{ik} \approx D_{ik}$, де D_{ik} - тензор самодифузії.

Щільність потоку тепла

$$q = -\lambda_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (3.4)$$

де $\lambda_{ik} = \lambda_{ki}$ - тензор теплопровідності.

З аналізу зносу на основі положень термодинаміки випливає, що перенесення речовини в термодинамічній системі вузлів тертя зумовлене щільністю потоку теплоутворення, дисипацією і хімічним потенціалом елементів систе-

ми. Механічна складова процесу руйнування в тій самій інтерпретації може бути розглянута за схемою, запропонованою А.А.Дубініним.

Пружне середовище, в якому поширюється механічна дія, сприймає її як поздовжні, поперечні і поверхневі хвилі, що викликані як падаючим, так і відбитим імпульсом.

Мірою енергії хвиль є об'ємна щільність кінетичної енергії середовища:

$$W_k = \frac{dW_n}{dV} = \frac{1}{2} \rho v_1^2, \quad (3.5)$$

а об'ємна густина потенційної енергії середовища

$$W_n = \frac{dW_n}{dV} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \cdot \varepsilon, \quad (3.6)$$

де dW_k ; і dW_n - кінетична і потенційна енергії малих об'ємів середовища; ρ - густина; v - фазова швидкість хвиль в середовищі; ε - відносна деформація. Об'ємна густина енергії впливаючих хвиль

$$W = W_k + W_n = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2 \varepsilon). \quad (3.7)$$

Оскільки об'ємна густина енергії хвиль залежить від координат і часу, швидкість перенесення енергії хвилею дорівнює швидкості переміщення в просторі при максимальній об'ємній густині енергії хвилі.

При оцінці зношування необхідно враховувати незворотний характер деформації тертям, для чого використовують характеристики термодинамічної ймовірності подій, що відбуваються.

І. Пригожин рекомендував для цього формулу вірогідності стану системи Ейнштейна

$$\omega \approx \exp \frac{s - s^*}{K}, \quad (3.8)$$

де S^* - значення ентропії в стані рівноваги, а K - константа Больцмана. При дії на систему утворюється дисипативний потік розсіяння J_s .

Якщо dS/dt - похідна ентропії, а τ - час релаксації, то

$$\frac{\partial^i S}{\partial t} \cong \frac{S - S^*}{\tau}, \quad (3.9)$$

Ймовірність незворотного процесу тим більша, чим менше густина потоку ентропії і час релаксації.

Дотримуючись такого підходу, В.Д.Федоров запропонував свою термодинамічну концепцію руйнування матеріалів при пластичній деформації і при зношуванні.

У його роботах руйнування опосередковане конкуренцією двох взаємозв'язаних, але протилежних тенденцій зростання густини пошкодження J_s і зниження (вивільнення) цієї енергії за рахунок релаксації.

З (3.8) і (3.9)

$$\omega \sim \exp \left(\frac{J_s \tau}{K} \right), \quad (3.10)$$

де J_s — дисипативний потік.

Приховану енергію пошкодження створюють флуктуації теплової енергії в полі механічних напруг. Досягши критичної густини прихованої енергії, відбувається руйнування, залежно від величини діючих напруг.

Використовуючи уявлення про запасену енергію пошкоджень, В.Д.Федоров представив знос як відношення швидкостей зміни основних компонентів енергії

$$J = \frac{U_v}{\Delta U_e - \Delta U_{Tf}} = \frac{\delta_e \omega}{\Delta U_e - \Delta U_{Tf}}; \quad (3.11)$$

$$\Delta U_* = U_* - U_0,$$

де U_e - швидкість зміни прихованої енергії в об'ємі матеріалу V ; ΔU_{Tf} - зміна густини теплової складової внутрішньої енергії; ΔU_* - зміна густини внутрішньої (прихованої) енергії; ω - питома потужність тертя; δ_e - відносна величина прихованої енергії.

Л.І.Бершадський розглядав руйнування матеріалу при зношуванні як перехід речовини у форму з більшою ентропією, тобто в менш впорядкований стан. Руйнування настає після досягнення деякої критичної величини накопиченої енергії (безладдя) і негоентропії (міри різноманітності).

Таке визначення вражає точною характеристикою фізичного критерію зносостійкості, або працездатності матеріалу як головного об'єкта трибосистеми.

4 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

Створення або вибір конструкційних матеріалів деталей вузлів тертя є базовою проблемою у прагненні до високих експлуатаційних характеристик і розглядаються трибоматеріалознавством - дизайном (англ. design – задум, проект) трибоматеріалів.

Основними завданнями трибодизайну матеріалів є відбір відомих і створення нових матеріалів, що володіють оптимальними для даного вузла тертя характеристиками.

ками, які забезпечують необхідний ресурс. При цьому, крім досягнення необхідних експлуатаційних властивостей, вимагається враховувати економічні міркування виходячи з ринкових умов. Тому трибодизайн матеріалів, як правило вирішує компромісні задачі, коли потрібне досягнення доцільного співвідношення між рівнем експлуатаційних характеристик і собівартістю.

У зв'язку з цим важливо, щоб матеріали вузлів тертя створювалися з доступних недефіцитних компонентів з використанням технологій, що не вимагають нестандартного устаткування, високого вакууму, криогенних температур та інших дорогих заходів.

Всі матеріали вузлів тертя можна розділити на дві групи: антифрикційні і фрикційні. Перші застосовуються під час створення рухомих з'єднань з низьким тертям і високою зносостійкістю: підшипників кочення і ковзання, шарнірних з'єднань, напрямних для повзунів, ексцентрикових і кулачкових механізмів і т.д. Другі застосовуються в гальмах, фрикційних передачах і муфтах. Вони повинні володіти не тільки високим і стабільним коефіцієнтом тертя, але і високою зносостійкістю.

При виборі матеріалів вузлів тертя повинна враховуватися їх сумісність, особливо можливість схоплювання і подальшого задиру, що пов'язане з хімічною спорідненістю, близькістю будови і значень параметрів кристалічних ґраток. У більш загальній формі під сумісністю розуміють здатність матеріалів забезпечувати оптимальні параметри вузла тертя при тривалій експлуатації, швидко пристосовуватися до різких змін навантаження, швидкості й температури за несприятливих умов змащування.

Процес притирання повинен закінчуватися утворенням на поверхнях тертя тонких шарів вторинних структур, що оберігають матеріал від схоплювання і задирав, а

також рівноважної шорсткості, необхідної для забезпечення стабільного значення коефіцієнта тертя.

У цій галузі наукою ще не цілком розкриті механізми самоорганізації в зоні контакту і шляхи впливу на здатність пар тертя до самоорганізації, коли система сама формує оптимальну мікрогеометрію поверхонь, захисні плівки, перебудовує структуру поверхневих шарів матеріалу, міняє твердість з метою збереження нормального функціонування. В даний час застосовують прямі і непрямі методи оцінки сумісності матеріалів вузлів тертя. В обох випадках спочатку перевіряється, чи не володіють матеріали хімічною спорідненістю - сумісністю кристалічних ґраток. При прямих методах проводяться випробування матеріалу на машинах тертя з метою визначення критичних значень параметрів режиму навантаження, що призводять до задирання, тобто знаходження меж застосовності досліджуваної пари. Непрямі методи засновані на визначенні параметрів мікрогеометрії, мікроструктури поверхневих шарів, фізико-механічних властивостей, їх зміни в процесі тертя з метою прогнозування сумісності. Остаточну ж відповідь на питання про сумісність матеріалів можуть дати лише ресурсні повні випробування.

4.1 Металеві антифрикційні матеріали

Антифрикційні матеріали використовуються переважно у відповідальних вузлах, підшипниках, шарнірах, напрямних ковзання і кочення, розподільних валах, клапанних і кулачкових механізмах тощо.

Цапфи підшипників ковзання, як правило, виготовляють зі сталей і чавунів.

З числа легованих найбільш часто застосовують сталі: марганцевисті (35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2 та ін.), хромо-молібденові (30ХМ, 3ХМА, 35ХМ, 38ХМ), хромонікелеві

(40ХН, 45ХН, 30ХН3А), хромонікелеві з бором (30ХНР, 40ХНР) і хромомарганцевистонікелеві з бором - 40 ХГНР. Деталі піддають або об'ємному гартування з відпуском, або поверхневому гарту струмами високої частоти (СВЧ).

Для підшипників ковзання (вкладишів, втулок шарнірів та ін.) використовуються різні антифрикційні сплави. До них відносять сплави на мідній, цинковій, алюмінієвій і олов'яно-свинцевій основах. Останні одержали назву бабітів. Зрідка застосовують антифрикційні чавуни з графітними домішками.

Бабіти і чавуни застосовувалися на початковому етапі розвитку техніки і мають лише історичне значення. У міру зростання потужності двигунів, посилення режиму експлуатації, зниження металомісткості відбувся перехід до більш твердих підшипникових матеріалів на мідній, цинковій і алюмінієвій основах, добре сумісних зі сталями.

Мідні антифрикційні матеріали розділяють на бронзу і латунь. Бронза - це сплави міді з оловом та іншими елементами. У них цинк і нікель не є головними легуючими компонентами. Найбільш поширена олов'яниста бронза. Неосновними легуючими елементами є свинець, нікель, фосфор, цинк, залізо та ін.

Меншого поширення, ніж бронза, набула латунь. Найбільш часто як антифрикційні матеріали використовують крем'янисту і марганцевисту латунь, а також алюмінієво-залістисту.

Як підшипникові матеріали успішно застосовуються цинкові сплави з легуючими елементами у вигляді міді, алюмінію, магнію. З них роблять біметалеві вкладиші підшипників ковзання. У сталевий стакан заливається цинковий сплав, який рівним шаром покриває внутрішню поверхню. Іншим способом виготовлення вкладишів є штампування їх з біметалевої смуги, що складається зі

сталі і цинкового сплаву й одержуваної методом гарячого плющення. Такі вкладиші використовують у деяких видах тракторних двигунів.

У сучасному машинобудуванні широкого поширення набули антифрикційні сплави на основі алюмінію. Алюмінієві сплави володіють порівняно високою міцністю, корозійною стійкістю, дешеві й недефіцитні, мають низьку густину і високу теплопровідність. Як легуючі елементи використовують олово, мідь, нікель, кадмій, кремній, залізо, марганець, титан та інші елементи. Найбільш поширені алюмінієво-олов'яні сплави із вмістом олова до 22,5%. При вмісті олова більше 9% можливе використання вкладиша без покриття м'яким металом. В інших випадках на робочу поверхню наноситься захисний шар олова. Найбільшого поширення набув сплав А020-1 (1%-Са, 20% -Sn, 0,02 - 0,1 Ті, інше - Al). Біметалеві вкладиші виготовляються шляхом сумісного плющення з подальшим штампуванням. При порушенні режиму гідродинамічного змазування і виникненні металевих контактів як на поверхні вкладиша, так і цапфи утворюється захисна плівка м'якої фази – олова, усередині якої і локалізуються деформації зсуву.

4.2 Антифрикційні матеріали з порошків і пластмас

Одним із напрямів одержання антифрикційних матеріалів є створення порошкових антифрикційних композитів. Вироби (втулки, вкладиші підшипників) одержують методом порошкової металургії. Спочатку створюється суміш із порошків необхідних речовин, яка після ретельного перемішування пресується у вигляді виробу і спікається. Якщо це необхідно, то здійснюється механічна об-

робка виробу і насичення шпарин мастилом. Найбільш поширені матеріали на основі міді та заліза.

Матеріали на основі міді одержали широке використання через хороші антифрикційні властивості й високу електропровідність, наприклад, у ковзаючих електроконтактах у щіткоколекторних вузлах електродвигунів та генераторів і т.д. Типовим представником цієї групи є мідно-графітні компоненти із змістом графіту до 75%. Для поліпшення властивостей електрощіткових матеріалів до них додають олово, цинк, свинець. Графіт забезпечує змащування контакту й електропровідність.

Як підшипниковий матеріал також використовують пористі олов'яні бронзи. Вони застосовуються в підшипниках, що працюють у легкому режимі при невеликих швидкостях ковзання (менше 1,5 м/с) і номінальному тиску (0,5 - 1 МПа). Завдяки мастилу, що міститься в порах, вони можуть працювати без наповнення маслом до 5000 год при температурі від - 60°C до 120°C з коефіцієнтом тертя 0,01 - 0,04. Ці підшипники використовуються в малопотужних електродвигунах і генераторах, пускових установках ДВЗ.

У підшипниках мотоциклів, тракторів, насосів та ін. використовуються бронзо-графітні матеріали. Вони витримують більші навантаження і швидкості ковзання, ніж бронза.

У двигунах вантажних автомобілів, суднових і залізничних дизелях, компресорах і насосах в СНД і провідних країнах зарубіжжя використовується свинцева бронза. Як правило, сталева стрічка спочатку покривається електролітичним шаром міді, на яку наноситься порошок свинцевої бронзи. Порошок припікається до стрічки в конвеєрній печі. Після припікання проводиться обжимання стрічки методом плющення. Із стрічки штамнують заготовки вкладишів, які потім механічно обробляються.

На заключній стадії електролітичним способом наноситься шар м'якого металу (свинцю, олова, міді, індію).

Аналогічним способом одержують і використовують спечену латунь, складнолеговану бронзу. Крім графіту, як самозмащувальні добавки використовують дихалькогеніди металів: дисульфіді, диселеніди, дителлуриди та ін.

Останнім часом в СНД і за кордоном використовуються металофторопластові матеріали. Вони володіють широким діапазоном експлуатаційних властивостей, здатні працювати без змащення в агресивних середовищах, у вакуумі, при температурі від - 200°C до 300°C. Підшипникові вкладиші складаються зі сталеві основи, тонкого припеченого шару високоолов'янистої бронзи (до 0,3мм), шпарини якого заповнені сумішшю фторопласту з дисульфідом молібдену.

Крім сплавів на мідній основі, все більше поширюються антифрикційні алюмінієві сплави. Технологія виготовлення вкладишів така сама, як при виготовленні мідних сплавів. Пори просочуються маслом. Використовуються твердомасильні добавки. В США в підшипниках автомобільних двигунів застосовуються вкладиші із сталеві стрічки з припеченим порошком свинцево-олов'яного сплаву. Технологія та сама, що при виготовленні вкладишів зі свинцевої бронзи.

Найбільш поширені в загальному машинобудуванні матеріали на основі заліза. В шихту, так, як і до мідних сплавів, вводяться графіт, сірчистий цинк, дисульфід молібдену, нітрид бору. Пори спресованого матеріалу заповнюються маслом. Частіше за все застосовуються залізо-графітові втулки. Зі зростанням вмісту графіту поліпшуються антифрикційні властивості, проте падає міцність. Вміст графіту, як правило, не перевищує 10% від загальної маси. Як легуючі елементи до заліза додають мідь,

сірку, фосфор. Мідь підвищує міцність і покращує спікання. Її вміст коливається від 0,5 до 20%.

Використання залізографітових підшипників дозволяє економити велику кількість сплавів кольорових металів, бронзи, бабіту. У ряді випадків залізографітові підшипники ковзання можуть успішно замінити шарикові і роликові підшипники кочення. Наявність графіту й запас рідкого мастила в порах додають металокерамічним підшипникам властивості самозмащування, що зменшує небезпеку виходу з ладу вузлів тертя через недостатнє змащення.

На даний час вирішена задача виготовлення металокерамічних поршневих кілець для двигунів внутрішнього згорання. Такі поршневі кільця мають більш високу зносостійкість в порівнянні із звичайними чавунними. Вони працюють до виходу з ладу на 30-45 тис. км пробігу автомашин більше, ніж чавунні, і на 30% менше зношують циліндри двигуна.

Розширюється також вживання пористих спечених підшипників, просочених фторопластом. Такі підшипники досить перспективні для незмащуваних опор ковзання завдяки високим антифрикційним властивостям фторопласту. Коефіцієнт тертя підшипників, просочених фторопластом, без мастила становить приблизно 0,05. Вони надійно працюють при температурах до 280°C в кислих і лужних середовищах.

Розроблені антифрикційні спечені матеріали для підшипників газових і парових турбін, що працюють при високих температурах. Для одержання цих деталей використовують порошки хромонікелевих сталей типу Х18Н15,Х3Н18 з добавками в шихту дисульфиду молібдену. Спечені матеріали мають густину, що перевищує 90%. Більш низька вартість пористих спечених підшипникових матеріалів у порівнянні з бронзою і бабітом

стимулює подальший розвиток цього напрямку розроблення триботехнічних матеріалів і технологій.

4.3 Фрикційні матеріали

На відміну від антифрикційних фрикційні матеріали повинні володіти високим і стабільним коефіцієнтом тертя, достатньою зносостійкістю, міцністю, стійкістю до температурних змін, дії абразиву та агресивних середовищ. Зокрема, матеріали гальм і фрикційних муфт повинні забезпечувати плавне спрацьовування системи без автофрикційних коливань, що виявляються у формі скрипу при гальмуванні або пробуксовуванні, і забезпечувати високий термін служби. При гальмуванні вся кінетична енергія транспортного засобу в гальмах розсіюється в тепло. Тому у момент гальмування температура поверхонь, що труться, наприклад у гальмі літаків, досягає 1200°C, а в об'ємі гальмівної накладки – до 600°C. У гальмах автомобілів ці температури відповідно можуть досягати 400°C і 200°C.

Для виготовлення ряду елементів самих навантажених фрикційних пристроїв - гальм і муфт зчеплення - застосовуються матеріали, що одержують методом порошкової металургії. Найбільшого поширення набули матеріали на основі заліза і міді.

Спечені матеріали на основі міді також широко використовуються у важких транспортних засобах. Порошкова технологія дозволяє одержувати фрикційні матеріали із заданими властивостями. Для автомобілів малої та середньої вантажопідйомності і для сільськогосподарських і промислових тракторів малої і середньої потужності, як правило, використовуються фрикційні матеріали на полімерній основі. Вони застосовуються також у сільсько-

господарському і дорожньо-будівельному машинобудуванні, в буровій техніці і т.д.

Як правило, до складу матеріалів уходять 3 компоненти:

- теплостійкий армований матеріал з міцними волокнами, наприклад азбест (15-16%);

- теплостійкі з високим і стабільним коефіцієнтом тертя порошкоподібні наповнювачі неорганічного походження (20-60%);

- полімерне зв'язуюче: натуральні й синтетичні каучуки, синтетичні смоли (15-30%) з агентами вулканізації, прискорювачами та активаторами вулканізації.

Фрикційні муфти і гальма є досить відповідальними вузлами, оскільки визначають безпеку експлуатації транспортних засобів, тому під час розроблення проводиться дуже точний і детальний розрахунок. Виготовляються дослідні зразки, які проходять спочатку лабораторні, потім стендові й натурні випробування. Особливо ретельно відпрацьовуються нові гальмівні матеріали, що піддаються тривалим випробуванням за спеціальними методиками.

За способом виготовлення фрикційні матеріали на полімерній основі поділяються на 4 групи: формовані (пресовані) матеріали (колодки, накладки, сектори, пластини, вкладиші); вальцьовані (стрічки і накладки); тканинні (стрічки, накладки); картонно-латексні (накладки). Номенклатура і характеристики фрикційних та антифрикційних матеріалів дуже широка і міститься в довідковій літературі.

4.4 Полімерні матеріали

Ці матеріали широко застосовуються у вузлах тертя сучасних машин і механізмів. Використання пластмас до-

зволяє збільшити надійність і ресурс машин, поліпшити їх експлуатаційні, техніко-економічні характеристики й технологічність, відмовитися від дефіцитних сплавів кольорових металів і понизити вартість машин.

Пластмаси підрозділяються на термопластичні й термореактивні. До термопластичних відносять пластмаси з лінійною або розгалуженою структурою полімерів, властивості яких зворотно змінюються при багатократному нагріванні й охолодженні. До термореактивних пластмас належать полімери, в яких при термічній дії виникають реакції хімічного скріплення ланцюгових молекул одна з одною з утворенням сітчастої будови. Такі пластмаси не можуть переходити в пластичний стан при підвищенні температури без порушення просторових зв'язків у структурі полімеру.

Полімери (термопластичні й термореактивні) можуть використовуватися як антифрикційні матеріали як у чистому вигляді, так і у вигляді композиційних матеріалів з різними наповнювачами. З полімерних матеріалів виготовляють зубчаті колеса, шківні елементи підшипників ковзання, що труться, кулачкових механізмів, напрямних, ущільнень, сепаратори шарикопідшипників, втулки шарнірів і т.д.

Антифрикційні матеріали на основі термопластів відрізняють висока технологічність, низька собівартість, хороші демпфуючі властивості. Деталі з термопластів виготовляють високопродуктивними методами - литвом під тиском і екструзією; великогабаритні деталі - відцентровим литвом, ротаційним формуванням, аніонною полімеризацією мономеру безпосередньо у формі, нанесенням антифрикційних покриттів з розплавів, порошків, дисперсій.

Термореактивні полімери обробляються переважно методами компресійного і ливарного пресування, вони

більш міцні і термостійкі. Порошкоподібні термоактивні композиції наносять на поверхні деталей, що труться, у вигляді тонких покриттів.

Як антифрикційні термопластичні матеріали найбільш широко використовують *аліфатичні поліаміди* (капрон, П68, П6, П12 та ін.), що володіють низьким коефіцієнтом тертя і високою зносостійкістю і працюють при температурі від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$. До недоліків поліамідів потрібно віднести їх високе водо- і маслопоглинання. Деталям з поліамідів властиві хороша стійкість до дії циклічних навантажень, можливість роботи без мастила в парі із загартованою сталлю. Коефіцієнт тертя поліамідів по сталі без мастила 0,1-0,2, зі змащенням мастилом - у межах 0,05-0,10.

Для підвищення механічних властивостей поліаміди армують волоконними та іншими матеріалами, а для поліпшення антифрикційних властивостей у них вводять різні твердомасильні графітоподібні компоненти.

Це графіт, дисульфід молібдену, тальк, термоантрацит, а як армований наповнювач - дрібнорубане скловолокно або подрібнене вуглецеве волокно.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення і водопоглинання наповнених поліамідів у 1,5-4 рази менший, коефіцієнт тертя без змащування в 1,2-2 рази більший, а інтенсивність зношування в 2-5 разів нижча, ніж у ненаповнених поліамідів. Поліаміди застосовують також як тонкошарові покриття металевих деталей.

У приладо- і машинобудуванні для виготовлення деталей, вузлів тертя широко застосовують *фторопласти* і *композиційні матеріали* на основі фторопластів. Фторопласти відрізняються високою хімічною стійкістю, високою температуростійкістю (до 300°C), а також зберігають працездатність, не кришачись при охолодженні до -250°C .

На фторопласти практично не діють кислоти, окислювачі, луги, розчинники. При температурі вище 350°C фторопласти реагують з деякими металами та оксидами. Коефіцієнт тертя фторопластів, особливо фторопласта-4 (0,03-0,05), знаходиться на рівні значень коефіцієнта тертя металевих пар у гідродинамічному режимі ковзання.

Використання фторопластів у чистому вигляді без наповнювачів досить обмежене внаслідок низької міцності та зносостійкості. У машинобудуванні використовуються в основному композиційні матеріали. Введення різних наповнювачів (кокс, графіт, дисульфід молібдену, металеві порошки, скловолокно, вуглецеве волокно) кількістю 15-45% за масою дозволяє значно підвищити міцність і зносостійкість (в 10-1000 разів і більше). Використання фторопластів у вигляді лаків, паст, суспензій для виготовлення антифрикційних наповнювачів для різних композиційних матеріалів на основі термопластичних і термореактивних полімерів значно знижує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування багатьох вузлів тертя.

Ароматичні поліаміди застосовуються для виготовлення деталей вузлів тертя як у чистому вигляді, так і у вигляді композиційних матеріалів, наповнених фторопластом, графітом, дисульфідом молібдену й іншими твердими змащувальними матеріалами. Деталі з ароматичних поліамідів відрізняються високою міцністю і теплостійкістю, їх виготовляють методами компресійного і ливарного пресування. Ароматичний поліамід фенілон, що випускається промисловістю, стійкий проти багатьох хімічних речовин, масел, бензину. Деталі з фенілону можна експлуатувати при температурах від -50 до +200°C. Наповнення фенілону твердими змащувальними матеріалами значно покращує його триботехнічні властивості.

Фенілон використовують для виготовлення підшипників ковзання, підп'ятників, ущільнень, зубчатих коліс,

сепараторів шарикопідшипників, деталей клапанів, кулачків і т.д.

Полікарбонат застосовують у машино- і приладобудуванні, у радіо- й електротехнічній промисловості, для виготовлення деталей точних верстатів, приладів, обчислювальних машин і т.д. Полікарбонат стійкий до атмосферних впливів, води, водних розчинів мінеральних кислот і солей, окислювачів, масел, у той же час він розчиняється у ряді вуглеводнів (ацетон, толуол та ін.), набухає в бензині.

Полікарбонат придатний для роботи в умовах низьких і наднизьких температур, у середовищі газоподібного і рідкого азоту, водню і гелію при температурі до -253°C . Він володіє високою ударною міцністю і стабільністю розмірів деталей, малою повзучістю, проте погано чинить опір циклічним діям навантаження і має низьку втомну міцність.

Промисловість випускає полікарбонат - дифлон, наповнений 25% за масою скловолокном (дифлон СТН) і наповнений фторопластом (дифлон ДАК 8).

Освоєно виробництво антифрикційного полікарбонату, що являє собою дифлон, модифікований фторопластом - 4. У цього матеріалу зберігаються високі фізико-механічні й діелектричні властивості полікарбонату і одночасно в 1,5-2 рази поліпшуються антифрикційні властивості. Полікарбонат переробляють литвом під тиском та екструзією і застосовують у незмащуваних вузлах тертя, наприклад у криогенній і мікрокриогенній техніці.

Ширшає використання *поліолефінів* (поліетилен високого тиску, поліпропілен) як антифрикційних матеріалів як у чистому вигляді, так і в композиціях з наповнювачами. Поліолефіни стійкі до дії більшості кислот, лугів, не розчиняються в органічних розчинниках при 20°C . Проте сильні окислювачі (азотна кислота та ін.), хлор,

фтор руйнують їх, і при підвищених температурах вони розчиняються в багатьох органічних розчинниках.

На основі поліолефінів створюють композиційні матеріали, вводячи різні наповнювачі (сажу, каучук, скловолокно, деревна тирса і т.д.), що дозволяє одержувати матеріали, які володіють високою зносостійкістю і коефіцієнтом тертя 0,1-0,15. До недоліків властивостей поліолефінів потрібно віднести низьку теплоємність, оскільки деталі вузлів тертя можуть тривало експлуатуватися при температурі не вище 60°C (короткочасно до 80°C). Це знижує можливість використання поліолефінів у машинобудуванні.

Поліарилати - термопластичні полімери, переробляються литвом під тиском або литвом пресуванням. Деталі вузлів тертя з поліарилату можуть працювати тривало при температурі 160-180°C, короткочасно - при температурі 230°C. Поряд з високою теплостійкістю поліарилат володіє високим опором іонізуючому випромінюванню, хорошими діелектричними властивостями, достатньою хімічною стійкістю, морозостійкістю (можуть працювати при температурі до -100°C). Для поліпшення антифрикційних властивостей поліарилати наповнюють твердими змащувальними матеріалами. Згадані властивості поліарилатів показують, що це досить перспективний матеріал для деталей вузлів тертя, особливо для незмащуваних.

Іншим перспективним матеріалом є *поліаміди*. Це теплостійкі термореактивні полімери, що застосовуються як зв'язуюче при виготовленні композиційних антифрикційних матеріалів. На основі поліамідів випускають композити, наповнені дисульфідом молібдену і графітом. Останніми роками розроблені матеріали, наповнені вуглецевим волокном. Ці матеріали володіють високою радіаційною і хімічною стійкістю, прекрасними триботех-

нічними властивостями і можуть тривало експлуатуватися при температурі 220-260°C. Вироби з таких матеріалів одержують в основному пресуванням з подальшим спіканням.

Високою хімічною стійкістю і малим водопоглинанням володіє полімер *пентапласт*. Його застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя підвищеної точності (шестерень, манжет ущільнювачів, кілець ущільнювачів і т.д.). Деталі з пентапласта можна тривало експлуатувати при температурі 120-130°C, короткочасно - при 135-150°C. Пентапласт переробляють всіма методами на устаткуванні, використовуюваному для термопластів. Коефіцієнт тертя при тиску 5 МПа (температура 20°C) для пари тертя пентапласт-пентапласт становить 0,13-0,15; для пари пентапласт-загартована сталь - 0,11-0,13. Для підвищення механічних властивостей у пентапласт вводять мінеральні наповнювачі: графіт, смоли, скловолокно, окисел хрому та ін.

Поліформальдегідні смоли - термореактивні полімерні матеріали, вживані для виготовлення деталей вузлів тертя в машинобудуванні (шестерні, втулки, муфти зчеплення, підшипники, сепаратори та ін.). Ці матеріали володіють високою стійкістю щодо органічних розчинників, дії гарячої води, розчинів солей, морської води, лугів, розчинів органічних кислот. Виробам з поліформальдегідів властиві висока шорсткість, стабільність розмірів, висока зносостійкість, стійкість до старіння; їх можна експлуатувати при температурі до 120°C. Коефіцієнт тертя чистого поліформальдегіду по сталі без змащування - 0,30-0,35. Для підвищення зносостійкості і поліпшення антифрикційних властивостей поліформальдегід наповнюють скловолокном, фторопластом, дисульфідом молібдену, вуглецевим волокном, коксом, сажею, графітом. Введення в сополімер поліформальдегіду 15-20% фторопласту

знижує коефіцієнт тертя в 1,5-2 рази, інтенсивність зношування - в 3-4 рази.

Епоксидні полімери широко застосовують під час виготовлення деталей вузлів тертя. Вони володіють хорошою адгезією до металів та інших матеріалів, високою механічною міцністю, малими усадкою і водопоглинанням, вібро- і лугостійкістю, хорошими електроізоляційними властивостями. Як наповнювачі використовують графіт, кокс, дисульфід молібдену, нітрид бору, оксиди металів, різні волокнисті матеріали. Введення в епоксидні смоли фуранових олігомерів і спеціальних добавок збільшує твердість, навантажувальну здатність і зносостійкість.

Композиційні матеріали на основі епоксидних смол застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя, що працюють в агресивних середовищах і в вакуумі при температурах від -100°C до 200°C , у воді, гасі та інших середовищах. Ще одним класом трибopolімерів є полімерні самозмащувальні матеріали. Для підвищення антифрикційних властивостей полііміди армують і наповнюють твердими змащувальними матеріалами.

5 ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

До основних завдань трибодизайну та технології конструкційних матеріалів входять одержання матеріалів та заготовок із заданими властивостями, обробка заготовок для одержання деталей із певною точністю, зміцнення робочих поверхонь деталей різними методами.

Існуючі технологічні методи забезпечення зносостійкості поверхонь матеріалу деталей вузлів тертя підрозділяють на декілька груп: хіміко-термічні, об'ємний і пове-

рхневий гарт, електрохімічні, хімічна обробка, механотермічні, наплавлення зносостійких шарів, напилення порошкових покриттів, іонноплазмова обробка, плакірування, механічне зміцнення та ін. Застосування цих методів значною мірою пов'язане з історією розвитку машинобудування в розвинених країнах. Сам розвиток цих методів був викликаний прагненням підвищити експлуатаційні якості матеріалів машин і механізмів.

5.1 Вибір технологічного процесу

Одержання якісного матеріалу залежить від методів обробки, режимів різання, стабільності структури матеріалу.

Наприклад, матеріал (сірий чавун) під час виготовлення поршневих кілець для зняття внутрішніх напруг піддають низькотемпературному відпалу. Заготовку завантажують у холодну або нагріту не вище 200°C піч, відпал проводять при температурі 550-600°C, витримують 2 год при швидкості нагрівання 100°C/год. Є рекомендації проводити витримку від 1 до 8 год залежно від розмірів та конфігурації заготовки. При тривалій витримці чавуну в умовах відносно високих температур відбувається часткова коагуляція цементиту в перліті, можлива його міграція до межі зерен, спостерігається перехід від пластинчастого перліту до зернистого. Особливо це характерно для тонкостінних відливок. Зазначені дефекти окремо або у взаємодії знижують зносостійкість чавуну.

Послідовність операцій та режимів обробки деталей безпосередньо впливає на їх зносостійкість. Так, валки холодної прокатки можуть оброблятися за двома схемами технологічної послідовності:

1) обточування (R_z), загартовування бочки з індукційним нагріванням, грубе шліфування, чисте шліфування, доводка не нижче R_a ;

2) аналогічний процес, однак перед загартовуванням є додаткова операція - шліфування.

За другим варіантом поверхня бочки валка має більш однорідну структуру, що сприяє підвищенню втомної контактної витривалості.

5.2 Формування оптимальної топографії поверхні

Для кожного вузла тертя і певних режимів його експлуатації характерна своя оптимальна топографія поверхонь, при якій спостерігається мінімальна інтенсивність зношування. Незалежно від режиму мащення у процесі припрацювання вихідна шорсткість переходить в експлуатаційну. Що ближчою є вихідна мікрогеометрія до рівноважної, то менший період припрацювання.

Вплив вихідної чистоти поверхні на інтенсивність зношування обмежується стадією припрацювання.

Занадто гладкі поверхні (вище на два класи чистоти) чи занадто грубі щодо оптимальної шорсткості негативно впливають на зносостійкість. Поверхні низьких класів шорсткості контактують по відносно невеликій кількості ділянок дотику з незначною загальною площею при високих середніх контактних навантаженнях. У зв'язку з видаленням значних нерівностей у процесі припрацювання при формуванні фактичної площі дотику початковий знос збільшується. При цьому не виключено утворення великих часток зносу, які можуть призвести до задирів. Поверхні високих класів шорсткості у меншій кількості адсорбують мастильний матеріал. З іншого боку, внаслідок великої фактичної площі дотику швидкість зношування низька і може бути недостатньою для такого спрацювання спряжених поверхонь, яке необхідне для попередження критичної концентрації навантаження в період припрацювання. В результаті може відбутися заїдання навіть після тривалої роботи.

Для деталей вузлів тертя, що експлуатуються у режимі «пуск - зупинка», при низьких швидкостях ковзання, в умовах реверсивного тертя важливо забезпечити безперервний доступ мастильного матеріалу в зону контакту. Тому розроблена ціла низка технологічних заходів щодо створення "карманів" для мастильного матеріалу. Так, при хонінгуванні втулок за допомогою крупнозернистого абразивного інструмента виконується швидкісна операція зі створення сітки канавок, яка виконує роль "резерву мастильного матеріалу".

Створення "карманів" забезпечується також при обкочуванні деталей роликками, шариками, алмазним інструментом. При цьому відбувається і зміцнення поверхневого шару пластичним деформуванням. Внаслідок обкатки на 20—40% підвищується твердість поверхні, а зносостійкість може підвищуватись у середньому втричі.

5.3 Обробка деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД)

Різноманітність конструктивних особливостей інструменту для пластичного деформування дозволяє у широких межах досягти різної варіації якості поверхні (табл. 5.1). В основному при всіх видах обробки тиском зносостійкість деталей підвищується. Цьому сприяють підвищення твердості поверхневих шарів та створення особливої форми нерівностей на поверхні.

Алмазне вигладжування застосовують для обробки сталі, кольорових металів та сплавів. Ураховуючи ламкість алмазу, не можна обробляти переривисті поверхні.

Обкатування та розкатування поверхні застосовують при обробці циліндричних поверхонь, канавок, галтелей.

Калібрування (дорнування) проводять із малими чи великими натягами. У першому випадку зона пластичної деформації не поширюється на всю товщину деталі. Така обробка

підвищує клас шорсткості поверхні, зменшує похибки форми. Тонкостінні гладкі циліндри та втулки калібрують із великими натягами, при цьому зона пластичної деформації охоплює всю деталь.

Вібронакочуванням можливо одержати п'ять видів рельєфу. У вібронакачених поверхнях одержують більші радіуси закруглення вершин нерівностей, однакову висоту поздовжньої та поперечної шорсткості, що забезпечує більшу величину опорної поверхні.

Таблиця 5.1 - Способи обробки поверхонь поверхневим пластичним деформуванням

Спосіб обробки	Деталі, які обробляються (розмір у мм)	Досягнуті значення при обробці		
		клас шорсткості	ступінь наклепу, %	глибина наклепу, мкм
Вигладжування алмазним конусом	Осі, вали $5 < d < 50$ l - не обмежено	11-12	20-25	1000
Обкочування багатшаровим обкатником пружної дії	Осі, вали $d > 8$ l - не обмежено	8-11	20-50	5000
Ударна обробка шариковими головками інерційної дії	Осі, вали $d > 10$ l - не обмежено	8-10	15-30	500

Електромеханічний спосіб зміцнення застосовують для сталевих та чавунних деталей. Твердість окремих марок сталей підвищується у 4 - 5 разів при глибині її поширення до 0,2 - 0,3 мм. Найбільше згладжування шорсткості спостерігається

при швидкості обробки 10 - 15 м/хв, зусиллі ролика 20 - 75 кгс, кількості проходів - 3. Зносостійкість нормалізованих сталей після електромеханічного способу зміцнення підвищується в 4 - 10 разів порівняно із зносостійкістю після полірування або шліфування. Зносостійкість загартованої сталі ШХ15 може бути підвищена удвічі.

5.4 Нанесення захисного покриття

Одним із найбільш перспективних напрямків підвищення зносостійкості є нанесення захисного покриття на поверхню деталей. Для цього використовують матеріали, які характеризуються високою адгезійною схильністю до матеріалу деталі, низьким опором зсуву та здатністю витримувати без руйнування багатократні деформації. В першу чергу до них відносять м'які метали (мідь, олово, свинець і т.д.), тверді змащувальні матеріали (графіт, диселеніди і дисульфід металів) та композити на основі полімерів. Особливої уваги заслуговують покриття, які являють собою пористий каркас, наприклад, з міді, пори якого заповнюються сухою змащувальною речовиною. Ці покриття забезпечують реалізацію правила позитивного градієнта механічних властивостей по глибині під час тертя.

Для нанесення захисного покриття використовують похідні фторовмісних сполук. Вони утворюють на поверхні металу хемосорбційні шари та сприяють утриманню мастильного матеріалу на поверхнях контактуючих пар. Застосування такого покриття найбільш ефективне при граничному режимі мащення, інтенсивність зношування знижується при цьому на порядок.

Для важконавантажених вузлів тертя використовують деталі, на поверхнях яких сформована плівка з твердих матеріалів типу нітриду титану, оксиду алюмінію, кераміки, карбідів та боридів. У цьому класі покриттів перспективне застосу-

вання матеріалів на основі металів або полімерів, що вміщують ультраалмази (синтетичні алмази розміром 4 - 8 мм). Покриття на основі ультраалмазів забезпечують підвищення зносостійкості контактних поверхонь у 3 - 10 разів. Твердість гальванічного покриття з ультраалмазами досягає 10000-14000 МПа.

5.5 Опромінення потоками енергії високої густини

Для підвищення зносостійкості деталей використовують лазерне легування тонких поверхневих шарів металів і сплавів, локальне поверхневе загартування сталей, лазерне зміцнення титанових сплавів шляхом оксидування їх поверхневого шару. До цієї групи відносять іонне бомбардування, обробку електронним променем, радіаційне опромінення, іонну імплантацію.

Лазерна обробка - це одержання на окремих ділянках поверхні деталей зміцнених шарів із високою мікротвердістю. Для лазерного способу введення енергії в речовину характерні точкова локалізація, дозованість та стерильність.

Іонна імплантація - метод нанесення покриття за рахунок бомбардування поверхні матеріалу іонами з енергією вище 10^4 еВ.

Таке бомбардування зумовлює зміни структури або хімічного складу поверхневого шару.

5.6 Хіміко-термічна обробка (ХТО)

Метою ХТО є створення на сталевій поверхні тонкого легованого шару за рахунок дифузії ззовні легуючих елементів. Потім поверхня піддається гарту. Поверхневий шар набуває високої твердості (до 60 і більш одиниць за шкалою Роквелла). Сюди відносять цементування, азотизацію, борування, насичення хромом, нікелем, ціанування (насичення одночасне азотом і вуглецем), боро-

хромування (одночасне насичення бором і хромом), карбоборування (одночасне насичення вуглецем і бором) та ін.

Товщина зміцненого шару може перевищувати 2 мм. Хіміко-термічна обробка набула найбільшого поширення як метод зміцнення поверхонь через простоту, доступність і високу ефективність. Так, наприклад, цементація здійснюється в твердому, рідкому і газоподібному карбюраторах. Як твердий карбюратор використовується деревне вугілля. Процес проходить поволі: швидкість науглецювання 0,1 мм/год. Проте, якщо підвищити температуру до 950-980°C, процес істотно прискорюється. Як газовий карбюратор використовуються вуглеводні, а рідкий - розплави солей, що містять вуглець. Найбільш ефективна газова цементація з нагрівом деталі струмами високої частоти.

Азотизації піддаються сталеві деталі при більш низькій, ніж при цементуванні, температурі: 520-560°C. Легуючі елементи, що входять до складу сталі (Cr, Mo, V, Al), утворюють з азотом стійкі нітриди. Найбільшу твердість додає алюміній, проте поверхневий шар набуває підвищеної крихкості і спостерігається спотворення форми виробу. Азотизація додає деталям високої циклічної міцності і відповідно стійкості проти втомного зношування. Тому азотизації піддають колінвали, циліндри, поршневі кільця, сідла клапанів, зуби шестерень. Ресурс шийок азотованих колінвалів перевищує амортизаційний термін двигуна. Окрім зносостійкості, азотизація додає деталям і високої корозійної стійкості. Зносостійкість зберігається при нагріві до 500-600°C тоді як при нагріві цементованої поверхні вище 225-275°C, твердість її, а отже і зносостійкість, знижуються. Недоліками методу є збільшення деталей в розмірі й викривлення. Тому азотовані елементи

деталей піддають остаточній обробці у вигляді полірування або шліфування.

Ціанування (нітроцементация) відбувається в рідких (розплави солей) і газових азотно-вуглецевих середовищах. Низькотемпературне ціанування здійснюється при температурі 530-650°C, має невелику швидкість і застосовується для високолегованих інструментальних високовуглецевих сталей і легованих сталей із вмістом вуглецю до 0,4%. Обробці піддаються відповідальні різьбові з'єднання, втулки, зубчаті колеса, вилки механізму коробки зміни передач, ролики, кулачкові пари. Найгнучкішим процесом є газове ціанування. Воно піддається автоматизації і дозволяє управляти вмістом С і N окремо. Перевага ціанування перед цементуванням і азотизацією - велика швидкість процесу і більш високий зміцнювальний ефект.

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

5.7 Поверхнєве гартування

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

Найпоширенішим і ефективним є високочастотний метод нагріву. До генератора високої частоти під'єднується охолоджувальна котушка з декількох витків. Усередині котушки виникає високочастотне електромагнітне поле, в яке поміщають деталь. Унаслідок явища електромагнітної індукції в деталі виникають вихрові струми (струми Фуко), які проходять лише в тонкому поверхневому шарі, де і виділяється вся теплота, що утворюється. Поверхневий шар розігрівається до температури гарту за дуже короткий час, не достатній для того, щоб тепло поширювалося углиб деталі. Потім нагріта поверхня різко охолоджується потоком рідини (як правило, води). В результаті гартується тонкий поверхневий шар, основа ж при цьому залишається в'язкою, що оберігає деталь від крихкого зламу при циклічній дії навантаження.

Поверхнєве гартування з нагріванням електроконтакту здійснюється шляхом пропускання змінного струму через контакт деталі з електродом у вигляді ролика, що котиться по поверхні деталі. Застосовується струм промислової частоти низької напруги. Джерелом струму є однофазний зварювальний трансформатор. Через високий електроопір у місці контакту ролика з деталлю виділяється велика кількість теплоти, і зона контакту розігрівається до температури гарту. Нагріта поверхня охолоджується струменем води.

Плазмові методи передбачають нагрівання поверхні за рахунок обробки струменем низькотемпературної плазми. Плазма одержується двома способами. Перший спосіб полягає у використанні звичайних газових пальників, що використовуються для різання і зварювання металів. Як газове середовище, що згоряє, використовується суміш кисню з ацетиленом або іншими вуглеводнями. Інший спосіб передбачає використання розігрітого струме-

ня інертного газу, що продувається через зону дугового розряду. Пристрій, що генерує струмінь такої плазми, називається плазмотроном. Як джерело плазми, як правило, використовують аргон.

Нагрівання в електроліті здійснюється шляхом занурення деталі у ванну з розчином кальцинованої соди або поташу. Ванну під'єднують до позитивного полюса джерела постійного струму, а деталь - до негативного. При достатньо великій силі струму поверхня деталі швидко нагрівається за рахунок того, що водень, що виділяється в результаті електролізу, утворює на поверхні оболонку, яка має високий електроопір. Ця оболонка є одночасно тепловим екраном, що запобігає розсіюванню тепла в електроліт. Таким методом гартують штанги штовхачів, стрижні клапанів і ряд інших деталей.

Останніми роками все більшого поширення набувають лазерні технології. Вони відрізняються високою культурою виробництва й ефективністю. Лазерне випромінювання в інфрачервоному діапазоні, сфокусоване в точку діаметром порядку десятка мікрометрів, викликає пилкоподібний рух (сканування) по поверхні деталі, покриваючи всю виділену під гарт ділянку. Швидкість нагрівання мікрооб'ємів деталі, що взаємодіють з променем, і подальшого охолодження досягає 10^6 К/с. Це забезпечує гарт поверхневого шару, глибина якого регулюється за рахунок зміни швидкості сканування. Сканування проводиться шляхом переміщення деталі за заданою програмою спеціальними механічними пристроями. Використовуються як твердотільні лазери, що працюють в імпульсному режимі, так і газові з безперервним процесом випромінювання. Лазерний гарт забезпечує отримання однорідної дрібнокристалічної поверхневої структури, що має підвищену твердість і зносостійкість. Після термообробки лазерним променем не відбувається викривлення

елементів рельєфу деталі, не спостерігається помітного погіршення якості поверхні. Через високу вартість процесу лазерному гарту піддаються найдорожчі і відповідальні деталі, наприклад колінвали.

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

Як приклад наведемо спосіб різкого зміцнення алюмінієвих сплавів. Зміцнювальним елементом переважно є кремній. Для утворення твердого розчину в алюмінії можна вводити не більше 12% кремнію. Надмірний кремній випадає у вигляді масивних вкраплень і не викликає зростання твердості матеріалу. Лазерний метод дозволяє вводити в алюмінії до 40% кремнію і вище. Надмірний кремній утворює дрібнодисперсну, рівномірно розподілену в об'ємі фазу, різко зміцнюючу матеріал. При цьому твердість поверхневого шару стає зрівняною з твердістю

загартованої сталі. Одночасно знижується властива алюмінію адгезійна активність і різко поліпшуються експлуатаційні властивості деталей з алюмінієвих сплавів. У такий спосіб підвищують зносостійкість поршнів ДВЗ, циліндрових гільз.

5.8 Електрохімічні покриття

Їх наносять на поверхні методом електролізу, який широко використовується в сучасній технології. Частіше за все застосовуються електролітичне хромування, сріблення, нанесення покриття з олова, свинцю, цинку, індію і сплавів легкоплавких металів. Речовини можуть наноситися як безпосередньо робочі шари, так і як елементи багат шарових покриттів.

Одне з головних місць займає хромування з метою підвищення зносостійкості. Хром володіє високою твердістю, хорошим зчепленням зі сталлю і високою хімічною стійкістю. Всі елементи підшипників кочення піддаються хромуванню. Для підвищення тепло- і кислотостійкості покриття обробляється парами бензину при температурі близько 1000°C. При цьому вуглець вступає в хімічне з'єднання з хромом з утворенням карбідів, які заповнюють мікротріщини в покритті. Гладкі хромові покриття, які володіють поганим змочуванням маслами, погано притираються, тому часто використовуються пористі покриття. Такі покриття наносять на поршневі кільця. Масло, що знаходиться в порах, запобігає схоплюванню в ході притирання. У хромованих гільз циліндрів ДВЗ пори заповнюють дрібнодисперсним дисульфідом молібдену, що також сприяє притиранню. Хромове покриття володіє високим опором зносу в умовах граничного змащування. Хром, мало зношуючись сам, мало зношує і зв'язану сталеву поверхню.

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

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

5.9 Хімічна обробка

Даний метод призначений для створення захисних шарів за рахунок хімічних реакцій. Велику зацікавленість становлять нікеле-фосфорні покриття, одержувані за рахунок виділення металів з розчину їх солей за допомогою хімічних препаратів - відновників. Покриття містить 92-95% Ni і 5-8% P. Міцність зчеплення з основою підвищується за рахунок термообробки покриття. Термообробка також підвищує твердість і антикорозійність. Покриття добре притираються, причому в ході притирання внаслідок високої пластичності матеріал покриття з вершин ви-

ступів частково перетікає в западини мікрорельєфу. Підвищується фактична площа контакту і знижуються контактні напруги. Проте покриття мають низьку стійкість до циклічного навантаження і здатні відшаровуватися.

Значне місце в технології підвищення зносостійкості займають оксидування і фосфатування. Оксидування - це штучне створення оксидної плівки. На сталі формується пориста плівка окислу заліза Fe_3O_4 малої товщини (до 3 мкм), що має малу твердість і хороше зчеплення з основою. Вона добре утримує мастило, запобігає заїданню і, руйнуючись, утворює тонкий абразив, сприяючи притиранню. Плівку одержують різними шляхами: хімічним, електрохімічним, термічним і термохімічним. Хімічна обробка здійснюється в лужних і кислотних середовищах при температурі розчину 138-165°C. Плівка крім, оксидів, що утворюються, містить деяку кількість фосфатів. Застосовується також обробка парою. Термічне і хіміко-термічне оксидування проводиться шляхом нагрівання деталей у розплавленій селітрі або на повітрі.

Важливе значення має нанесення захисної оксидної плівки на поверхню деталей з алюмінію і його сплавів. Оксидна плівка має високу твердість і при хімічному оксидуванні має товщину до 5 мкм. Пориста плівка просочується змащувальними маслами, що містять колоїдний графіт, або дисульфід молібдену, що додає підшипниковим вкладишам високі антифрикційні властивості. Часто захисні плівки одержують електрохімічним шляхом за товшки до 0,3 мм методом глибокого анодування. Потовщення плівки відбувається як за рахунок проникнення углиб деталі, так і нарощування на поверхні. Таким чином, збільшується розмір деталі. Хороший результат дає глибоке анодування поршнів. Різко знижується знос, підвищується надійність через зменшення вірогідності заклинювання.

Прогресивним способом хімічної обробки матеріалу поверхонь деталей є фосфатування - формування плівки з нерозчинних фосфорнокислих солей. Плівка формується при температурі близько 100°C в середовищі розчину. Товщина плівки досягає 50 мкм. Розміри деталі міняються слабо. Вона міцно зчеплена з основою, жаростійка (до 600°C), стійка до дії кислот, що містяться в мастилі, має низьку твердість і високу пористість. Вона просочується маслом, що містить твердомастильні добавки, і добре захищає деталі від задиру. Успішно використовується для захисту поверхонь циліндрових гільз, поршневих кілець, вкладишів підшипників, пальців верхніх головок шатунів, різьбових з'єднань.

Одним із ефективних способів хімічної обробки поверхонь є сульфідкування, що полягає в збагаченні поверхневих шарів сталевих деталей сіркою. Сульфідкування проводять у рідких, твердих або газових сірковмісних середовищах. Воно може бути низько-, середньо- і високо-температурним (150-450, 540-580, 850-950°C відповідно). Залежно від складу сірчистого середовища, температури і тривалості процесу разом з FeS, FeS₂ утворюються й інші залізо-сірчасті з'єднання. Рідинне сульфідкування здійснюється в соляних ваннах. Глибина сульфідованого шару досягає 50 мкм. Різновидом сульфідкування є сульфоціанування, при якому поверхня одночасно насичується сіркою, азотом, вуглецем при температурі 540-580°C в рідкому середовищі. Застосовується і сульфідкування у твердому середовищі порошку сірчистого заліза. Шорсткість сульфідованих поверхонь значно вища за початкову, дещо збільшуються розміри деталей. У процесі експлуатації сульфідна плівка менш міцна, ніж основний метал, легко руйнується і відділяється, запобігаючи схоплюванню. Сульфідний шар і м'які слабоабразивні продукти зносу володіють високою адсорбційною здатністю і

активують молекули масла. Завдяки таким властивостям притирання швидшає і швидко встановлюється рівноважна шорсткість із високою якістю, що наближається до 9-10 класів. У міру зносу під впливом температури і тиску атоми сірки дифундують углиб поверхні, підвищуючи антифрикційні властивості. В результаті насичений сіркою шар значно перевищує первинний за своїми протизносними властивостями. Сульфіді, що переносяться маслом, потрапляють на всі поверхні, що труться. Сульфоціанування, в доповнення до сульфідуювання, не тільки прискорює притирання, але й істотно підвищує зносостійкість за рахунок підвищення твердості і втомної міцності. Сульфідують і сульфоціанують циліндрові гільзи та поршневі кільця компресорів, сталеві підшипники ковзання, різьбові з'єднання, деталі шарнірів підвіски транспорту.

До сучасних методів створення захисних плівок на поверхнях відповідальних деталей належать хімічна дія газового середовища при певних значеннях температури і тиску (іноді із застосуванням пучків прискорених іонів). Прикладом такого методу є створення на поверхні міцно пов'язаного з основою шару дисульфиду молібдену. Для цього на деталь наносять електролітичним шляхом шар молібдену. Потім поверхню при певній температурі й тиску обдувають парами сірки. Дисульфід молібдену, що утворюється в ході поверхневої реакції, міцно зв'язується з основою і утворює надійне твердомастильне покриття. Якщо потім поверхню бомбардувати прискореними іонами, то кристали дисульфиду молібдену площинами якнайменшого опору зсуву встановлюються паралельно поверхні деталі, і коефіцієнт тертя по такій поверхні близький до нуля (аномально низьке тертя). Іншим прикладом такого способу створення покриття є формування на поверхні тонкої алмазної плівки з найвищою зносостійкістю. В цьому випадку спеціально підготовлена поверхня

деталі при відповідних діаграмі фазової рівноваги вуглецю значеннях температури і тиску обдувається одним із вуглеводнів. На поверхні утворюється тонка (до 10 мкм) плівка вуглецю у вигляді алмазу.

5.10 Механотермічне формування зносостійких покриттів

Метод полягає в тому, що захисний шар кристалізується з розплаву в обмежених умовах під навантаженням. При цьому в ньому відсутні порожнини і кризні шкарини, основний метал практично не підплавляється і не потрапляє в шар, який надійно з'єднується з основою, що наплавляється. Використовують дві технологічні схеми: фрикційне й електроконтактне формування.

Перша технологічна схема передбачає притиснення з певним зусиллям до поверхні деталі сухарів з матеріалу майбутнього покриття. Можливий і інший варіант: за допомогою пуансона притискається брикет із гранул або стружки. Потім поверхня, що покривається, із заданою швидкістю приводиться в циклічний рух. Матеріал, що наноситься, тре об поверхню деталі, на межі виділяється теплота. У якийсь момент часу температура контакту досягає точки плавлення. Плавлення, а отже і формування зносостійкого шару, проходить під тиском від 5 до 100 МПа при швидкості ковзання 1-8 м/с. При цьому час формування шару становить 5-70 с. Цим способом створюється покриття товщиною від 0,5 до 10 мм. На сталеву основу наносять шари з мідних, алюмінієвих та інших сплавів. Метод має ряд обмежень. Він застосовується для деталей циліндричної форми, що приводяться в обертання. Температура плавлення матеріалу покриття повинна бути менша ніж у матеріалу основи. Цей метод успішно застосовується для створення мідного покриття на пове-

рхнях гільз циліндрів компресорів, що стимулює виникнення режиму вибірного перенесення. При випробуваннях пара циліндр - поршень практично не зношується.

При формуванні електроконтакту тепло виділяється внаслідок проходження електричного струму через granulований матеріал з великим опором, притиснутий із заданим тиском до поверхні деталі. Тут форма поверхні деталі може бути будь-якою. Температурні обмеження теж відсутні. Цим методом на сталь наноситься широкий спектр матеріалів: леговані сталі, тверді сплави, зносостійкі композиції. Таким же чином здійснюється наплавлення електроконтакту, засноване на принципі контактного зварювання. Матеріал (як правило у вигляді стрічки), що наплавляється, притискається до поверхні деталі електродом. Між електродом і деталлю прикладається різниця потенціалів від 2 до 12 В. Можна використовувати як джерело струму зварювальний трансформатор. Якщо наплавляють довгомірні деталі, то електрод роблять у вигляді ролика, що котиться по деталі і здійснює приварювання захисного покриття.

5.11 Наплавлення зносостійких шарів

Це один із найпоширеніших способів відновлення зношених деталей машин і механізмів. Існує багато методів наплавлення, які розрізняються джерелами теплової енергії, способами захисту металу, що наплавляється, рівнем автоматизації. Проте всі види наплавлення мають загальні металургійні і фізико-хімічні основи. До них відноситься розплавлення металу з частковим розплавленням поверхневого шару, перемішування розплавів, кристалізацію.

Найбільшого поширення набуло електродугове наплавлення, здійснюване ручним і напівавтоматизованим способами. При механізованому наплавленні замість

окремих електродів застосовується згорнутий у бухту дріт або електродна стрічка. Частіше за все застосовується наплавлення під шаром флюсу. Порошковий флюс, що безперервно подається в зону дуги, утворює над швом шлакову оболонку, яка через низьку теплопровідність зменшує швидкість охолодження наплавленого матеріалу, що сприяє нормалізації структури, а також захищає шов від окиснення, запобігає розбризкуванню металу, частка якого у шві коливається від 30 до 65%, що погіршує властивості захисного шару і робить їх значною мірою випадковими величинами. Наплавлення під флюсом успішно застосовується при відновленні клапанів автомобільних двигунів, осей шарнірів та інших сильнозношуваних деталей. Якість покриття помітно поліпшується, коли виключається контакт матеріалу, що наплавляється, з киснем повітря. Для цього процес проводять у середовищі вуглекислого газу, аргону і їх сумішей. Цікавий високоефективний метод наплавлення порошковим дротом, що є тонкою трубкою зі сталі із запресованою в ній порошковою сумішшю, що забезпечує одержання необхідного складу шару, який наплавляється.

Використання плазмово-дугового замість звичайного розряду електродуги дозволило істотно знизити шкідливий вплив підплавлення основного матеріалу. Тут можливі різні варіанти подачі матеріалу, що наплавляється, в зону наплавлення: подача дроту, проплавлення наперед укладеного дроту (так наплавляють клапани ДВЗ), вдунання порошку, що наплавляється, разом з потоком плазми. Останній метод переважає, оскільки дозволяє повністю автоматизувати процес.

5.12 Напилення покриттів з порошкових матеріалів

Цей метод є одним із найефективніших способів створення зносостійких шарів. Якщо у високотемперату-

рний струмінь газу подати частинки порошку або краплі розплаву, то при зіткненні з поверхнею вони деформуються і міцно прикріплюються до деталі. Існує два різновиди такої технології: газоплазмове напилення та електричне напилення. При газоплазмовому методі тепло виділяється внаслідок спалювання суміші горючого газу з киснем, при електричному - джерелом тепла є електрична дуга. Для газополум'яного напилення в індивідуальних умовах виробництва використовують звичайні газові пальники, що забезпечують плавлення і розбризкування матеріалу дроту, який подається в зону факела. Як джерело високотемпературного і швидкісного струменя зручно використовувати плазмотрон (принцип дії якого описаний вище). В цьому випадку напилюваний порошок подається в струмінь плазми. Є і пристрої електродуг, у яких через зону плавлення в дуговому розряді двох дрітних електродів вдувається стиснуте повітря. Струмінь розжареного повітря разом з краплями розплаву потрапляє на поверхню деталі.

Іншим варіантом нагрівання напилюваного матеріалу є використання індукційних струмів високої частоти, що виникають у дроті, під час проходження через охолоджувальний соленоїд, який генерує високочастотне електромагнітне поле. Через котушку продувається струмінь повітря, який підхоплює краплі дроту, що розплавився, і ударяє їх об поверхню деталі.

Головною перевагою методу напилення є його універсальність - незалежність від природи матеріалу деталі. Можна наносити покриття не тільки на метали, але і на кераміку, дерево, бетон, полімери, тканини, папір. Це зв'язано з тим, що напилення не чинить помітної теплової дії на основу. Те саме можна сказати і про напилювані матеріали. Напилюють кольорові метали і сплави, сталі, тверді сплави і кераміку, пластмаси, декорувальні суміші.

Не мають також особливого значення форма і розміри деталей.

Напилення широко застосовується для відновлення форми зношених деталей. Велику роль відіграє підготовка поверхні під напилення. Поверхня повинна бути добре очищена від забруднень, мати шорсткість і пористість. Це гарантує хороше зчеплення матеріалу, що наноситься, з основою. Поверхні знежирюють за допомогою промивки в розчинниках (бензин, бензол, ацетон, чотирихлористий вуглець і т.д.). Для усунення дефектів поверхневої структури використовується обробка струменем абразиву (піскострумування).

Останнім часом для нанесення зносостійких твердосплавних покриттів використовується метод детонаційного напилення. Установка для детонаційного напилення нагадує кулемет, що стріляє порціями розігрітого порошку. В замкнуту камеру згоряння, до якої прикріплюється стовбур, подається суміш кисню і горючого газу (ацетилен, пропан-бутан та ін.). Стовбур направляють на напилювану поверхню. Через завантажувальний отвір до камери подається порошок. Суміш підпалюється електричною іскрою і вибухає. Розжарені частинки разом із продуктами згоряння ударяються об оброблювану поверхню і закріплюються на ній. Температура частинок у момент удару досягає 4000°C. Частота пострілів - 3- 4 за секунду. Недоліком методу є нерівномірний розподіл матеріалу по поверхні, що усувається шляхом фінішної обробки шліфуванням. Так створюють покриття з металокераміки: карбідів вольфраму, титану і кобальту, нітридів титану і бору, окислу алюмінію. Покриття мають високу твердість і зносостійкість. Знос знижується до 10 разів.

Газотермічне напилення успішно використовується в машинобудуванні і під час ремонту й експлуатації автотранспортних засобів. Зносостійкість колінвалів вантажних машин після нанесення газотермічного покриття під-

вищується до 4 разів. Такий самий результат одержують при напиленні покриття на поршневі кільця замість електrolітичного хромування. Добрий результат дає нанесення покриття з двоокису алюмінію.

5.13 Іонно-плазмові методи

Дані методи досить ефективні. У зв'язку з тим, що їх упровадження вимагає високого розрідження, вони здійснюються у вакуумних камерах, тому є достатньо дорогими і застосовуються лише для дуже відповідальних деталей, що працюють при високих температурах в умовах адгезійного й окислювального зношування. В умовах вакууму метал, що наноситься, перетворюється на газ, пару, іонізовану пару і плазму, а потім в атмосфері реакційного або інертного газу осідає на поверхні деталі. Покриття може бути одержано способами термічного випаровування, катодної або іонно-плазмової розпиленості або за допомогою бомбардування поверхні потоком із частинок осідаючої речовини. Як реакційний газ застосовуються азот або вуглеводень, у результаті формується нітридне або карбідне покриття.

Є декілька різновидів методу. Катодна розпиленість ґрунтується на використанні розміщених у вакуумній камері 2-х електродів. Після відкачування повітря камера заповнюється аргоном, на електрод з деталлю подають негативний потенціал. Поверхня деталі очищається в газовому розряді шляхом бомбардування іонами. Далі негативний потенціал подається на випаровуваний матеріал, який розплавляється й іонізується в плазмі розряду. Частинки осідають на деталі, створюючи покриття. Якщо використовувати реакційний газ, пролітаючи через який атоми металу утворюють нітриди, карбіди або оксиди, можна одержати необхідний структурно-фазовий склад покриття. Швидкість осідаючих частинок досягає 10 км/с,

тому вони міцно зчіплюються з основою. Найкращі результати одержують при використанні для випаровування променевих методів нагрівання (електронно-променевого і лазерного). Застосовується додаткове прискорення іонів накладенням електричного поля.

Широко поширена технологія нанесення покриттів з плазми дугового розряду з холодним катодом. Матеріал випаровується катодною точкою електричної дуги - сильноточним низьковольтним розрядом, що розвивається в парах матеріалу електродів. Між анодом і катодом з напилюваного матеріалу виникає розряд, що проходить у парах продуктів ерозії катода. Металева плазма виділяється з мікроточок катода, в зонах яких виникають локально висока температура і тиск. Прикладаючи до деталі прискорюючий потенціал, підвищують швидкість іонів, що генеруються в плазмі. Така технологія реалізується в установках "Булат", що є на багатьох підприємствах. Найбільш часто наносять покриття з TiC, TiN, Al₂O₃ - найтвердіших зносостійких матеріалів. Розвиток методу пов'язаний з упровадженням плазмових прискорювачів, що формують сфокусований високошвидкісний іонно-плазмовий пучок, скануючий поверхню деталі. Тут так само, як і в електронно-променевої трубці, фокусування пучка і сканування здійснюються за допомогою електростатичних, магнітних лінз і відхилюючих пластин. Покриття мають невелику товщину 4-10 мкм, викликають помітне поліпшення якості поверхонь, які володіють високою корозійною стійкістю. Вони використовуються для підвищення зносостійкості металообробного інструменту, колінвалів, деталей паливної апаратури дизелів, клапанів і т.д.

5.14 Плакування

Метод створення товстошарових покриттів застосовується під час виготовлення деталей або під час відновлення їх форми після зношування. При цьому товщина шару може складати декілька міліметрів. Плакування також використовується при виготовленні елементів ковзаючих електричних контактів з метою економії дорогих матеріалів з високою електропровідністю, наприклад срібло.

Товстошарове покриття часто наносять методом плющення. Зчеплення шарів здійснюється за рахунок дифузії, стимульованою високою температурою. Застосовуються також дифузійне і електроконтактне зварювання, наплавлення, пайка та інші способи. Таким методом одержують біметалеві смуги, кільця. Часто наноситься шар з порошкових металів і кераміки. Шари припікаються в конвеєрних печах і плющуються разом з основою в гарячому стані. Суспензія порошків (суміші з летючими рідинами з добавкою склеюючої речовини) може наноситися за способом шликерного литва. Потім деталі просушуються. На поверхні утворюється рівнотовщинний шар, утримуваний клеєм. Деталі потрапляють у піч, клей вигоряє, а матеріал, що наноситься, припікається до основи. Утворюється пористе тверде покриття, яке потім просочується яким небудь службовим матеріалом, наприклад фторопластом.

5.15 Механічне зміцнення поверхонь

При цьому методі використовується явище значного зростання межі текучості, а отже і твердості матеріалу, при високому ступені пластичної деформації - деформаційне зміцнення. Метод реалізується шляхом обкачування поверхонь роликками або кульками, вигладжування сферичними алмазними наконечниками, обробки струменем із дрібних сталевих або скляних кульок (дро-

бострумування). Крім зміцнення, поверхня вигладжується, помітно знижується висота шорсткості. Вершини виступів стають більш пологими, і контакт переходить із пластичного в пружний стан. Можливе також залічування поверхневих дефектів (мікротріщин). Усе це істотно підвищує втомну зносостійкість, знижує термін притирання. Відомі позитивні результати алмазного вигладжування шийок колінвалів дизельних і бензинових ДВЗ, поверхонь розпередвалів та інших деталей.

Відомим різновидом методів поверхневої пластичної деформації (ППД) є технологія віброзміцнення, створена професором Шнейдером Ю.Г. (С-Петербург). У цьому способі вигладжуючому індентору надається коливальний (вібраційний) рух і при поєднанні коливального руху індентора з поступальним по оброблюваній поверхні при малій швидкості руху можна одержати поверхню, що повністю наклепана, а при збільшенні швидкості - синусоїди або їх переплетення. У цьому разі говорять про частково зміцнену поверхню, яка виглядає як рельєф так званої "крокодилової шкіри".

5.16 Експлуатаційні методи

Конструктивна досконалість і висока якість виготовлення машини не гарантують тривалої та безаварійної її роботи. Довговічність вузлів тертя машин і механізмів значною мірою залежить від умов їх експлуатації, дотримання норм, направлених на зниження інтенсивності зношування тіл тертя, своєчасному проведенні профілактичних заходів, заміни або відновлення зношених деталей. Важливою передумовою правильного використання і грамотної експлуатації машини є наявність її технічного опису, правил технічної експлуатації і основних правил техніки безпеки під час обслуговування машини, альбома креслень і карти змащування. Зазначена документація складається під безпосереднім керівництвом конс-

труктора на підставі досвіду експлуатації подібних машин, результатів експериментальних робіт, стендових і експлуатаційних випробувань дослідних зразків. Існують такі експлуатаційні методи забезпечення високої надійності вузлів тертя.

5.16.1. Обкочування машин та механізмів

Призначення цього методу - припрацювання в єдиному комплексі всіх пар тертя, які входять до складу машини. Під час обкочування повинні бути реалізовані два процеси:

- макрогеометричне припрацювання – знос поверхонь по вершинах хвиль шорсткості і на ділянках, де початкові технологічні неточності, дефекти монтажного походження, силові й теплові деформації перешкоджають поширенню реальної зони контакту до проектної;

- мікрогеометричне припрацювання - формування оптимальної топографії поверхні з певними параметрами і спрямованістю, характерною для кожної поверхні тертя під час роботи машини на експлуатаційному режимі найбільшої тривалості.

Режим обкочування - це послідовність і тривалість навантаження машини при відповідних швидкісних режимах. Обкочування машини починають із холостого ходу на малих швидкостях. Холостий хід використовують також для перевірки справності всіх систем. Якщо при нормальній експлуатації машини деякі вузли тертя працюють при підвищених температурах, то при обкочуванні повинен бути етап, аналогічний такому тепловому режиму. Тому обкочування, наприклад, двигунів внутрішнього згоряння складається з холодного (з приводом від стороннього джерела) і гарячого режимів. Момент закінчення періоду обкочування визначається за такими критеріями: мінімум потужності, необхідної для роботи машини на холостому ході; найбільша ефективна потужність при заданому режимі навантаження; низька кон-

центрація і відсутність великих часток зносу в змащувальному матеріалі.

5.16.2. Змащування вузлів тертя

Це один із найбільш ефективних методів продовження терміну служби триботехнічної пари. Під час роботи машин кількість змащувального матеріалу зменшується внаслідок витікання через нещільності, деяка його частина переходить у шлам, частина видаляється водою, випаровується.

Термін заміни моторного масла перш за все зумовлений проявом наступних явищ:

- зниженням ефективності змащувальних властивостей масла у зв'язку з накопиченням у ньому продуктів старіння і різних забруднень;

- розрідженням масла паливом;

- накопиченням високо - і низькотемпературних осадів;

- спрацьовуванням присадки.

Починаючи приблизно з 1960 р. вимоги до експлуатаційних властивостей моторних масел підвищуються. Потужність двигунів подвоїлася, ступінь стискання зріс від 6,5 : 1 до 9 : 1.

Значно зросли також температурні чинники, які впливають на елементи двигуна, включаючи і моторне масло. Робочі умови для сучасних автомобілів усе більше й більше коливаються між високошвидкісною їздою (шосе) й уповільненим рухом у колоні та на короткі відстані (міські умови). Терміни заміни масла, які в 1960 р. становили 3000 км пробігу, зросли на сучасному етапі експлуатації машин до 10000 км. Це стало можливим завдяки безперервному поліпшенню якості моторних масел, запобіганню низькотемпературному шламоутворенню, підвищенню термічної стабільності і протизношувальних властивостей.

Застосування змащувального матеріалу після закінчення терміну його заміни зумовлює підвищення зносу елеме-

нтів вузла тертя внаслідок ослаблення змащувальних властивостей.

Проте передчасна заміна змащувального матеріалу також недоцільна, оскільки новий змащувальний матеріал спочатку характеризується менш ефективними змащувальними властивостями, оскільки містить низьку концентрацію продуктів окислення вуглеводнів, здатних утворювати з металом стійкі з'єднання, які захищають його від безпосереднього контакту з контртілом. Графік термінів змащування для автомобілів розробляють згідно з режимом експлуатації в найбільш несприятливий сезон. Для складання карти змащування використовують інструкції і схеми заводів-виробників, результати експериментальних досліджень і досвід експлуатації.

5.16.3. Вибір режиму роботи та умов експлуатації

Робота машини характеризується навантажувальними, швидкісними та температурними режимами. Ідентична продуктивність машини може бути досягнута при різних поєднаннях параметрів навантажувального і швидкісного режимів. Деякий діапазон сумісності зазначених чинників може виявитися найбільш вигідним із погляду зносостійкості, задовольняючи й вимоги економічності.

Значною мірою довговічність трибоспряжень визначається частотою і правильним виконанням запуску машини, оскільки в пусковий період інтенсифікується зношування. На частку пускового зносу припадає 50-70% загального зносу двигуна під час роботи на сталому режимі. Один пуск двигуна за зносом еквівалентний 15-17 км пробігу. Значний знос при пуску двигуна зумовлений низькою причин. Після зупинки двигуна масло, знаходячись у нагрітому стані, швидко стікає з гарячих стінок циліндрів, видавлюється і залишається в підшипниках у незначній кількості. Нормальна подача масла у верхню робочу зону циліндра починається тільки через 3-12 хв після початку

пуску двигуна, і змащування відбувається при граничному режимі.

Підвищений знос деталей ходової частини транспортних засобів відбувається в період їх зупинки. При гальмівному моменті колеса, який дорівнює або перевищує момент від сил зчеплення колеса з полотном дороги, відбувається перехід від кочення до ковзання (юзу). Юз призводить до місцевого спрацьовування коліс по колу кочення і зменшує термін служби шин через стирання протектора.

Тривалі сталі режими роботи машини при навантаженнях, нижчих за номінальні, інколи підвищують знос. Наприклад, тепловий режим, який створюється, у двигунах внутрішнього згоряння за подібних умов, несприятливий для роботи циліндро-поршневої групи.

5.17 Правила сполучення матеріалів

При виборі сумісності елементів пари тертя необхідно перш за все враховувати, в якому режимі тертя передбачається експлуатація даного вузла. При цьому на підставі досвіду експлуатації або аналізу роботи подібних вузлів необхідно встановити переважні види пошкоджень триботехнічної пари. Ступінь пошкодженості контактних поверхонь з урахуванням режиму мащення визначається умовами роботи: навантаженням, швидкістю і температурою (табл. 5.2).

Є декілька правил сполучення матеріалів.

1 Сполучення твердого матеріалу з м'яким, який характеризується температурою рекристалізації нижчою, ніж середня температура поверхонь тертя. Пластичний матеріал не наклепується під час роботи, характеризується позитивним градієнтом механічних властивостей по глибині. Хороші результати дають пари хром - гума (при змащуванні мінеральним маслом і водними розчинами) та хром - бронза при змащуванні мастилами.

2 Сполучення твердого матеріалу з твердим (сполучення пар з азотованої, хромованої та загартованої сталей). Такі триботехнічні пари характеризуються високою зносостійкістю внаслідок низької імовірності взаємного проникнення нерівностей їх контактних поверхонь.

Таблиця 5.2 - Види пошкоджень контактних поверхонь

Гідродинамічний режим мащення	Змішаний або граничний режим мащення	Змащування без мастильного матеріалу
Втомні пошкодження (тріщини, викришування, руйнування)	Втомні пошкодження (тріщини, викришування, руйнування)	Знос за рахунок схоплювання, який супроводжується виливом та перенесенням металу з однієї поверхні на іншу
Знос за рахунок абразивної дії часток, які потрапляють в масло	Знос за рахунок абразивної дії часток та схоплювання на окремих ділянках дотику	Утворення глибоких та широких борід, які обумовлюють задир поверхонь тертя
Кавітаційні пошкодження вкладишів. Корозійні пошкодження	Утворення глибоких та широких борін, які обумовлюють задир поверхонь тертя	Знос за рахунок зминання (пластичної деформації) поверхонь тертя

3 Запобігати сполученню м'якого матеріалу з м'яким, а також пар з однакових матеріалів - незагартованої сталі, алюмінієвих сплавів, мідного та алюмінієвого сплавів, хрому і алюмінію та ін.

Зазначені пари характеризуються низькою зносостійкістю та ненадійні в роботі, при незначних перевантаженнях у парах утворюються ділянки схоплювання та спостерігається глибинний вилив матеріалу з налипанням на поверхню тертя.

4 Застосовувати у важкодоступних для змащування конструкціях пористі та металокерамічні матеріали й антифрикційні сплави.

5 Застосовувати як фрикційні та антифрикційні матеріали пластичні маси. В ряді випадків вони підвищують надійність конструкцій, знижують вібрації та покращують акустичні властивості машин.

6 Прагнути шляхом вибору матеріалів пари тертя, змащувальних матеріалів або присадок до них створювати під час роботи триботехнічної пари умови для реалізації режиму вибіркового перенесення під час тертя.

7 При виборі матеріалів ураховувати можливість під час експлуатації насичення поверхонь тертя воднем, що різко знижує зносостійкість і надійність роботи вузла тертя. Застосовувати матеріали, які стійкі до насичення водню в поверхневих шарах металу.

8 При остаточному доведенні сталевих деталей вузлів тертя їх поверхні піддавати фінішній антифрикційній безабразивній обробці.

Вибір матеріалів пар тертя в умовах ковзання при заданих або прийнятих розмірах деталей, які сполучаються, і визначення цих розмірів при проектному розрахунку проводять за деякими критеріями:

- найбільш простий спосіб перевірки ґрунтується на розрахунку за середнім тиском p . Спосіб придатний для пар тертя, що працюють з малими швидкостями ковзання при невисоких температурах навколишнього середовища, і забезпечує передбачення умов заїдання елементів трибоспряження;

- якщо режим тертя триботехнічної пари визначається не тільки тиском p , але і швидкістю V , то застосовують метод, ідея якого полягає в такому: якщо f - коефіцієнт тертя ковзання, то $f \cdot p \cdot V$ є питомою потужністю тертя. Оскільки надійна робота вузла можлива лише при теплоавантаженості, що не перевищує певну величину для даної конструкції і

умов її експлуатації, то, позначивши через Q граничну кількість теплоти, яка може виділятися з одиниці площі в одиницю часу, умову напруженості вузла по теплонавантаженості можна записати:

$$f \cdot p \cdot V < Q.$$

5.18 Розміщення матеріалів за твердістю у парах тертя

У парах, що утворені ковзаючими поверхнями, які мають різні твердості та розміри площ тертя, розрізняють дві умови, пов'язані з співвідношенням матеріалу:

$$1) H_1 > H_2; S_1 < S_2;$$

$$2) H_1 < H_2; S_1 < S_2,$$

де H_1 і H_2 - твердості, а S_1 і S_2 - площі поверхонь пар тертя.

Пару зі співвідношенням матеріалів за першою умовою називають прямою парою тертя, за другою — зворотною.

У випадку прямої пари тертя по більшій поверхні ковзає більш тверде тіло, у випадку зворотної - ковзає більш м'яке тіло.

Прикладом прямої пари є ковзання хромованого поршневого кільця по циліндру з перлітного чавуну, зворотної пари - хромоване робоче дзеркало циліндра та чавунне кільце. Недостатня надійність пари тертя у зв'язку з розміщенням матеріалів може виявитися у схоплюванні та заїданні. Досвід експлуатації машин, стендові та лабораторні дослідження показують, що зворотні пари тертя більш стійкі до заїдання, а при заїданні спостерігається менша кількість пошкоджень.

Для більшості пар тертя різних механізмів та агрегатів, які працюють за наявності мастильного матеріалу, добра сумісність контактних поверхонь забезпечує надійність роботи вузлів тертя в режимі порушення суцільності мастильного шару.

У деяких випадках такий режим економічно обґрунтований, оскільки забезпечення гідродинамічного режиму вима-

гає великих затрат на конструктивні зміни, що призведе до надлишкової витрати матеріалів. Для вузлів тертя, які працюють в умовах "сухого" або граничного мащення, сумісність матеріалів контактних поверхонь є одним із визначальних чинників для безперервної роботи триботехнічної пари.

5.19 Заміна у вузлах машин тертя ковзання на тертя кочення

Така заміна у багатьох випадках доцільна з погляду підвищення надійності роботи деталей і економічності машин. Застосування опор кочення найбільш виправдане у вузлах тертя, що експлуатуються при низьких та середніх навантаженнях і швидкостях, за умов відсутності хімічно активних речовин, вібрацій та ударних навантажень.

Підшипники кочення характеризуються такими перевагами:

- зменшуються втрати на тертя, тому опори кочення доцільніше встановлювати у вузлах машин, які працюють в умовах частих пусків і зупинок;
- на виготовлення вкладишів підшипників ковзання витрачається велика кількість кольорових металів (мідь, олово, свинець і т.д.);
- зменшується витрата змащувальних матеріалів;
- відпадає потреба в примусовому охолодженні;
- спрощується догляд за конструкцією в періоди технічного обслуговування ;
- у валів при правильно призначених посадках відсутній знос шийок;
- підшипники кочення стандартизовані, що спрощує конструювання підшипникового вузла;
- застосування підшипників кочення зменшує вартість машини.

Але існують і недоліки підшипників кочення, до яких необхідно віднести:

- недостатню надійність при високих обертових швидкостях і динамічних навантаженнях (схильність до викришування);

- великі діаметральні розміри при меншій довжині, ніж підшипників ковзання; незадовільну роботу в умовах вібраційного навантаження;

- великий шум під час роботи;

- недостатню корозійну і теплову стійкість;

- незручні, коли потрібна роз'ємна опора.

6 ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

6.1 Класифікація та експлуатаційні властивості мастильних матеріалів

Збільшення потужності транспортних засобів і технологічних процесів призвело до зростання вимог щодо підвищення надійності й довговічності техніки, а також до зниження витрат палива і змащувальних матеріалів. Нафтопродукти, які є експлуатаційними матеріалами, за своїм впливом на показники роботи техніки рівнозначні конструкційним матеріалам: металам, гумам, пластмасам та ін.

Ефективність змащувального матеріалу визначається, по перше, конструктивними особливостями вузла тертя (типом, розміром, характером руху поверхонь тертя тощо), по-друге, - системою змащування і видом матеріалу контактних поверхонь, з яким він контактує в процесі роботи, а також умовами експлуатації вузла тертя і термінами заміни змащувального матеріалу.

Як конструкційний матеріал вузла тертя масла виконують такі функції:

- зменшують тертя, що виникає між деталями триботехнічного вузла;
- знижують знос і попереджують задири поверхонь тертя;
- відводять тепло від пар тертя;
- захищають поверхні контактуючих пар та інші неізольовані частини від корозійної дії зовнішнього середовища;
- ущільнюють зазори між спряженими деталями;
- видаляють із зони тертя продукти зносу, корозії та інші забруднення.

Змащувальні речовини можуть бути рідкими (масла, вода, сірчана кислота високої концентрації), у вигляді емульсії (змащувально-охолоджувальні рідини), газоподібними (повітряні і газові суміші), пластичними і твердими (тальк, графіт, дисульфід молібдену).

За призначенням змащувальні масла класифікуються за такими групами:

- моторні масла (масла для карбюраторних, дизельних та авіаційних двигунів);
- трансмісійні масла (автотракторні, редукторні, припрацьовуючі масла для редукторів, масла для гідравлічних муфт, гідротрансформаторів і автоматичних трансмісій);
- енергетичні масла (турбінні, компресорні та електроізоляційні масла);
- індустріальні масла (масла загального призначення, масла для важконавантажених вузлів, для нарядних ковзання, циліндрові, для прокатних станів);
- консерваційні і робочо-консерваційні масла;
- масла спеціального призначення.

Найважливішими властивостями масел, які визначають можливість їх застосування в різних умовах експлуатації, є:

- антиокислювальні властивості - стійкість масла до окиснення в межах робочих температур;

- антифрикційні властивості - здатність знижувати коефіцієнт тертя при різних режимах роботи;

- протизношувальні властивості - надійне змащування вузлів тертя з мінімальним зношуванням у межах робочих температур;

- антикорозійні властивості - здатність запобігати руйнуванню поверхневого шару деталей;

- полого в'язкісно-температурна крива та ефективна прокочуваність при низьких температурах (пускові властивості масла повинні забезпечувати надійний запуск трибомеханічної системи без підігріву в межах робочих температур);

- мийно-диспергуючі властивості - здатність запобігати утворенню вуглецевих відкладень на гарячих поверхнях деталей;

- нейтралізуючі властивості - здатність нейтралізувати кислоти, що утворюються в процесі окиснення масла;

- мінімальне спінювання і випаровування (для авіаційних, вакуумних масел, а також для масел до гідромеханічних коробок передач та приладів);

- деемульгуючі властивості - здатність до розділення емульсії вода - масло шляхом зміни міжфазного натягу (для турбінних масел).

Крім того, змащувальні матеріали не повинні піддаватися біопошкодженням, не змінювати властивостей під час зберігання й регенерації, легко транспортуватися і не викликати забруднення навколишнього середовища.

6.2 Компоненти змащувальних масел

Товарні масла складаються з базових масел нафтового або синтетичного походження (або їх суміші), у які вво-

дяться спеціальні присадки, що поліпшують певні властивості масел. Деякі індустріальні, компресорні, вакуумні та інші масла не містять присадок. Отримання необхідних якостей масел досягається шляхом правильного підбору і сумісності властивостей базової частини з комплексом присадок, які додаються при компаундуванні.

6.2.1 Базові масла і вплив фракційного складу на їх фізико-хімічні і триботехнічні показники

Базові масла одержують шляхом переробки нафтової сировини, яка передбачає такі стадії:

- перегонку для отримання фракцій із заданою в'язкістю і температурою спалаху;
- очищення для поліпшення стійкості до окиснення і в'язкісно-температурної характеристики;
- деасфальтизацію залишку вакуумної перегонки;
- депарафінізацію для поліпшення низькотемпературних властивостей.

Унаслідок перегонки, екстракції різних компонентів, депарафінізації і доочистки сировини хімічний склад продукту стає більш однорідним. Проте глибина очищення масла повинна бути оптимальною. Ненасиченим вуглеводневим сполукам, а також асфальтено-смолистим компонентам притаманна полярна активність, такі молекули сприяють утворенню на поверхнях тертя граничних плівок. Тому при переочищенні масла його змащувальна здатність погіршується. Крім того, переочищені масла менш стабільні при зберіганні. Деякі смолисті речовини покращують в'язкісно-температурні характеристики масла і знижують його температуру застигання.

Нафтові базові масла - це суміші, що складаються з парафінових, ароматичних і нафтових вуглеводнів (переважно змішаної будови), а також кисне-, сірко- і азотовмісних органічних сполук і смолисто-асфальтенових речовин. Елементний склад з'єднань, будова молекул вуглеводнів і їх молекулярна маса впливають на такі фізико-хімічні властивості масел, як

густина, в'язкість, температури кипіння і застигання, поверхнева активність та ін.

Масла із сірчаної нафти характеризуються відносно більш високим індексом в'язкості, кращими антикорозійними властивостями, але мають підвищену коксованість, що є їх недоліком. Багато сірчовмісних сполук є антиокислювачами. Крім того, сірчані сполуки нафти утворюють на поверхнях металів захисні плівки, що інгібують їх каталітичну дію на процес окиснення масла.

Нафтові вуглеводні - основна частина змащувальних масел - окиснюються порівняно легко і тому не можуть бути застосовані в чистому вигляді. Відносно швидке накопичення в процесі окиснення кислих корозійно - агресивних речовин підвищує корозійну активність нафтових вуглеводнів.

Дослідження протизношувальних властивостей монофракцій вуглеводнів, виділених з масел, свідчать про те, що специфічність маслам з погляду протизношувальних властивостей, як і з точки зору їх стійкості до окиснення, додають ароматичні вуглеводні, що містяться в них, особливо поліциклічні. Кількість поліциклічних ароматичних вуглеводнів у маслах порівняно невелика (5-10 %). Водночас у нафтовій сировині кількість поліциклічних ароматичних вуглеводнів у 2-2,5 рази більша. Отже, зміною технології отримання змащувальних базових масел можна звести до мінімуму втрати поліциклічних ароматичних вуглеводнів і одержувати масла з високими протіокислювальними і протизношувальними властивостями.

Сучасні деталі трибомеханічних систем часто експлуатуються в екстремальних умовах, де ефективність змащувальної дії не може бути забезпечена застосуванням вуглеводневих нафтових масел. Складне поєднання необхідних властивостей (незначні зміни в'язкості, високі змащувальні властивості в широкому інтервалі температур, хімічна стабільність, стійкість до старіння і окиснення) можуть мати тільки спеціальні синтетичні масла. З 1930 р. розроблено декілька класів органі-

чних сполук, які на сьогодні використовують як основу для синтетичних змащувальних матеріалів: поліефіри (полігліколи, поліфенілові ефіри); складні ефіри одно- і багатоосновних карбонових кислот і спиртів; складні ефіри фосфорної кислоти; силосани; ефіри кремнієвої кислоти; полігалогенопохідні вуглеводні; фторовмісні з'єднання, а також синтетичні вуглеводні - поліолефіни та алкітовані ароматичні з'єднання.

Синтетичні масла не завжди забезпечують реалізацію необхідних властивостей. Так, поліпропіленгліколи проявляють корозійну агресивність за наявності кислих продуктів, полігліколи характеризуються відносно низькою стійкістю до окиснення, складні ефіри проявляють більш яскраво виражену схильність до утворення емульсії з водою та ін., тому частіше використовують їх суміші з нафтовими фракціями. Поєднанням нафтового і синтетичного компонентів у ряді випадків можна одержати композиції, що проявляють певний синергічний ефект функціональної дії.

Перспективним напрямком створення нових змащувальних композицій є використання альтернативних видів базових основ рослинного походження, зокрема ріпакової олії. До складу ріпакової олії входять тригліцериди, складні ефіри і жирні кислоти (пальмітинова, стеаринова, олеїнова, ліноленова, ерукова та ін.), які підвищують мастильну здатність основи в умовах граничного мащення завдяки міцному зчепленню з металеву поверхню, що запобігає безпосередньому контакту пар тертя в триботехнічному контакті.

6.2.2 Функціональні присадки

Для поліпшення експлуатаційних властивостей масел і забезпечення надійної роботи механізмів у більшості змащувальних масел вводять спеціальні речовини. Органічні маслорозчинні продукти (понад 100 з'єднань) називають *присадками*, а тверді нерозчинні речовини неорганічного походження - *антифрикційними добавками*.

Більшість промислових присадок і їх композицій містить у своєму складі кисень, сірку, фосфор, азот, хлор, кальцій, барій, цинк, магній, стронцій і такі функціональні групи, як карбоксильна, гідроксильна, сульфогрупа, дитіофосфатна, аміногрупа, трихлорметильна і деякі інші.

Присадки вводять у масла в невеликих кількостях - від часток до декількох відсотків (у композиціях їх загальна концентрація становить до 15%), в'язкісні присадки можуть додаватися до 20-30%.

За функціональним призначенням присадки класифікують за такими групами:

1 *Антиокислювальні присадки* - сполуки, що подовжують індукційний період окиснення шляхом інгібування ланцюгових реакцій автоокиснення внаслідок утворення алкільних або пероксидних радикалів чи пасивацією металевої поверхні захисними плівками, попереджаючи її каталітичну дію. Антиокислювальними властивостями характеризуються такі органічні сполуки: сполуки сірки, селену, фосфору; похідні амінів, фенолу; лимонна і глюконова кислоти. Сучасні товарні масла можуть містити також антиоксиданти, серед яких диалкілдитіофосфати цинку і барію, іонол, агідол, борин, диалкілселеніди, дифеніламін, алкілфеноли, трибутил- і трикрезилфосфати, Oloa 267, IXП, ІНХП.

2 *Антикорозійні присадки* — інгібітори електролітичних реакцій взаємодії води і кисню з поверхнею металу. Якщо фізичні інгібітори внаслідок зворотної адсорбції утворюють на поверхні металу гідрофобний шар, то хімічні реагують з металом, утворюючи захисні плівки, які змінюють електрохімічний потенціал. Антикорозійними властивостями характеризуються такі компоненти: лужні азотні похідні, аміди жирних кислот, сірчані сполуки, похідні фосфорної та азотної кислот.

3 *В'язкісні присадки* - речовини, які поліпшують в'язкісно-температурні характеристики малов'язкої базової основи з високим індексом в'язкості шляхом зсуву в'язкісно-

температурної залежності еквідистантно в зону підвищених температур. Залежність в'язкості загущеного масла від концентрації присадки є експоненціальною:

$$lgv = lgv_0 + K \cdot C,$$

де v і v_0 - кінематична в'язкість загущеного і вихідного масел;

C - вміст присадки; K - коефіцієнт загущувальної здатності, що відображає вплив конфігурації і мобільності полімерних молекул.

В'язкісно-температурна залежність є важливим критерієм при виборі масла. В'язкість мінеральних або синтетичних масел знижується при підвищенні температури. Тому в кожному разі при вимірюванні в'язкості необхідно вказувати температуру, при якій проведено вимірювання. У лінійних координатах криві, що відображають залежність між в'язкістю і температурою, є гілки гіперболи, які несуттєво відрізняються одна від одної (рис. 1). Для отримання тих самих залежностей у вигляді прямих з достатньою точністю можуть бути використані математичні перетворення, наприклад, використання логарифмічних координат (рис. 2). У таких координатах досягається диференційована характеристика близьких за в'язкістю масел. Ще одна перевага логарифмічних координат полягає в можливості побудови повної залежності в'язкості від температури за даними двох точок - результатів вимірювання в'язкості при двох температурах. Для досягнення задовільної точності різниця температур між двома вимірюваннями під час побудови цієї залежності повинна становити не менше 50°C. При екстраполяції за межами вимірюваного діапазону (особливо у бік низьких температур) необхідно виключити фазові переходи, осадження і т. п., інакше можливі значні відхилення від розрахункових даних.

Як загущувальні присадки застосовують полімери, середня молекулярна маса яких знаходиться в межах 1000-25000. Розчини в'язкісних присадок характеризуються вла-

стивостями неньютонівських рідин - динамічна в'язкість змінюється залежно від зміни градієнта швидкості зсуву.

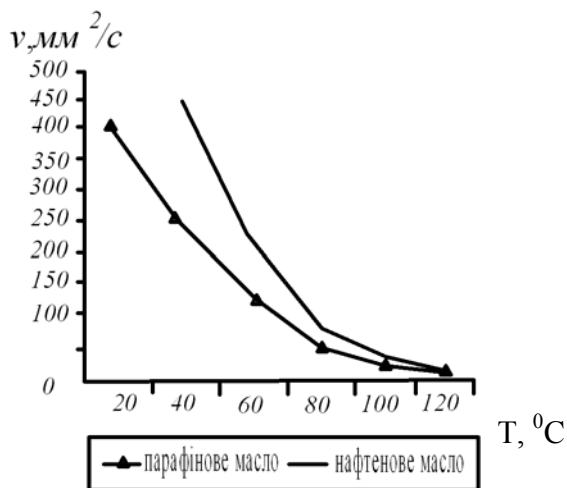


Рисунок 1- Залежність в'язкості від температури в лінійних координатах

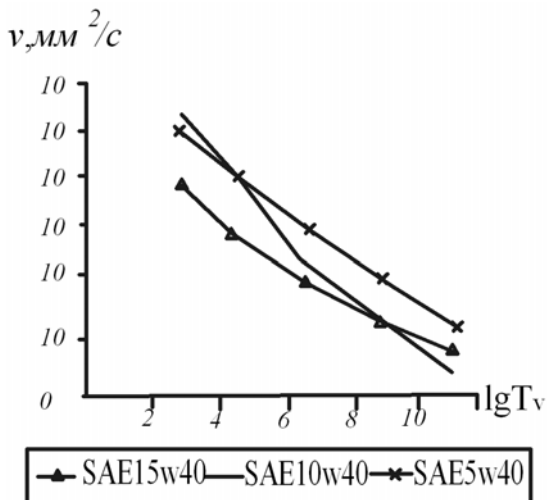


Рисунок 2 - В'язкісно-температурні характеристики моторних масел у логарифмічних координатах

Високі градієнти швидкості зсуву (до 10^{-6} с^{-1}), характерні для сучасних двигунів, і великі механічні навантаження в трансмісіях та інших важконавантажених вузлах можуть привести до втрати в'язкості загущених масел: тимчасової (унаслідок прояву неньютонівських властивостей) і постійної (унаслідок деструкції полімерних молекул).

Нині використовуються в'язкісні присадки таких типів: поліізо-бутени (LZ 7065, паратон 2225, гліссопал 2300, КП), поліметакрилати (віскоплекс, плексол, ПМА "Д"), поліолефіни, полімери дієнів (бутадієни, ізопрени).

4 *Депресорні присадки* - покращують низькотемпературні властивості масел шляхом перешкоджання утворенню структурного каркаса й агломерації кристалів парафіну в сітчастій структурі при від'ємних температурах. Найбільше застосування знайшли де-пресори поліметакрилатного типу - LZ 7745, ПМА "Д", Плексол 102, Плексол 704, Плексол 1455.

5 *Мийно-диспергуючі присадки* - зменшують відкладення продуктів окиснення, запобігають агломерації асфальтенів і коагуляції колоїдних частинок за механізмом зниження міжмолекулярних дисперсійних сил на поверхні забруднюючих частинок унаслідок утворення електростатичного бар'єра, знижують корозійний знос, нейтралізують кислі продукти згоряння палива.

Як мийні й диспергуючі присадки застосовують високолуужні сульфонати натрію, кальцію, барію, магнію, цинку (СК-11, СБ-3, ПМС, С-150, Хайтек Е-632, Лубрізол 65, Паранокс 24, ІХП-215, С-300Е, М-300Е), алкілсаліцилати кальцію, літію, натрію, магнію, барію (АСК, МАСК, АС-60С), алкілфеноляти (Паранокс 51, ЦІАТІМ), сукциніміди (дипол - 40 і 45, ЛЗ-325, Олоа 340С, С-5А, Олоа 1200, ІХП - 476) і ін.

Потрібно зазначити, що багато мийно-диспергуючих присадок характеризуються поліфункціональними властивостями, тобто, крім основних властивостей, проявляють

антиокислювальну, антикорозійну і протизношувальну активності.

б Протизношувальні і протизадирні присадки - речовини, що підвищують змащувальну здатність в умовах граничного і змішаного режимів тертя, запобігаючи інтенсивному зносу пар тертя в триботехнічному контакті внаслідок утворення адсорбційних шарів, хемосорбційних граничних плівок або хімічних з'єднань з металом, які перешкоджають схоплюванню поверхонь. Активними компонентами молекул є сірка, фосфор, хлор. Відомі також присадки, що містять свинець, сурму, молібден (у поєднанні з сіркою і фосфором).

Механізм дії сірковмісних присадок полягає в адсорбції молекул на поверхні металу, утворенні меркаптиду R-S-Me в результаті перебігу реакцій взаємодії вільних радикалів при розриві S - S зв'язку з активними атомами металу. При подальшому підвищенні температури відбувається розрив зв'язку C - S і утворення неорганічних плівок сульфідів заліза.

Хлоровмісні присадки, розкладаючись при підвищених температурах, виділяють атомарний хлор, який на сталевих деталях утворює плівки хлористого заліза, що має пластинчасту будову і характеризується протизношувальними властивостями.

Механізм триботехнічної дії фосфоровмісних присадок ґрунтується на тому, що при термічному розкладанні фосфор утворює легкоплавку евтектичну суміш фосфідів металів або відбувається утворення кислих органічних фосфінів на ювенільній поверхні металу, які забезпечують зниження зносу.

До протизношувальних і протизадирних присадок відносяться ДФ-1, ЛЗ-309/2, ДФ-11, ТР-17В, АБЕС, ЕФО, трикрезилфосфат, совол, Англамол 99. Необхідно зазначити, що більшість присадок цієї групи проявляють і антифрикційні властивості.

Для поліпшення експлуатаційних властивостей масел використовують також антипінні, деемульгуючі, припрацювальні та інші групи присадок.

6.2.3 Антифрикційні добавки

Антифрикційні добавки - високодисперсні частинки (1-20мкм) - речовини кристалічної пошарової будови, атомарні й тверді аморфні структури, які підвищують змащувальну здатність масел. До твердих антифрикційних добавок належать графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору, деякі селеніди, сульфіди та йодиди металів, високодисперсні порошки металів і їх оксиди. Перевагою твердих нерозчинних добавок є те, що їх дія проявляється як при низьких, так і при високих температурах.

Ефект підвищення триботехнічних характеристик - розширення навантажувально-швидкісного діапазону, зниження інтенсивності корозійно-механічного зношування - установлений при застосуванні нанорозмірних частинок (3-70 нм) або їх кластерів. До їх числа потрібно віднести ультрадисперсні алмази й ультрадисперсний алмазоподібний графіт, фулерени і фулереноподібні структури, ультрадисперсні кераміки на основі нітридів та оксинітридів перехідних металів - силалони, природні силікати і графіт.

Кристалічна решітка пошарових матеріалів, зокрема графіту, дисульфідів молібдену та вольфраму, характеризується анізотропією будови (рис. 3).

Плівки, утворені цими речовинами, здатні витримувати без руйнування навантаження до 3 ГПа, при цьому вони характеризуються низьким опором зсуву при дії тангенціального навантаження.

Варто зазначити, що під час створення та впровадження рецептури товарного масла необхідно враховувати, що підвищення експлуатаційних властивостей масел досягається не тільки введенням поліфункціональних присадок і добавок,

але й за рахунок вибору початкових властивостей базової основи і її сумісності з різними типами присадок.

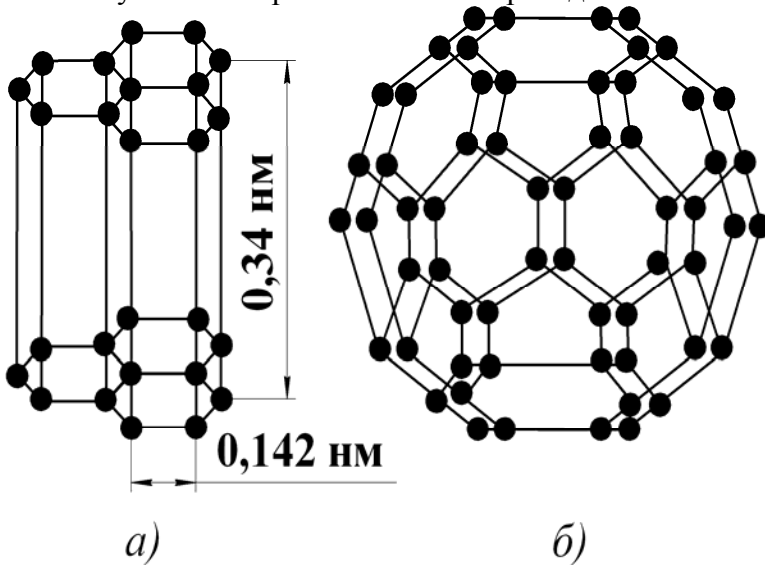


Рисунок 3 - Кристалічна структура графіту (а) та будова молекули фулерену C₆₀(б).

6.3 Основні характеристики твердих змащувальних матеріалів

У багатьох специфічних випадках у вузлах тертя не можуть застосовуватися газоподібні, рідкі й пластичні змащувальні матеріали. До таких випадків належать умови роботи вузлів тертя при температурах застигання масел і мастил, при високих температурах, які зумовлюють розкладання і випаровування мастила. До цих випадків відносять також умови, у яких неможливо застосовувати рідке середовище, наявність глибокого вакууму й дії іонізуючого випромінювання, недоступність поверхонь тертя для періодичного підведення до них змащувального матеріалу та ін. Наприклад, в авіаційній і ракетній техніці змащувальні матеріали повинні працювати в

широкому діапазоні температур (від - 240 до 900°C), у вузлах тертя ядерних реакторів змащувальні матеріали повинні характеризуватися високою радіаційною стійкістю, а у вузлах тертя космічних об'єктів вони повинні проявляти мінімальну летючість у вакуумі.

Необхідність змащування вузлів тертя машин і механізмів, що працюють у подібних умовах, визначила потребу в твердих речовинах, які характеризуються ефективною змащувальною здатністю. На сучасному етапі відома велика кількість природних і штучних твердих змащувальних речовин, які можна розділити на дві групи:

- *неорганічні*: пошарова структура (дихалькогеніди металів, графіт, фторований графіт, нітрид бору та ін.); непошарова структура (хлориди, фториди та йодиди металів, оксиди та ін.); м'які метали (Pb, Sn, Cd, In, Ga, Ag, Au);

- *органічні*: полімерні матеріали (політетрафторетилен, полііміди та ін.).

У табл. 6.1 представлені антифрикційні властивості різних груп твердих змащувальних матеріалів.

Найбільш широке застосування одержали тверді змащувальні матеріали - графіт і дисульфід молібдену.

У техніці *графіт* застосовується як змащувальний матеріал уже більше 120 років. Він характеризується діамантними властивостями, має гексагональну решітчасту структуру та анізотропну електропровідність, яка у напрямі гексагональної вісі у 25 разів більша, ніж в основній площині решітки кристала. Графіт проявляє високу хімічну стабільність і практично інертний до радіоактивного випромінювання. При нагріві на повітрі до температури вище 450°C він утворює CO₂, який виділяється, не залишаючи ніяких подрібнених частинок.

Таблиця 6.1 - Коефіцієнти тертя твердих змащувальних матеріалів для пари тертя плунжер - циліндр при питомому навантаженні 70 МПа

Група	Твердий мастильний матеріал	Коефіцієнт тертя		Наявність вібрації при терті
		при русі	у статичному стані	
	Без змащувального матеріалу	0,45	-	Існує
Неорганічні тверді мастильні матеріали з пошаровими структурами решітки	Дисульфід молібдену природний	0,050	0,053	Немає
	Дисульфід молібдену синтетичний	0,091	0,106	Немає
	Дисульфід вольфраму	0,091	0,106	Немає
	Графіт, колоїдний у воді (22%)	0,100	-	Немає
	Гідроксид барію	0,151	0,163	Немає
	Хлорид свинцю	0,191	0,214	Немає
Неорганічні сполуки	Бура	0,210	0,226	Немає
	Оксид свинцю -оксид цинку	0,25	-	Існує
Шари на поверхнях металу	Шар фосфату на поверхні сплаву залізо – марганець	0,213	0,218	Немає
	Шар фосфату на поверхні сплаву залізо - марганець, покритий шаром дисульфиду молібдену	0,067	0,074	Немає

Високі змащувальні властивості графіту пояснюються його пошаровою решітчастою структурою: слабкі сили Ван-дер-Ваальса між шарами вуглецю не перешкоджають ковзанню "площин" з атомів вуглецю. Низький коефіцієнт

тертя графіту, проте, визначається не тільки кристалічною структурою. Він також пов'язаний з адсорбованими плівками (особливо водяної пари), які утворюють поверхневий шар із слабкою когезією. Отже, найбільш сприятливі змащувальні властивості графіту проявляються за наявності вологи. В умовах вакууму графіт втрачає свої антифрикційні властивості; при цьому зворотна адсорбція конденсованої пари (пари води, бензолу, аміаку та ін.) значно знижує тертя і знос у глибокому вакуумі (табл. 6.2).

Електронно-мікроскопічні дослідження показують, що в процесі тертя пакети шарів графіту утворюють на змащувальній поверхні "ролики". При цьому відбувається орієнтація кристалітів паралельно поверхні з подальшим утворенням (при достатньо високому тиску) роликів, які забезпечують низький коефіцієнт тертя.

Таблиця 6.2 - Вплив вологості на коефіцієнт тертя (f) та знос графіту під час тертя по міді

Середовище	f	Знос, мм ³ /с
Вакуум	0,8	0,1
Пари води	0,18	<0,0001

Дисульфід молібдену (MoS_2) характеризується пошаровою структурою і кристалізується в гексагональну систему з тригональною симетрією. Він має твердість за шкалою Мооса 1,0-1,5 і вже більше 30 років застосовується як твердий змащувальний матеріал. Дисульфід молібдену характеризується високою хімічною стабільністю, він стійкий до більшості кислот і нечутливий до радіоактивного випромінювання. На відміну від графіту дисульфід молібдену проявляє ефективні змащувальні властивості навіть у глибокому вакуумі. У вакуумі він розкладається на молібден і сірку при 1100°C. Під тиском 1200 МПа він стиска-

ється до 60 % свого нормального об'єму і знову розширюється після зняття навантаження.

Змащувальні властивості дисульфїду молібдену, так само, як і графіту, зумовлені будовою його кристалічної решітки: слабкі зв'язки (сили Ван-дер-Ваальса) між шарами сірки дають змогу пластинкам вільно взаємно переміщатися, внаслідок чого знижується тертя між контактуючими поверхнями. З іншого боку, іонні зв'язки між атомами Мо і S надають шарам високої міцності - вони здатні протистояти продавлюванню з боку мікровиступів поверхонь тертя. У змащувальному шарі товщиною 2,5 мкм містяться 4000 шарів (S-Mo-S).

Залежно від навантажень, які діють у зоні контакту, досягаються коефіцієнти тертя в межах від 0,04 (при 140 МПа) до 0,02 (при 300 МПа). За наявності води коефіцієнт тертя MoS_2 і знос збільшуються. Таке явище можна пояснити утворенням водневих зв'язків на межі кристалів і утворенням сірчаної кислоти.

Крім розглянутих речовин, ефективними твердими змащувальними матеріалами, які характеризуються пошаровою структурою, є тетраборат натрію, хлорид кадмію, нітрид бору, йодид свинцю, хлорид кобальту, сульфат срібла і стеарат цинку. Можливо також використання сульфідів важких металів, селенідів і телуридів: MoSe_2 , WS_2 , MnSe_2 , NbS_2 , NbSe_2 , TaS_2 , AsSbS_4 і AsAsS_4 .

Здебільшого вони мають пошарову гексагональну структуру, високі антиокислювальні властивості й хімічну стабільність, електропровідність і застосовуються у вигляді порошків, суспензій і антифрикційних лакових покриттів (рис. 4). Ефективними змащувальними матеріалами для підшипників при температурах 800-900°C є *фталоцианіни*, які не містять металів. Вони характеризуються високою термічною стійкістю і несучою здатністю. Ефективні змащувальні властивості цих

сполук зумовлені утворенням поверхневої плівки із сильною адгезією до металу.

Фториди і хлориди. Фториди металів мають коефіцієнти лінійного розширення, близькі до коефіцієнтів лінійного розширення конструкційних сплавів на основі Ni, Cr, Co, і завдяки низькій твердості не викликають їх абразивного зношування.

Найбільше застосування мають фториди кальцію і барію, які використовують як покриття для жаростійких сплавів. Застосування фторидів металів обмежується температурою їх окиснення ($\sim 827^\circ\text{C}$).

Фторид кальцію хімічно стійкий у гарячому окислювальному і відновному середовищах, має кристалічну будову і характеризується низьким тиском випаровування та незначною розчинністю у воді.

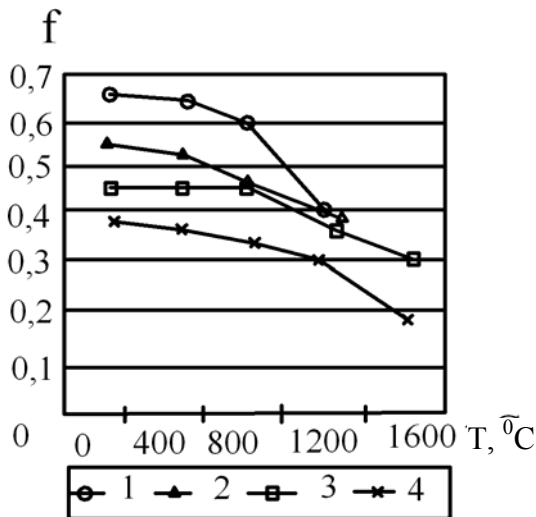


Рисунок 4 - Залежність коефіцієнта тертя f нітриду бору і графіту від температури t : 1 - плівка нітриду бору на бору; 2 - чистий нітрид бору, нанесений методом спікання; 3 - спектроскопічно чисті стандартизовані частинки графіту; 4 - товарний графіт

Суміші BaF_2 і CaF_2 застосовують як покриття на жаростійких сплавах (Ni, Ni-Cr-Co) або використовують для насичення розплавленою евтектикою BaF_2/ CaF_2 деталей, одержаних методом порошкової металургії. Покриття наносять також плазмовим методом при одночасному нанесенні суміші порошоків металу і твердих мастильних матеріалів або при послідовному нанесенні спочатку металевої композиції, а потім фторидного покриття. Максимальна робоча температура в повітряному середовищі комбінованих фторидних покриттів на жаростійких сплавах обмежується окисненням сплавів (у покритті ці сплави окиснюються швидше). Межа працездатності покриттів при тривалій експлуатації - $800^{\circ}C$, при короткочасній - $900^{\circ}C$.

М'які метали використовують як основи або компоненти покриттів на твердих конструкційних матеріалах. Їх антифрикційність визначається малим опором зрізу в тонкому шарі м'якого покриття при відносному русі поверхонь тертя під навантаженням. Суттєво, що з підвищенням температури для цих матеріалів відбувається зниження опору зрізу за рахунок зменшення їх твердості. Порошки м'яких металів і оксидів уводять як наповнювачі в композиційні антифрикційні матеріали і змащувальні матеріали. Потрібно зазначити, що як тверде змащувальне покриття використовуються тільки ті метали, які не наклепуються в межах робочих температур і не утворюють крихких твердих розчинів з тими металами, із яких виготовлені елементи трибоспряження. Якщо робоча температура металу вища за температуру рекристалізації, метал не наклепується. Зокрема, олово є ефективним змащувальним матеріалом для пар тертя, виготовлених із чавуну і сталі. Проте воно не придатне для нанесення на свинцеву бронзу, оскільки, дифундуючи в поверхневий шар, олово утворює крихкі кристали в мідній основі (в умовах низьких температур, при $T < - 12^{\circ}C$ спостерігається "олов'яна чума" – перетворення металу в "крихту"). Як твердий змащувальний матеріал можуть також застосовуватися свинець, індій, літій, срібло та інші метали і сплави.

Механізм тертя за наявності плівки з м'яких металів (за Ф.Боуденом) полягає в тому, що навантаження сприймається плівкою, яка протидіє своєму витісненню і захищає поверхні тертя від безпосереднього контакту. При терті зріз відбувається в об'ємі плівки, а оскільки її опір зрізу низький і фактична площа дотику елементів тертя завдяки наявності жорсткої підкладки також незначна, коефіцієнт тертя залишається низьким.

Органічні полімерні матеріали, такі, як поліетилен, полііміди та інші, у чистому вигляді не виявляють ефективних антифрикційних властивостей і використовуються як зв'язувальні у твердих змащувальних матеріалах або основи композиційних антифрикційних матеріалів. *Політетрафторетилен (ПТФЕ)* - термопластичний матеріал. Він характеризується унікальними природними антифрикційними властивостями, надзвичайно хімічно стійкий, не змочується більшістю рідин, не горить. ПТФЕ має змішану кристалічну і аморфну структуру, причому ступінь кристалічності може досягати 90%. Взаємодія між молекулами і кристалами ПТФЕ здійснюється слабкими Ван-дер-Ваальсовими силами, що й забезпечує його високу антифрикційність. Під час тертя молекули ПТФЕ переносяться на поверхню контртіла, орієнтуються уздовж напрямку ковзання, надалі тертя здійснюється між однойменними матеріалами. У чистому виді ПТФЕ при терті під навантаженням схильний до значної залишкової пластичної деформації, має великий знос, тому практично не застосовується. ПТФЕ виробляють у вигляді порошку і суспензії.

Тверді змащувальні матеріали наносяться на поверхні тертя деталей натиранням до утворення плівки необхідної товщини; методом ротапринта (в отвір одного з контактуючих тіл поміщається стрижень із твердого змащувального матеріалу, який наноситься на поверхню іншого в процесі тертя); електролітичним осадженням; термохімічним способом; термодифузійною обробкою; напиленням у вакуумі. Тверді змащувальні матеріали вводяться до складу композиційних матеріалів,

залежно від зносу контактних поверхонь вони надходять до зони тертя й утворюють плівки на поверхнях або вводяться в пористі матриці.

До твердих змащувальних матеріалів для забезпечення ефективних антифрикційних і протизношувальних властивостей ставляться такі основні вимоги:

- низький опір зрізу. Ця властивість безпосередньо пов'язана з твердістю покриття, виняток становить група речовин пошарової структури, яка характеризується анізотропією механічних властивостей у різних напрямках кристалічної решітки, що зумовлює у напрямі базових площин достатньо низький опір зрізу;

- висока адгезія матеріалу покриття до основи;

- мінімально можлива товщина шару покриття, що забезпечує незмінність геометрії вузла тертя під час пластичної деформації. При цьому має місце менший номінальний контакт на поверхні тертя і менше тертя;

- високий опір зношуванню, що залежить від перелучених вище властивостей;

- відсутність корозійної дії на метали;

- висока температурна стійкість, тобто здатність зберігати низький коефіцієнт тертя і малий знос при різних температурних режимах навколишнього середовища і температурі на поверхні тертя.

6.4 Мاستила

Пластичні мастила займають проміжне положення між рідкими і твердими змащувальними матеріалами. Мастила за складом є багатокомпонентними колоїдними системами, що містять дисперсійне середовище - рідку основу (70-90%), дисперсну фазу - загусник (10-15%) та добавки - присадки і наповнювачі (1-15%), призначені для поліпшення експлуатаційних властивостей. Структурний каркас складається з утворених загусником волокон діаметром близько 0,2 мкм і довжиною від 2 до 100 мкм. Ка-

ркас запобігає розтіканню дисперсійного середовища по поверхні твердого тіла. Масло міцно утримується в його об'ємі в основному завдяки адсорбційній взаємодії. Під дією навантаження каркас руйнується, і з його об'єму видавлюється дисперсійне середовище. Після зняття навантаження структура каркаса не відновлюється, якщо вона конденсаційна (утворюється після охолодження розплаву). Можливе також часткове або повне відновлення структури (тиксотропний змащувальний матеріал), зумовлене зближенням частинок загусника на відстань міжмолекулярної взаємодії.

Як *дисперсійне середовище* використовують синтетичні і мінеральні масла. Тип дисперсійного середовища визначає температурний інтервал експлуатації, навантажувальні та швидкісні характеристики мастил, їх антикорозійні властивості, в'язкість при від'ємних температурах, втрати на випаровування, пусковий крутний момент.

Найширше (понад 90%) застосовуються мінеральні масла. Високов'язкі масла застосовуються під час виробництва мастил для низькошвидкісних підшипників і трансмісій, які експлуатуються при високих навантаженнях і температурі. Вони знижують втрати змащувального матеріалу на випаровування, забезпечують ефективні адгезійні властивості і водостійкість. Введення малов'язких масел сприяє ефективному зниженню пускового моменту і робочої температури, підвищенню текучості мастила в зону контакту пар тертя. Мастила на основі мінеральних масел працюють у вузлах тертя, об'ємна температура деталей яких знаходиться в інтервалі від - 60 до + 150°C.

Для вузлів тертя, які працюють у температурному режимі за межами зазначеного інтервалу, як дисперсійне середовище застосовують синтетичні масла. Температура експлуатації таких мастил може перевищувати 350°C, проте внаслідок високої вартості їх застосування обмежене.

Максимальною термостійкістю (до 500°C), ефективною змащувальною здатністю і стійкістю до дії хімічно активних середовищ характеризуються фтор- і фторхлорвуглеводневі масла.

Хімічна активність, розчинність у маслі й температура плавлення *загусника (дисперсна фаза)* значною мірою визначають експлуатаційні властивості мастил. Зокрема, такі властивості, як температура каплепадіння, водостійкість, ущільнювальна здатність мастила, залежать тільки від загусника. Відповідно до типу загусника мастила класифікують за чотирма групами: мильні, на неорганічних загусниках, на органічних загусниках і вуглеводневі.

Найбільш поширеним загусником є металеві мила - солі жирних кислот і металів. Металеві мила є поверхнево-активними речовинами, тому вони виконують не тільки роль каркаса, але і додають змащувальному матеріалу протизношувальні і протизадирні властивості. Найчастіше застосовують кальцієве та літієве мило, рідше - алюмінієве, барієве і натрієве.

Найнижчу вартість мають кальцієві мила, що забезпечило їх порівняно широке застосування. Вони забезпечують мастилам водостійкість, адгезію до контактних поверхонь і змащувальні властивості при низьких температурах експлуатації. Використовуються для низькошвидкісних вузлів тертя і при температурах, що не перевищують 80°C.

Найбільш широке поширення знайшли літієві мила, які характеризуються високою межею міцності та стійкістю до окиснення, структурною стабільністю, ефективними антикорозійними, протизношувальними та протизадирними властивостями. Застосовуються в інтервалі температур від - 50 до + 130°C.

Крім перелічених, використовуються мастила, загущені змішаними милами, які складаються з суміші простого металеві

вого мила з різними катіонами. Це натрій - кальцієві, літій - кальцієві, натрій-літій-кальцієві мила.

Присадки, які вводяться в мастила, є поверхнево-активними речовинами, призначеними для поліпшення їх триботехнічних, хімічних та реологічних властивостей. *Нановнювачі* вводять у мастила для підвищення допустимих навантажень і поліпшення триботехнічних характеристик мастил. Найбільш поширеними з них є графіт, дисульфіди і диселеніди металів, тальк, порошки пластичних металів, віск торф'яний і буровугільний.

Принципові відмінності пластичних мастил від рідких масел пов'язані з наявністю в мастилах загусників і визначаються:

- наявністю межі міцності, внаслідок чого мастила в стані спокою не течуть і набувають здатності текти тільки за певних умов;

- здатністю мастил відновлювати свою структуру і властивості після зняття навантаження, яке зумовило їх руйнування;

- аномальним внутрішнім тертям, у зв'язку з чим в'язкість мастил залежить не тільки від температури, але й від механічних параметрів, при яких проявляється текучість.

За призначенням пластичні мастила поділяють на антифрикційні, консерваційні, ущільнювальні та спеціального призначення (канатні, фрикційні, припрацьовуючі та ін.).

7 ВИДИ МАЩЕННЯ В ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

7.1 Діаграма Герсі-Штрибека

У триботехніці розрізняють такі види мащення: газове, рідинне, тверде, гідро - і газодинамічне, гідро - і газостатичне, еластогідродинамічне, граничне і змішане.

Залежно від товщини змащувального шару визначають вид мащення і природу змащувальної дії за критерієм λ :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

де h - товщина змащувального шару; R_a - середнє арифметичне відхилення профілю контактуючих поверхонь.

Класифікація режимів мащення згідно зі значенням λ така: $\lambda = 0-1$ - напівсухий; $\lambda = 1-1,5$ - граничний; $\lambda = 1,5-3$ - змішаний; $\lambda = 3-4$ - еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний); $\lambda > 4$ - гідродинамічний.

Інформативним показником умов переходу від сухого режиму мащення до гідродинамічного є діаграма Герсі - Штрибека (рис. 5), яка графічно відображає залежність коефіцієнта тертя від критерію Зоммерфельда $\eta\omega/\rho$, де η - динамічна в'язкість мастильного матеріалу, ω - кутова швидкість, ρ - навантаження.

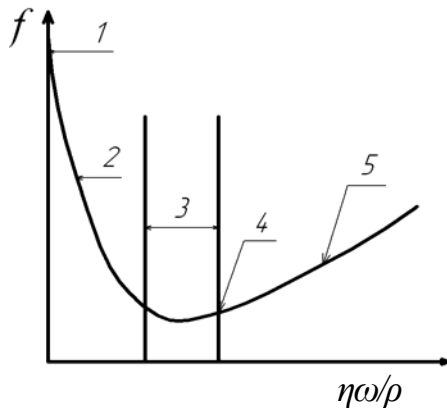


Рисунок 5 - Діаграма Герсі-Штрибека: 1 - сухий; 2 - граничний; 3 - змішаний; 4 - еластогідродинамічний; 5 - гідродинамічний режими мащення

7.2 Тертя без змащувального матеріалу

Сухий режим мащення (тертя без змащувального матеріалу) реалізується тоді, коли контактні поверхні покриті тільки окисними плівками або адсорбованими плівками води і газу. Даний режим мащення реалізується в гальмівній системі, фрикційних передачах і вузлах тертя, де неприпустиме використання змащувальних матеріалів (машини текстильної, харчової, хімічної промисловості) або їх застосування неможливе внаслідок високої температури в зоні контакту.

При сухому мащенні тертя має молекулярно-механічну природу. На ділянках фактичного дотику діють сили молекулярного тяжіння, що проявляються на відстанях, які в десятки разів перевищують міжатомну відстань у кристалічних решітках, і збільшуються з підвищенням температури. Молекулярні сили зумовлюють прилипання або адгезію контактних поверхонь у місцях фактичного дотику. Плівки оксидів, волога і забруднення металевих поверхонь впливають на коефіцієнт тертя неоднозначно. Сили молекулярного тяжіння між ними можуть бути в сотні разів меншими, ніж при взаємодії ювенільних поверхонь. Крім того, міцність оксидів, як правило менша за міцність основного матеріалу, так що опір зрізу частинок при переміщенні разом із силами молекулярної взаємодії значно знижується і коефіцієнт тертя падає. Однак збільшення товщини плівки оксидів щодо оптимального значення призводить до підвищення площі фактичного контакту, причому, якщо це зростання проходить швидше, ніж зменшення механічної складової сили тертя, то створюються умови для збільшення коефіцієнта тертя.

Сухе тертя супроводжується стрибкоподібним переміщенням поверхонь, із чим пов'язані вібрація автомобіля під час вмикання зчеплення, "ривки" при гальмуванні, вібрація різців при різанні і порушення плавності роботи повільно рухомих деталей.

Здебільшого для вузлів тертя, які працюють без змащувальних матеріалів, одне з тіл тертя виготовляють з композиту, що містить тверду змащувальну речовину (дисульфід молібдену, диселенід вольфраму, графіт) або пластичні метали. Тверді змащувальні матеріали, які характеризуються пошаровою структурою і низьким опором зсуву, знижують силу тертя та інтенсивність зношування контактних поверхонь.

7.3 Гідродинамічний режим мащення

Гідродинамічний режим - це режим змащувальної дії, що характеризується наявністю рідинного мащення, при якому повне розділення поверхонь тертя здійснюється внаслідок тиску, що виникає в шарі рідини при відносному русі цих поверхонь (гідро - і газодинамічне мащення) або під дією зовнішнього тиску (гідро - і газостатичне мащення). При рідинному терті поверхні повністю розділені шаром масла, що знаходиться під тиском. Тиск масла в зазорі врівноважує зовнішнє навантаження, забезпечує рівномірність розподілу напруг у поверхневому шарі матеріалу деталі. Відносне переміщення поверхонь відбувається за наявності тертя в рідкому прошарку. Опір цьому переміщенню визначається внутрішнім тертям у шарі масла. Цьому режиму тертя притаманний досить малий коефіцієнт тертя, зношування деталей при рідинному терті може бути відсутнім або досить незначним. Про рідинне тертя говорять, як про режим досконалого мащення, що забезпечує максимальну довговічність вузла тертя.

Необхідною умовою існування гідродинамічного режиму мащення є розділення контактуючих тіл шаром змащувального матеріалу, товщина якого перевищує сумарну висоту найбільш високих нерівностей поверхонь, що сполучаються. Для реалізації гідродинамічного режиму мащення також необхідна наявність таких умов: зміна градієнта швидкості, а отже, і дотичних напруг по довжині змащувального шару (за постійної густини рідини ця умова справедлива при змінній товщині змащуваль-

ного шару, тобто за наявності клиноподібного зазора між парами тертя) і створення градієнта тиску уздовж змащувального шару, у напрямі руху потоку рідини.

Перелічені вимоги задовольняють ряд вузлів тертя: вал - підшипник ковзання, плунжер - втулка, циліндр - поршень гідравлічних пристроїв і подібні.

При обертанні валу і наявності внутрішнього тертя в рідині відбувається її безперервне зтягування в зазор, що звужується, тобто вал діє як насос, який забезпечує безперервну циркуляцію рідини. Зтягування мастильного матеріалу у звужуючу частину зазора призводить до виникнення в його об'ємі надмірного нормального тиску (p) на поверхню рідини. Максимальне значення тиску досягається в перетині, розміщеному поблизу мінімального зазора. Цей перетин зміщується у напрямі обертання валу під дією позитивного градієнта тиску (dp/dx) до того часу, поки рівнодіюча сил нормального тиску і тертя, що діє з боку рідини, не зрівноважить прикладене до валу зовнішнє навантаження. Як тільки в змащувальному шарі підшипника створюється тиск, який виявляється достатнім для урівноваження зовнішнього навантаження і відділення валу від підшипника, - вал спливає на тонкому змащувальному шарі. У частині зазора, що розширюється, тиск у рідині падає. Варто зазначити, що несуча здатність (вантажопідйомність) змащувального шару розміщується так, що його протяжність у зоні звужувального зазора буде значно більшою, ніж у зоні розширення, а еюра розподілу тиску в масляному шарі по площі контакту буде несиметричною.

Фундаментальною основою, за якою побудована теорія гідродинамічного мащення, є рівняння О. Рейнольдса, яке в спрощеній формі має вигляд

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \frac{dP}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(h^3 \frac{dP}{dy} \right) = 6U\gamma_1 \frac{dh}{dx}$$

де x і y - взаємно перпендикулярні координати;

P - тиск усередині мастильного шару;

- h - товщина плівки;
- U - швидкість ковзання;
- η - динамічна в'язкість масла.

З рівняння Рейнольдса виходить, що несуча здатність змащувального шару є функцією його товщини (h), швидкості ковзання (U) і динамічної в'язкості (η). Що менша товщина шару (зазор), то вища його вантажопідйомність. Тому в конструкціях передбачають зазор між валом і підшипником близько 0,001 радіуса валу. Потрібно враховувати, що мінімальний зазор між поверхнями тертя повинен перевищувати суму висот найбільш виступаючих нерівностей цих поверхонь, інакше можливий перехід до еластогідродинамічного або змішаного режиму мащення.

Мінімальна товщина шару, при якій ще зберігаються умови для гідродинамічного мащення, може бути орієнтовно визначена за формулою

$$h_{\min} = 0,57 \frac{\eta U d l}{n N},$$

де l - довжина підшипника ($l \gg d$); N - навантаження.

При виведенні рівняння потоку масла припускають, що:

- об'ємними, гравітаційними, інерційними силами можна нехтувати;
- масло є ньютонівською нестискуваною рідиною, в'язкість постійна;
- тиск за висотою тонкого масляного шару розглядаєть як постійний;
- кривизна поверхонь підшипника порівняно з товщиною плівки незначна;
- ковзання по межі рідина - тверде тіло або газ - тверде тіло відсутнє;
- потік масляного шару розглядається як ламінарний.

Механізм тертя при рідинному мащенні складніший, ніж це впливає з гідродинамічної теорії, що охоплює чисто механічний бік процесу. Зокрема, шар масла у поперечному напрямку неоднорідний і складається з моно- або полімолеку-

лярного граничного адсорбційного шару; до граничного шару примикає зона мікротурбулентного руху, за якою йде ламінарний потік масла. Опір руху гідродинамічно змащеної системи визначається дотичними напругами в рухомій рідині.

Згідно із законом Ньютона сила тертя в розглянутій системі визначається рівнянням

$$F = \eta \frac{dV}{dy} S,$$

де η - динамічна в'язкість рідини;

dV/dy - градієнт швидкості зсуву рідини в зазорі між тілами тертя по нормалі до вектора швидкості;

S - площа зсуву.

Коефіцієнт пропорційності η називається *коефіцієнтом в'язкості*, і рідини, що підпорядковуються закону пропорційності між дотичною напругою (τ) і швидкістю зміни градієнта зсуву (dV/dy), при якому виконується умова

$$\tau = F/S = \eta(dV/dy)$$

відносять до класу *ньютонівських рідин*.

7.4 Реологічні властивості мастильних середовищ

Вивченням в'язкісних властивостей матеріалів при дії різних зовнішніх умов займається реологія.

Реологія - це розділ фізики, що вивчає плинність і деформацію реальних суцільних середовищ, які характеризуються в'язкістю, пластичністю, пружністю. Реологія займає проміжне положення між гідродинамікою і теорією пружності.

В'язкість будь-якої дисперсної системи залежить від таких основних чинників:

- концентрації дисперсної фази;
- в'язкості рідкої фази;
- розміру і конфігурації частинок;
- агрегації частинок;
- розчинених у рідкому середовищі макромолекулярних речовин;

- вмісту емульгаторів і поверхнево-активних речовин.

У реології розрізняють так звані *ньютонівські* рідини, які характеризуються тим, що при незмінній температурі їх в'язкість залишається постійною незалежно від швидкості зсуву, при якій проводиться вимірювання в'язкості, і неньютонівські рідини. При ньютонівській плинності рідких середовищ швидкість зсуву завжди прямо пропорційна дотичній напрузі зсуву (рис. 6).

У природі величезна кількість рідин не підлягає закону плинності рідини Ньютона, тому що їх в'язкість залежить від швидкості зсуву (полімерні розчини, суспензії, емульсії, мастила). Ці види рідин відносять до класу *неньютонівських*, для яких зв'язок між градієнтом швидкості зсуву та дотичною напругою описується нелінійними складними залежностями (рис. 6).

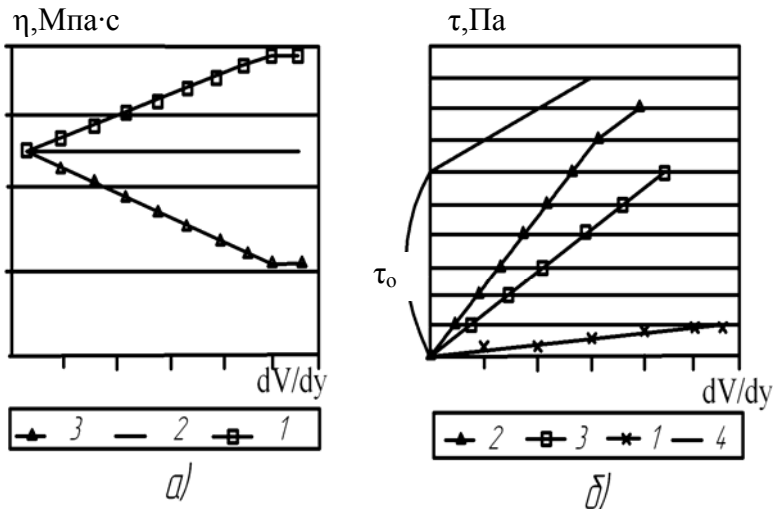


Рисунок 6 - Залежність в'язкості мастильних матеріалів (а) та напруг зсуву (б) від градієнта швидкості зсуву: 1 - дилатантні, 2 - ньютонівські, 3 - псевдопластичні, 4 - пластичні речовини

Унаслідок взаємодії частинок неньютонівські рідини мають складну будову й тією чи іншою мірою структуровані залежно від характеру взаємодії складових компонентів.

Розрізняють декілька видів неньютонівських рідин, а саме:

- *пластичні* (рідина, або тверде тіло Бінгама) - у таких видах рідин потрібно докласти деяке початкове зусилля для того, щоб почалася їх плинність, після чого залежність у координатах напруга зсуву - швидкість зсуву стає прямолінійною. В'язкість таких рідин при низьких швидкостях зсуву дуже велика, а при зростанні цього параметра швидко зменшується і характеризується двома константами, а саме: пластичною в'язкістю і граничною напругою зсуву. Прикладом таких систем є пластичне тверде тіло, наприклад, мастило, яке характеризується текучістю тільки при напрузі зсуву, що перевищує граничну межу текучості τ_0 ;

- *псевдопластичні* - рідини, у яких в'язкість змінюється відповідно до швидкості зсуву, і будь-яка зміна в'язкості характеризує так звану в'язкість, що дійсна тільки для даної швидкості зсуву. В'язкість псевдопластичної рідини здається високою при низьких швидкостях зсуву і зменшується при збільшенні швидкості зсуву. Такими властивостями характеризуються каучуки і пластичні матеріали, що містять анізотропні несиметричні компоненти, взаємодія між якими ослаблюється при зростанні швидкості зсуву;

- *дилатантні* - рідини, які характеризуються зростанням в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву. За таких умов що сильніше перемішується рідина, то більше вона стає в'язкою, тобто напруга зсуву збільшується швидше, ніж швидкість зсуву. Такі властивості проявляються в суспензіях з великим вмістом твердої фази, що зумовлено збільшенням сили тертя між структурованими компонентами зі зростанням швидкості. Масел, здатних до збільшення об'єму (зростання в'язкості під дією напруги зсуву), у природі поки що не ви-

явлено. Це явище можливе в разі недостатньо ретельного розмішування присадок у маслі під час їх виробництва.

Відомо, що в'язкість неньютонівських рідин може залежати не тільки від величини швидкості зсуву, але й від тривалості її дії. Ця властивість називається *тиксотропією*. Наприклад, при швидкому перемішуванні в'язкість тиксотропної рідини може помітно зменшитися, а при знятті зрушувальних зусиль тиксотропна структура поступово відновлюється до початкового стану. Тривалість відновлення початкової структури (*релаксація*) для різних рідин може розрізнятися за часом та залежить від їх хімічної природи і особливостей внутрішньомолекулярних взаємодій.

У табл. 7.1 представлені визначальні рівняння ньютонівських і неньютонівських рідин, використання яких дає змогу уточнити класичну теорію Рейнольдса.

Таблиця 7.1 - Ньютонівські і неньютонівські рідини

Тип мастильного матеріалу	Визначальне рівняння
Ньютонівська рідина	$dV/dy = \tau/\eta$
Неньютонівські рідини	
1) пластична (рідина, або тверде тіло Бінгама)	$dV/dy = (\tau + \tau_0)/\eta$
2) псевдо пластична	$dV/dy = (\tau/\eta)^{1/N}$ при $N < 1$
3) дилатантна	$dV/dy = (\tau/\eta)^{1/N}$ при $N > 1$

Чисті мінеральні й синтетичні масла з різними молекулярними масами є ньютонівськими рідинами, що не втрачають своїх властивостей при швидкостях зсуву аж до 10^6 c^{-1} , які можуть розвиватися у віскозиметрах у лабораторних умовах. Уведення до базових масел присадок, більшість із яких є ньютонівськими рідинами, може призводити до створення структурної в'язкості (тобто перетворювати масла на неньютонівсь-

кі рідини). Це характерно для моторних, індустріальних і трансмісійних масел, що містять високомолекулярні в'язкісні та мийно-диспергуючі присадки. Мила і колоїдні частки, залишкові продукти згоряння, дисперговані в працюючих моторних маслах, також додають маслам неньютонівських характеристик. В'язкість таких масел під дією напруги зсуву ніколи не знижується до рівня в'язкості базового масла, що необхідно враховувати при виборі змащувального матеріалу для триботехнічної пари.

7.5 Еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення

Теорію еластогідродинамічного мащення можна визначити як вивчення умов, при яких пружна деформація контактуючих тіл відіграє істотну роль в гідродинамічному процесі мащення. У більшості машин і механізмів сили передаються від однієї деталі до іншої через великі опорні площі, але часто бувають і зосереджені лінійні або точкові контакти. Типовими прикладами останніх є зубчасті передачі й підшипники кочення. Установлено, що значна кількість навантажених контактів із нещільним приляганням поверхонь поводить ся так, ніби вони гідродинамічно змащені, проте розроблена Рейнольдсом теорія взагалі не давала можливості пояснити, чому в найжорсткіших за рівнем напруг умовах повинно існувати подібне мащення. Наприклад, при лінійному контакті шестерень евольвентного зачеплення передбачається високий тиск (оскільки площа, по якій передаються сили, прямує до нуля), і якщо не враховувати пружної деформації зуба шестерні, то важко уявити, що масло здатне протистояти такому тискові. Проте якщо допустити залежність в'язкості масла від тиску і пружну деформацію дотичних твердих тіл, то можна показати існування задовільного мащення в таких умовах, що підтверджено багатьма експериментальними даними.

Еластогідродинамічний (ЕГД) режим мащення реалізується в триботехнічному контакті за умов, коли сила тертя і товщина змащувального шару в зоні контакту поверхонь, які знаходяться у відносному русі, визначаються пружними деформаціями поверхонь та залежністю в'язкості мастильного матеріалу від тиску.

Зазначені чинники забезпечують гідродинамічний режим мащення в більш напружених режимах, ніж це можливо в класичній гідродинамічній теорії. ЕГД-мащення реалізується в парах тертя, які працюють при високих контактних навантаженнях, - зубчастих передачах, підшипниках кочення, деталях газорозподілу у двигунах внутрішнього згорання та ін.

Основи ЕГД-теорії розроблені А.І.Петрусевичем, А.М.Ертелем, А.Н.Грубіним, Д.С.Кодніром, М.В.Коровчинським та ін.

Механізм еластогідродинамічного мащення можна представити таким чином. Під час кочення або під час кочення з проковзуванням мастило втягується в зону контакту рухомими поверхнями. За деяких умов, аналогічних умовам виникнення гідродинамічного мащення між ковзаючими поверхнями, в масляному шарі утворюється підйомна сила. Внаслідок незначної протяжності зони контакту і великого тиску для сформованої масляної плівки характерна товщина того самого порядку, що й місцеві деформації контактуючих тіл. Ці деформації впливають на конфігурацію зазора.

Товщина змащувального шару в реальних вузлах тертя при еластогідродинамічному мащенні може значно перевищувати розрахункове значення, особливо при високому тискові, завдяки пружній деформації елементів трибоспряження. Збереженню товщини змащувального шару при важких режимах навантаження сприяє також те, що збільшення тиску зумовлює зростання в'язкості рідини. Мастильний матеріал не встигає виявити свою текучість (витікати із зони контакту), і внаслідок цього товщина змащувального шару зменшується неі-

стотно навіть при значному зростанні стискаючого навантаження. Для нестискуваної рідини залежність в'язкості від тиску виражається формулою Баруса

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p),$$

де η_0 - динамічна в'язкість рідини при атмосферному тискові;
 p - навантаження;
 α - п'єзокоефіцієнт в'язкості.

Обґрунтованість експоненціальної залежності підтверджується сильним зростанням в'язкості зі збільшенням тиску. Наприклад, при тиску по Герцу ~ 1 ГПа в'язкість мінерального масла зростає в 10^6 разів порівняно з її значенням за атмосферних умов.

При застосуванні гіпотези про ньютонівські властивості масла з використанням формули Баруса п'єзокоефіцієнт α є функцією типу масла, температури і тиску; але якщо масло хоча б у деяких точках зони контакту набуває неньютонівських властивостей, то α стає функцією додаткових параметрів - радіуса кривизни поверхонь тертя, швидкостей кочення і ковзання, що обмежує його практичне використання.

Відносна товщина шару масла на основі теорії подібності є функцією трьох безрозмірних параметрів

$$h/R = f(U, G, W),$$

де $U = \eta_0 V / E' R$ - безрозмірний параметр швидкості;

$G = \alpha E'$ - безрозмірний параметр матеріалу;

$W = F / E' R L$ - безрозмірний параметр навантаження.

Представлені розрахункові формули товщини ЕГД-плівки можна узагальнити залежністю

$$H = k U^a G^b W^c,$$

де значення k , a , b , c наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 - Розрахункові коефіцієнти для визначення товщини ЕГД-шару

Автори формули	Коефіцієнт				Похибка щодо формули Д. Доусона, %
	k	a	b	c	
А.М. Артель, А.І. Грубін	1,95	0,727	0,727	-0,091	+10
Д. Доусон	2,65	0,7	0,54	-0,13	-
Х. Кшемінські-Фреда	1,65	0,7	0,61	-0,12	+3
Б. Хемрок	3,07	0,71	0,57	-0,11	-4

Необхідно зазначити, що представлені залежності з високими показниками кореляції відображають властивості плівки в умовах чистого кочення або кочення з невеликим проковзуванням. При збільшенні частки проковзування слід коректувати формули за допомогою коефіцієнтів, залежних від неізотермічних процесів у триботехнічному контакті. Дані про зміни температур по ділянці дотику поверхонь тертя, одержані в різних умовах, показують важливість впливу швидкості ковзання і контактного тиску на температури поверхні кулі й мастильного матеріалу. Вони також свідчать про істотний вплив нагрівання в зоні входу, яке, у свою чергу, знижує в'язкість масла і п'езокоефіцієнт, тобто основні характеристики, що визначають товщину ЕГД-шару.

Ще однією робочою умовою, яка рідко враховується при розрахунках товщини мастильного шару, згідно з еластогідродинамічною теорією мащення, є підведення і розподіл масла в найближчих ділянках стосовно основної зони контакту. В багатьох експериментальних дослідженнях доведено, що недостатня кількість мастильного матеріалу істотно впливає на еластогідродинамічні характеристики системи. Більше того, цей вплив може виявитися вирішальним чинником для робочих характеристик деталей машин, оскільки

ки створюються передумови для реалізації масляного голудування в контакті).

7.6 Змішаний і граничний режими мащення

Якщо умови гомогенного тертя не виконуються, то за природою і за походженням визначальних його сил тертя режим мащення є гетерогенним, або змішаним. *Змішаним тертям* називається сума всіх або мінімум двох видів тертя. При цьому частина поверхонь пар тертя контактує безпосередньо (тертя без змащувального матеріалу), а частина розділена граничною плівкою (граничне мащення) або гідро- чи еластогідродинамічною плівкою змащувального матеріалу.

Змішане тертя має місце при малій швидкості руху і великих навантаженнях, при нестационарних режимах «пуск - зупинка». Змішане тертя характеризується комплексністю визначальних його сил і накладанням різнорідних функціональних залежностей. Так, у зоні тертя існують тільки окремі ділянки безпосереднього металевих контакту, поверхня яких незначна порівняно з номінальною площею тертя, а змащувальний матеріал у триботехнічному контакті характеризується об'ємними властивостями при товщині масляної плівки тільки більше 0,1 мкм.

Сила змішаного тертя визначається за формулою

$$F_{\text{зміш}} = F_{\text{сух}} - F_{\text{рід}} = f_0 N - \eta A (dV/dh),$$

де f_0 - коефіцієнт сухого тертя;

N - нормальне навантаження;

η - динамічна в'язкість масла;

A - площа тертя;

V - швидкість;

h - товщина плівки.

Визначаючи силу тертя при змішаному режимі мащення, необхідно враховувати, що вона поєднує складові сил тертя в декількох режимах, які різні як за фізичною природою, так і за характером залежності від таких параметрів, як тиск, швидкість, температура. Тому цей вид тертя не можна розглядати як суму його складників.

Під *граничним режимом мащення* розуміють тертя між твердими тілами за наявності на їх поверхні мастильного матеріалу. При цьому швидкість ковзання і питомий номінальний тиск такі, що підйомна сила, яка визначається гідродинамічними ефектами, незначна. Як наслідок, навантаження у контактуючих парах урівноважується зусиллями на дискретних ділянках силового контакту. В найпоширенішій теорії граничного тертя передбачається, що деяка частина цих зон не покрита плівкою масла, виникає сильна адгезійна взаємодія між контактуючими нерівностями, і сила тертя в основному визначається опором зрізу адгезійних з'єднань. Невелика частина тангенціального опору визначається в'язким опором зсуву плівок масла, що збереглися на ділянках силового контакту.

Граничне тертя визначається багатьма чинниками, серед яких:

- стан і властивості твердих поверхонь;
- кінетика адсорбційних процесів молекул змащувального матеріалу в зоні контакту і фізико - механічні властивості граничних шарів;
- ефективна товщина граничного шару, тиск, швидкість, температура;
- динамічна зміна та адаптація граничних шарів до умов навантаження, а також явища термічного розпаду молекул, хімічні реакції модифікації та окислення.

Необхідно зазначити, що численність і мінливість чинників, які впливають на параметри змішаного і граничного режимів мащення, представляють сукупність механо-фізико-

хімічних процесів гетерогенної системи трибологічних процесів, взаємозв'язок яких є найменш вивченим питанням трибології.

Трибологічний стан системи при граничному режимі мащення визначається процесами на поверхнях розділу тверде тіло - мастильний матеріал - тверде тіло, на які впливають чинники навколишнього середовища. Щоб зрозуміти механізми граничної змащувальної дії, потрібно розглянути фізико-хімічні процеси утворення проміжної захисної плівки між контактними поверхнями, яка здатна зменшити число безпосередніх взаємодій твердих тіл і характеризується низьким опором зсуву.

7.6.1. Механізми формування граничних змащувальних шарів

Структура граничних змащувальних шарів визначається як фізико-хімічними властивостями молекул, які утворюють плівки, так і станом та природою твердої поверхні. Граничні шари можуть мати різноманітну будову, проходячи всі форми структуризації від твердого кристалічного до рідкого стану. До числа основних типів будови граничних шарів належать пошарові (ламельярні) і решітчасті (ретикулярні) структури. Відомі структури гомогенні, побудовані з тотожних молекул, і гетерогенні. Джерелом ретикулярних структур є поліморфізм органічних молекул при їх адсорбції і молекулярній взаємодії. Густина покриття поверхні залежить від просторової структури молекул і положення полярної групи.

Лінійно-ланцюгові молекули з полярною групою на кінці ланцюга утворюють більш щільні покриття, ніж просторові молекули або молекули з полярною групою всередині ланцюга. Процес насичення адсорбційного шару супроводжується міграцією молекул внаслідок слабкості Ван-дер-Ваальсових сил фізичної адсорбції, що надає змащувальній плівці властивості "самозаліковування" при місцевих пошкодженнях.

Коефіцієнт тертя поверхонь, покритих адсорбованими плівками, зменшується зі збільшенням довжини аліфатичних молекул унаслідок підвищення когезійної взаємодії. Ефективність зниження сили тертя парами адсорбованих молекул з однаковою довжиною ланцюга зменшується в ряду: жирні кислоти, ефіри жирних кислот, спирти, вуглеводні. Антифрикційні властивості у ненасичених жирних кислот виражені менш яскраво, ніж у насичених.

Орієнтацію адсорбованих молекул розглядають здебільшого перпендикулярно до поверхні, у вигляді шарів смектичної структури, які утворюють "молекулярний ворс". Щодо нематичної структури молекул з довгими осями паралельно поверхні) у літературі відомостей недостатньо.

Оскільки утворення плівок відбувається за законами адсорбції, то воно залежить від концентрації полярних речовин у змащувальному матеріалі й температури. Найміцніші адсорбційні шари на металах утворюють поверхнево-активні речовини (ПАР): жирні кислоти, їх спирти та ефіри, тваринні й рослинні жири, аміді, аміни та їх похідні. Незважаючи на те, що мінеральні масла є сумішшю неактивних вуглеводнів, вони завжди забруднені органічними кислотами, смолами та іншими ПАР.

Граничні шари на контактних поверхнях можуть утворюватися із компонентів змащувального масла внаслідок *фізичної адсорбції, хемосорбції або трибохімічних реакцій*.

При *фізичній адсорбції* молекули мастильного матеріалу утримуються на поверхні металу за рахунок Ван-дер-Ваальсових поверхневих сил. Молекули моно - або полімолекулярних шарів за таких умов зв'язані слабо, і утворення плівки характеризується зворотним процесом. Полярні молекули приєднуються переважно у вертикальній орієнтації, наприклад, адсорбовані молекули стеаринової кислоти висотою 1,9 нм. Багато молекул зближуються гранично щільно і зміцнюють плівку поперечними когезійними силами. Ця

прилипаюча до поверхні тверда плівка з молекул, які зчіплюються між собою, здатна протистояти проникненню мікронерівностей і перешкоджати безпосередньому металевому контакту поверхонь тертя.

Фізичні адсорбційні граничні шари чутливі до температури, оскільки теплота обумовлює десорбцію, порушення орієнтації і плавлення плівки. Їх ефективність виявляється тільки при незначних об'ємних температурах і в умовах незначного тепловиділення під час тертя, тобто при малих навантаженнях і швидкостях.

Ефективність мастильної дії, крім адсорбційного чинника, залежить від хімічної взаємодії металу і компонентів змащувального матеріалу - *хемосорбції*. В цьому разі проходить хімічна реакція без видалення атома металу із кристалічної решітки.

Відомим прикладом хемосорбції є реакція утворення плівки "металевого мила" між молекулами жирних кислот і оксидом заліза на поверхні металу. Таке металеве мило має не тільки бажані властивості міцності на зріз, але і характеризується вищими температурами плавлення порівняно з чистими жирними кислотами. Наприклад, температура плавлення стеаринової кислоти становить 69°C , а її металевого мила - 120°C .

Граничні хемосорбційні шари забезпечують ефективну змащувальну дію при помірних навантаженнях, температурах і швидкостях, але втрачають свої властивості в тяжких умовах експлуатації внаслідок десорбції або плавлення плівки при сумісній дії робочих чинників і підвищеного тепловиділення в зоні контакту.

Якщо між атомами металу і молекулами мастильного матеріалу виникає *хімічна реакція*, при якій реалізується обмін валентними електронами й утворюється нова хімічна речовина, то відбувається формування хімічно модифікованих граничних плівок. Більшість хімічно реагуючих речовин містять у

молекулах атоми сірки, хлору, фосфору та ін. Вони утворюють на поверхні розділу плівки солей металів із низькою міцністю на зріз, але високою температурою плавлення, такі, як сульфіди, хлориди, фосфіди та ін. Так, ефективність галогеновмісних сполук виявляється в інтервалі температур 100 - 300°C, сульфідних плівок - до 800°C. Потрібно зазначити, що коефіцієнт тертя сульфідних плівок вищий за коефіцієнти тертя плівок із галогеновмісних сполук внаслідок їх вищого опору зсуву.

Хімічно модифіковані граничні шари ефективні при високих навантаженнях, температурах і швидкостях. Такі умови, як правило називають "передумовами до схоплювання", але найбільшу небезпеку серед них становлять високі температури.

Антифрикційні властивості розглянутих граничних шарів представлені на рис. 7. Крива 1 побудована для контактних поверхонь, змащених чистими базовими мінеральними або синтетичними маслами. Вона показує, що первинні значення

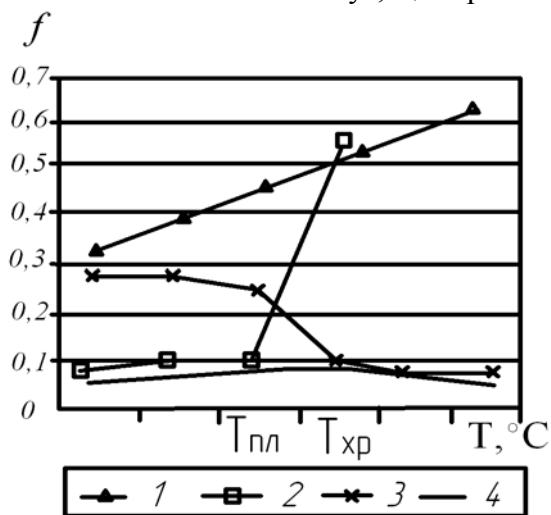


Рисунок 7 - Залежність коефіцієнта тертя триботехнічної пари при граничному мащенні від температури

коефіцієнта тертя достатньо високі, і в міру збільшення температури при напрацюванні цей параметр підвищується, оскільки слабкі адсорбційні зв'язки між компонентами масел і металевою поверхнею розриваються. Крива 2 відноситься до розчину жирної кислоти в базовому маслі. До температури плавлення металевого мила T_{nl} коефіцієнт тертя низький, але при зростанні температури, яка призводить до дезорієнтації граничної плівки, він різко зростає.

Крива 3 характерна для протизадирної присадки, розчиненої в базовому маслі, ефективність дії якої виявляється тільки вище температури хімічної реакції T_{xp} , при якій формуються хімічно-модифіковані шари.

Крива 4 - гіпотетична крива при ефективній комбінації варіантів 2 і 3: надійне мащення контактних поверхонь до температури T_{nl} забезпечується жирною кислотою, а вище цієї температури ефективна змащувальна дія забезпечується протизадірною присадкою.

Крім розглянутих видів граничних шарів, мастильна дія мінеральних і синтетичних масел характеризується виникненням особливого процесу генерації органічного продукту, що відкладається на контактних поверхнях у вигляді твердоподібних плівок.

Утворення *самогенеруючих органічних плівок (СОП)* є механо-хімічним окислювально-полімеризаційним процесом за участю кисню повітря при каталітичній дії активованого тертям металу. Механізм утворення СОП полягає у взаємодії макрорадикалів молекул масла з ювенільною поверхнею металу. СОП є високоякісним змащувальним матеріалом, що характеризується антифрикційними властивостями і протизношувальною ефективністю, які протидіють втомному зношуванню. СОП не втрачають ефективності в найважчих умовах тертя - при високих температурах і низьких швидкостях, де ні гідродинамічні, ні структуровані шари, ні мила не здатні забезпечити стабільну мастильну дію.

У міру формування та адаптації граничних шарів у процесі напрацювання в особливих умовах впливу твердої фази якісно змінюються реологічні характеристики змащувального матеріалу. В змащувальному шарі відбуваються складні молекулярні й надмолекулярні зміни, що призводять до структуризації вуглеводневих компонентів масла і переходу у нев'язкий структурований стан, характерний неньютонівським рідинам. А.С. Ахматов характеризує ці зміни як такі, що набувають "структурної в'язкості" асоційованих речовин напівколоїдного типу під дією поверхні металу. Утворені граничні шари характеризуються анізотропними властивостями: в тангенціальному напрямі молекулярні шари легко згинаються, і при товщині шару, яка перевищує деяке критичне значення, ковзають один щодо іншого, а по нормалі до твердої поверхні гранична плівка характеризується високим опором стиску, її несуча здатність обчислюється тисячами кілограмів на квадратний сантиметр. Квазікристалічні шари анізотропні в широкому інтервалі тиску і температур, що зумовлює їх високу несучу здатність і поліпшення антифрикційних та протизношувальних властивостей у контакті.

Механізм граничного тертя можна представити в такому вигляді. Під дією нормального навантаження граничний шар зазнає пружних деформацій. За певних умов можливі пружна і пластична деформація мікрорівностей контактних поверхонь і їх взаємне втілення, що не супроводжується руйнуванням адсорбованого мономолекулярного шару.

На окремих, найбільш навантажених ділянках контакту, а також у зонах локального нагрівання поверхонь можливі порушення суцільності граничного шару і виникнення адгезійної взаємодії між оксидними плівками елементів трибоспряження. На ділянках максимально навантажених мікронерівностей можливе руйнування не тільки адсорбційної, але й оксидної плівки, що призводить до виникнення ювенільних поверхонь та

зумовлює їх схоплювання. Найменш навантажені мікронерівності контактних поверхонь розділені полімолекулярним граничним шаром мастильного матеріалу. Загальний опір відносному переміщенню тіл тертя складається з опору зрушенню мономолекулярного граничного шару, оксидних плівок, ділянок схоплювання, полімолекулярного шару і опору деформованого матеріалу переміщенню втілених у його об'єм мікронерівностей контртіла.

8 ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ ЗАСВОЄННЯ ЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Контроль складається з 90 питань з курсу, що мають чотири відповіді, одна з яких правильна.

Оцінка ступеня засвоєння матеріалу здійснюється за програмою ПЕОМ на кафедрі ПМ і ТКМ СумДУ.

Контрольні запитання тестового контролю до СРС

Кожне запитання тестового контролю має чотири варіанти відповідей. Загальна кількість набраних балів і підсумкова оцінка відповіді здійснюються за програмою «Test-trivo» в комп'ютерному класі кафедри ПМ і ТКМ СумДУ.

1 Явище, викликане взаємодією дотичних поверхонь при відносному їх переміщенні, називається...

2 Поверхня тіла тертя володіє високою адсорбційною властивістю. Це забезпечується...

3 Види взаємодії металевих контактуючих поверхонь.

4 Основними вимогами до частинок абразиву при абразивному зношуванні є те, що вони повинні мати...

5 Для виготовлення гальмових пристроїв частіше за все використовують...

6 Тертя буває...

7 Релаксаційні коливання під час тертя, зони розсіювання енергії, реверсивне тертя і т.п. розглядається...

8 З теорії пружності відомо, що деформація спостерігається в основному шарі, який знаходиться на глибині ... плями дотику тіл тертя.

9 Природа тертя – це ...

10 Зношування металевих поверхонь викликається...

11 При наводненні поверхонь тертя та утворюванні мікротріщин спостерігається...

12 Агресивні рідини і газові середовища...

13 На поверхні контакту тертя діють сили міжмолекулярного притягання. Вони викликають...

14 Третє тіло – це...

15 Тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл у точках дотику різні за величиною і напрямком або за величиною, або за напрямком, називається...

16 Близько 80% виходу зі строю машин та механізмів пов'язані з...

17 До основних відхилень поверхні відносять...

18 Який вид зношування спостерігається у потоці рідини або газу, що рухається з великою швидкістю?

19 Який з основних видів руйнування поверхонь тертя характерний для загартованих або цементованих сталей?

20 У контактуючих металевих поверхнях внаслідок пластичної деформації відбувається наклеп. Яка температура необхідна для цього?

21 Тертя при граничному змащенні характеризується товщиною шару мастильного матеріалу...

22 Відношення сили тертя двох тіл до нормальної сили, що притискує ці тіла одне до одного, називається...

23 Фретінг – корозія є результатом...

24 Зовнішній шар, який за будовою та іншими властивостями, відрізняється від нижнього шару, називається...

25 Викришуванню, як одному із видів руйнування поверхонь тертя, сприяє...

26 Перенесення металу з однієї поверхні на іншу, в результаті якого утворюються широкі, глибокі борозни з нерівними краями, великі нарости, можливе повне оплавлення поверхонь називається...

27 Які переваги має нікелювання (як хімічне покриття) перед гальванічним покриттям нікелем як метод, що підвищує зносостійкість?

28 Найбільш вагомі зміни шорсткості поверхонь, які труться, відбуваються...

29 Сила тертя, будь-яке перевищення якої веде до виникнення руху, називається...

30 Тертя може відбуватися у таких середовищах...

31 Міцність плівки змащувального матеріалу залежить від...

32 Практично показано, що товщина деформованих поверхневих шарів при зовнішньому терті не перевищує...

33 Сукупність двох рухомих дотичних поверхонь деталей в умовах експлуатації називається...

34 Деструкція в полімері в процесі тертя відбувається...

35 Зношування внаслідок пластичної деформації характерне для...

36 Ресурс машин і механізмів визначається спеціальним параметром, який характеризує встановлений термін роботи та забезпечення виконання функціональних операцій або властивостей, і називається...

37 Тертя руху двох тіл, при якому їх швидкість у точках дотику однакова за величиною і напрямком називається...

38 Для зменшення тертя зношування полімерних матеріалів до них додають...

39 Коефіцієнт тертя кочення становить...

40 Для виготовлення валів, пальців, гвинтів, шариків і зубчатих коліс здебільшого використовують...

41 Проблеми корозії при терті розглядає...

42 Для зменшення сили тертя і (або) інтенсивності зношування на поверхні тертя наносять...

43 У результаті якого виду зношування відбуваються розхитування та вимивання окремих об'ємів матеріалу?

44 Чим відрізняється схоплювання від адгезії?

45 Рідкі змащувальні матеріали працездатні до максимальної температури...

46 Гідродинамічна теорія змащування описує явище тертя і зношування при...

47 Адгезія полімера до металу в процесі тертя збільшується внаслідок...

48 Строката структура, збагачена твердими структурними складовими, утворюється внаслідок...

49 Який розділ триботехніки здійснює прогнозування температури, навантаження у вузлах тертя?

50 Якщо температура поверхні, яка третя вище за температуру рекристалізації, тоді поверхня...

51 Назвіть сучасні школи триботехніків і трибоматеріалознавців.

52 Останнім часом виділяють такі розділи в триботехніці...

53 Трибомеханіка – розділ триботехніки, який вивчає...

54 Явище опору відносному переміщенню, яке виникає між тілами в точках дотику поверхонь по дотичних до них, яке супроводжується розсіюванням енергії - ...

55 Поверхня тіла, яка бере участь у терті, – це...

56 Тертя руху розподіляють на тертя...

57 Назвіть процент машин та механізмів, які виходять зі строю внаслідок зношування деталей та вузлів.

58 Назвіть правильний склад технологічних методів підвищення зносостійкості.

59 Поверхня деталі – це...

60 Якість поверхні деталі визначається...

61 Поняття «третє тіло» належать до...

62 Згідно з правилом позитивного градієнта механічних властивостей по глибині, зовнішнє тертя відбувається лише тоді, коли по поверхні тіла розміщені шари, які мають...

63 Товщина поверхневого шару, в загальному випадку, яка бере участь у процесі тертя, - ...

64 Мікровідхилення геометрії профілю хвилястої поверхні від геометричної форми – це...

65 Сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками по базовій довжині – це...

66 При контактуючих взаємодіях твердих тіл можливі такі види контактів...

67 Від чого залежить глибина взаємного проникнення?

68 Сила опору, яка спрямована протилежно зусиллю зсуву за відсутності зміщення на контакті, – це...

69 Коефіцієнт тертя являє собою відношення...

70 Під час тертя при граничному змащуванні сполучені поверхні розділені шаром змащувального матеріалу товщиною...

71 Наявність змащування знижує знос поверхонь, які труться, на...

72 Гідродинамічна теорія змащування описується умовою тертя зношування, у разі якого поверхні, які труться, розділені шаром... зміщеного матеріалу.

73 Під час тертя кочення спостерігається...

74 Коефіцієнт тертя (f) під час тертя кочення становить...

75 Сукупність двох рухомо дотичних поверхонь (деталей, зразків) в умовах експлуатації або випробування - це...

76 Величина зношування, при якій подальша робота у вузлах тертя неможлива, – це ... зношування.

77 Синергетичний ефект зношування описує...

78 Взаємодія металевих контактуючих поверхонь може бути...

79 Поверхні тертя збагачуються твердими структурними складовими і набувають стрічкової структури в результаті...

80 Пластична деформація при температурах нижче $T_{рек}$ викликає...

81 При локальному підвищенні температури в зоні тертя, а потім різкому охолодженні утворюються загартовані структури, які приводять до зміни механічних властивостей, а саме...

82 Структурні перетворення, пластична деформація, високі температури синергетично викликають...

83 Який вид руйнування поверхні спостерігається при достатньо глибокому впровадженні твердих частинок, пар тертя або продуктів зношування сполучених поверхонь?

84 Взаємодія полімерів під час тертя можлива...

85 Якого із нижчеперелічених видів зношування робочих поверхонь не існує?

86 Для яких елементів характерне зношування внаслідок ПД?

87 Основний вид боротьби проти окислювального зношування, - ...

88 Схоплювання поверхонь під час тертя реалізується за рахунок...

89 Якого з нижчеперелічених видів ерозії не існує?

90 Матеріали, які мають високий коефіцієнт тертя з матеріалом у сполученій парі, – це ... матеріали.

9 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ПРЕДМЕТА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ І ЗАВДАННЯ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНИХ РОБІТ З КУРСУ

Лабораторна робота 1

Установки для лабораторних випробувань на тертя і знос

1 МЕТА РОБОТИ

- 1.1 Вивчити етапи випробувань на тертя і знос.
- 1.2 Вивчити принцип роботи, будову, технічні можливості машини тертя УМТ-1.
- 1.3 Визначити відносну похибку вимірника частоти обертання шпинделя.
- 1.4 Визначити похибку вимірника сумарного числа обертів шпинделя.

2 УСТАТКУВАННЯ І ПРИЛАДИ

- 2.1 Машина тертя УМТ-1.
- 2.2 Прилади для визначення частоти обертання – тахометри ТЧ1-Р, ТЧ-10Р.
- 2.3 Зразки.

3 ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ

3.1 Види випробувань на тертя і знос

У зв'язку з наявністю великої кількості чинників, що впливають на показники тертя і зносу, вони виділені у такі групи.

1 Фізико-механічні властивості матеріалів і геометрія контактуючих поверхонь (твердість, модуль пружності,

адгезійні властивості, теплоємність, шорсткість поверхні і т.д.).

2 Експлуатаційні чинники (навантаження, швидкість, температура, навколишнє середовище і т.д.).

3 Конструктивні особливості вузла тертя (умови тепловідведення, розподіл температурних полів; епюра навантажень, зазори між деталями, що сполучаються, специфічні для кожного вузла тертя).

Відповідно до такого розподілу випробування на тертя і знос проводять у чотири етапи.

1 Фізико-механічні статичні лабораторні випробування матеріалів. Мета випробування – одержання фізико-механічних характеристик матеріалів і прогнозування за ними характеристик тертя (коефіцієнта тертя μ) і зношування (інтенсивність зношування I).

2 Випробування матеріалів на тертя і знос на лабораторних установках проводиться з метою оцінки впливу фізико-механічних властивостей матеріалів і режимів тертя (навантаження, швидкість і т.д.) на характеристики тертя і зношування.

3 Стендові випробування вузлів тертя. Мета випробування – оцінка впливу конструктивних особливостей вузла тертя.

4 Натурні випробування. Проводяться з метою виявлення взаємовпливу різних вузлів механізму, оцінки надійності й довговічності роботи механізму в цілому.

3.2 Випробування на тертя і знос на лабораторних установках

На другому етапі випробувань визначають на лабораторних установках значення коефіцієнтів тертя μ та інтенсивності зношування на малих зразках матеріалів. Випробування проводять при змінних режимах тертя, наприклад,

змінюючи швидкість, навантаження, температуру від малих значень до великих. Змінними чинниками можуть також бути змащувальне середовище та атмосфера. У результаті таких випробувань одержують залежність інтенсивності зношування I , коефіцієнт тертя – визначальний параметр (навантаження, швидкість, температура і т.д.). Наявність такої залежності дозволяє з відомим наближенням визначити область працездатності матеріалу.

Лабораторні установки для проведення другого етапу випробувань називають машинами тертя. За кінематичною ознакою всі машини для випробування малих зразків можна розділити на два класи: 1 – машини поступального руху і 2 – машини зворотно-поступального руху (рис.1).

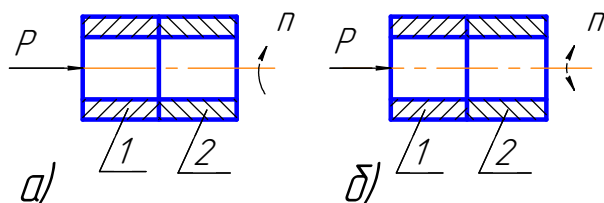


Рисунок 1 – Схеми випробувань зразків на машинах поступального (а) та зворотно-поступального рухів (б): 1 – нерухомий зразок; 2 – зразок, що обертається (контртіло)

У середині кожного класу машини поділяються на дві групи: 1 – машини торцевого тертя і 2 – машини тертя по утворювальній (рис.2).

У середині кожної групи розрізняють дві підгрупи: а) машини з коефіцієнтом взаємного перекриття зразків, що прямують до одиниці (рис.1), і б) машини з коефіцієнтом взаємного перекриття, що прямують до нуля (пальчикові машини) (рис.2).

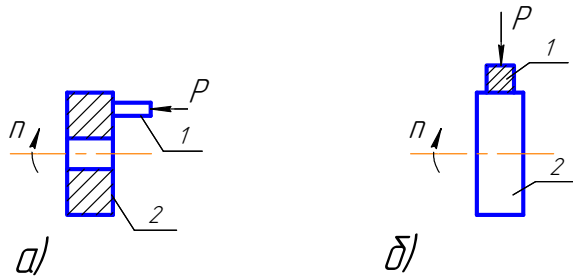


Рисунок 2 – Схеми випробувань на машинах торцевого (а) тертя і тертя по утворювальній (б): 1 – нерухомий зразок; 2 – зразок, що обертається (контртіло)

Таким чином, на практиці використовують вісім різних типів машин.

3.3 Машина тертя УМТ-1

Машина тертя УМТ-1 належить до типу універсальних машин тертя і дозволяє реалізувати такі схеми випробувань: "диск-палець", "вал-втулка", "кільце-кільце" при поступальному русі; "вал-втулка" при поворотно-поступальному русі.

Принцип роботи машини тертя УМТ-1 (рис.3) полягає в такому: електродвигун 1 через клиноремінну передачу 2 обертає шпиндель 3 зі встановленим на ньому контртілом 4.

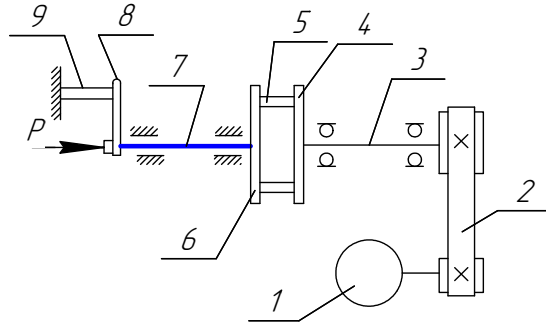


Рисунок 3 – Кінематична схема машини тертя УМТ – 1: 1 – електродвигун; 2 – клиноремінна передача; 3 – шпиндель; 4 – контртіло; 5 – зразки; 6 – зразкотримач; 7 – шток; 8 – важіль; 9 – пружний елемент

Навантаження на зразки 5 створюється через шток 7 за допомогою динамометра або стисненого газу. У процесі випробувань шток переміщається, компенсуючи знос зразків. Момент сили тертя, створюваний у результаті тертя зразків об поверхню контртіла, викликає поворот важеля 8 і прогинання пружного елемента 9. Прогинання пружного елемента перетворюється диференціальним датчиком в електричний сигнал, вимірюваний потенціометром.

Випробувальна установка УМТ-1 (рис. 4 а) складається зі станини 2, встановленої на віброізолювальних прокладках 1. У станині розміщений електродвигун, на станині розташована панель 3, що містить редуктори 5, регулятори 6 і манометри 7 для регулювання навантаження на зразки 10 за допомогою стисненого газу. На станині розміщені силовимірювач 8 і привід 12. Силowymірювач містить зразкотримач із гвинтами 9 для закріплення зразків 10. Силowymірювач може переміщатися в осьовому напрямі за допомогою маховика 4. На шпинделі привода кріпиться контртіло 11. Клиноремінна передача руху з електродвигуна на шпиндель привода закрита кожухом 13.

Машина тертя вмикається за допомогою пакетного вимикача 19, розміщеного на панелі пульта управління (рис. 4). Вмикання електродвигуна проводиться за допомогою кнопки "Пуск" 20. Регулювання швидкості обертання контртіла здійснюється регуляторами "Грубо" 17 і "Точно" 18. Значення швидкості обертання визначають за вимірником 16, кількість обертів, зроблених контр тілом, – за лічильником обертів 15. На панелі пульта управління розміщені потенціометри для реєстрації температури 26 і моменту тертя 25.

Потенціометр моменту тертя має дві межі вимірювання, перемикавання яких здійснюється тумблером 24.

Технічні дані машини тертя УМТ-1

1 Тип силовимірювача – пневматичний.

2 Межа вимірювання сили – 4000Н.

3 Діапазон вимірювання частоти обертання шпинделя привода:

від 15 до 150 хв-1; від 30 до 300 хв-1;

від 150 до 1500 хв-1; від 300 до 3000 хв-1.

4 Межі відносної похибки вимірника частоти обертання шпинделя привода, що допускається, $\pm 5\%$.

5 Діапазони вимірювання моменту сили тертя при частоті обертання шпинделя привода повинні бути:

від 15 до 1500 хв-1 – від 4 до 40 Н·м;

від 30 до 3000 хв-1 – від 2 до 20 Н·м.

6 Радіуси установки зразків "палець": $(60 \pm 0,2)$; $(90 \pm 0,23)$; $(120 \pm 0,26)$; $(150 \pm 0,26)$ мм.

7 Привід машини електромеханічний з плавним регулюванням частоти обертання.

8 Споживана потужність – не більше 15 кВт.

9 Маса випробувальної установки – не більше 13000 кг, пульта управління – не більше 400 кг.

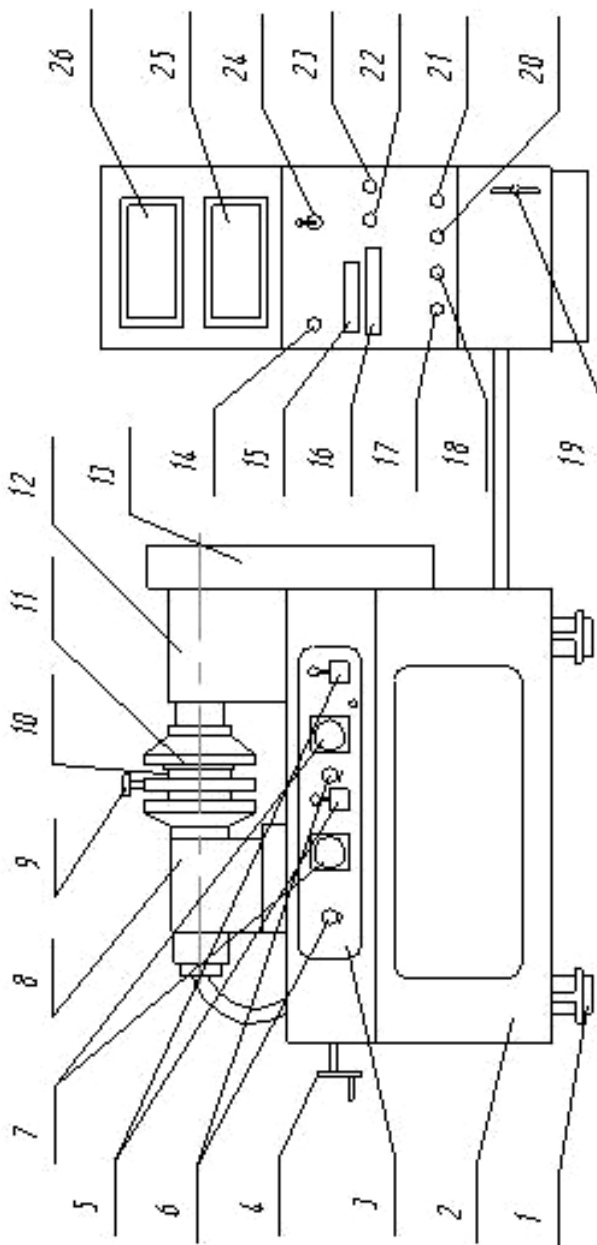


Рисунок 4 - Загальний вигляд випробувальної установки і пульта управління машини тертя УМТ-1.1 – опора віброізольовальна: 2 – станина; 3 – панель; 4 – маховик переміщення сило вимірювача; 5 – редуктор; 6 – регулятори тиску; 7 – манометри; 8 – силовимірювач; 9 – гвинт кріплення зразка; 10 – зразок; 11 – контргтілю; 12 – привід; 13 – кожух; 14 - лампа сигнальна; 15 – лічильник обертів контргтіля; 16 – вимірник частоти; 17 – регулятор швидкості «Грубо»; 18 - регулятор швидкості «Точно»; 19 – пакетний вимикач; 20 – кнопка «Пуск»; 21- кнопка «Стоп»; 22 – установка нуля «Грубо»; 23 – установка нуля «Точно»; 24 - тумблер установки діапазону вимірювання моменту тертя; 25 - потенціометр ресстрації моменту тертя; 26 - потенціометр ресстрації температури

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1 Вивчити види випробувань на тертя і знос, схеми випробувань зразків на машинах тертя, будову і принцип роботи машини тертя.

4.2 Визначити відносну похибку вимірника частоти обертання контртіла. Визначення відносної похибки проводити для діапазону частот обертання, що задається викладачем, відповідно до табл. 1.

Таблиця 1

Діапазон вимірювання частоти обертання, хв^{-1}	Положення ременів привода, відповідне передавальному відношенню	Положення тумблера перемикання діапазону	Точка, що перевіряється, хв^{-1}
			Показання шкали приладу вимірника, поділка
Від 15 до 150	1:2	Нижнє	$\frac{15}{5}, \frac{30}{10}, \frac{60}{20}, \frac{90}{30}, \frac{120}{40}, \frac{150}{50}$
Від 150 до 1500	1:2	Верхнє	$\frac{150}{5}, \frac{300}{10}, \frac{600}{20}, \frac{900}{30}$
Від 30 до 300	1:1	Нижнє	$\frac{30}{5}, \frac{60}{10}, \frac{120}{20}, \frac{180}{30}, \frac{240}{40}, \frac{300}{50}$
Від 300 до 3000	1:1	Верхнє	$\frac{300}{5}, \frac{600}{10}$

Для визначення відносної похибки виконати такі операції.

1 Відкрити кожух привода і встановити ремені в положення, відповідне заданому передавальному відношенню.

2 Вивести рукоятки регуляторів швидкості "Грубо" і "Точно" на пульті управління в крайнє положення, обертаючи їх в напрямку менше.

3 Встановити тумблер перемикаання діапазону в необхідне положення відповідно до табл.1.

4 Увімкнути електродвигун кнопкою "Пуск".

5 Встановити необхідну частоту обертання контртіла за приладом-показчиком, обертаючи ручки регуляторів частоти обертання "Грубо" і "Точно" в напрямку більше.

6 Встановити тахометр у вікно кожуха по центру шпindelю з боку клиноремінної передачі і зняти показання тахометра. При цьому перевірку проводити для кожної частоти обертання не менше трьох разів.

7 Визначити абсолютну похибку (Δ) в кожній точці, що перевіряється, як різницю між середньоарифметичною трьох відліків (h) і значенням частоти обертання за показником.

8 Визначити відносну похибку ψ в кожній точці, що перевіряється, за формулою

$$\psi = \frac{\Delta}{h} \times 100\%,$$

де Δ – абсолютна похибка;

h – середнє арифметичне значення частоти обертання за тахометром.

9 Занести результати визначення відносної похибки до табл.2.

10 Порівняти одержані результати з технічними даними машини тертя УМТ-1 і зробити висновки.

Таблиця 2.

Діапазон вимірювання частоти обертання, xv^{-1}	Точка діапазону, xv^{-1} , що перевіряється	Показання тахометра, xv^{-1}			Похибка	
		1	2	Середнє арифметичне значення	абсолютна Δ , xv^{-1}	Відносна ψ , %

4.3 Визначити похибку вимірника сумарного числа обертів шпинделя привода. Визначення похибки проводити в такому порядку.

1 Встановити діапазон обертання і вимірювання, числа обертів шпинделя від 15 до 150 хв⁻¹.

2 Увімкнути електродвигун кнопкою "Пуск".

3 Встановити частоту обертання шпинделя 30 хв⁻¹.

4 Вимкнути електродвигун кнопкою "Стоп".

5 Скинути показання лічильника на нуль.

6 Увімкнути електродвигун і провести відлік числа обертів до 300 за рисою на диску привода.

7 Вимкнути електродвигун.

8 Зняти показання лічильника і помножити на передавальне число привода, що дорівнює 10.

9 Порівняти величину відліку за диском з показаннями за лічильником і зробити висновки. Сумарна похибка лічильника не повинна бути більшою $\pm (10 + 0,0001 h)$, де h – показання лічильника.

5 ЗМІСТ ЗВІТУ

У звіті повинні бути відображені такі питання.

1 Мета роботи.

2 Устаткування і прилади.

3 Короткі теоретичні відомості (схеми випробувань зразків на машинах тертя і кінематична схема машини тертя УМТ-1 та їх опис).

4 Результати визначення відносної похибки частоти обертання контртіла (табл.2) і похибки вимірника сумарного числа обертів шпинделя.

5 Висновки.

6 ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

6.1 Усі відкриті частини машини тертя УМТ-1, що рухаються, повинні бути закриті кришками і кожухами.

6.2 Забороняється під час роботи перевищувати параметри, вказані в паспортних даних на машину тертя УМТ-1.

6.3. Під час роботи привода з передавальним відношенням 1:1 діапазон швидкості обертання шпинделя – від 30 до 3000 хв⁻¹, максимальний момент тертя, що допускається, при цьому – 20.

6.4 Під час роботи привода з передавальним відношенням 1:2 діапазон швидкості обертання шпинделя від 15 до 1500 хв⁻¹, максимальний момент тертя, що допускається, при цьому – 40 Н·м.

6.5 Забороняється робота на машині у режимі резонансних або автоколивальних режимах.

6.6 Не допускається випробування зразків в режимі "схоплювання".

6.7 Забороняється під час випробувань вводити руки в зону випробувань.

6.8. Підготовчі роботи проводити в положенні перемикача 19 "Викл" (рис. 3).

7 ПИТАННЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАТЬ

7.1 Основні чинники, що визначають показники тертя і зносу.

7.2 Етапи випробувань на тертя і знос.

7.3 Класифікація випробувань лабораторних установок.

7.4 Схеми випробувань лабораторних установок.

7.5 Принцип роботи машини тертя УМТ -1.

7.6 Методика визначення похибок швидкості обертання контртіла і лічильника обертів шпинделя.

Лабораторна робота 2

Визначення характеристик тертя і зношування

1 МЕТА РОБОТИ

- 1.1 Вивчити методи визначення зносу.
- 1.2 Вивчити методику визначення зносу та інших характеристик зношування за методом відбитків і втратою ваги.
- 1.3 Визначити характеристики тертя і зношування для заданих матеріалів зразків під час тертя ковзання.

2 УСТАТКУВАННЯ, ПРИЛАДИ, МАТЕРІАЛИ

- 2.1 Машина тертя УМТ-1.
- 2.2 Твердомір Роквелла.
- 2.3 Мікроскоп МПБ-2.
- 2.4 Терези аналітичні ВЛА-200.
- 2.5 Зразки.
- 2.6 Змащувальні матеріали - вазелінове масло.

3 ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ

3.1 Характеристики зношування

Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) накопичення його залишкової деформації під час тертя, що виявляється в поступовій зміні розмірів і (або) форми.

ГОСТ 23.002 – 78 "Забезпечення зносостійкості" визначає такі характеристики зношування.

1 Знос – результат зношування, що визначається у встановлених одиницях. Значення зносу може виражатися в одиницях довжини, об'єму, маси та ін.

2 Швидкість зношування – відношення зносу до інтервалу часу, упродовж якого він виник. Розрізняють миттєву (в певний момент часу) і середню швидкості зношування (за певний інтервал часу).

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

4 Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, оцінюване величиною, зворотною швидкості зношування або інтенсивності зношування.

3.2 Методи визначення зносу

Величина зносу може визначатися в умовах лабораторних, стендових і натурних випробувань. Розрізняють дві групи методів визначення величини зносу.

1 Методи періодичного визначення зносу. До цієї групи методів відносять:

- а) визначення величини зносу за втратою ваги;
- б) визначення величини зносу за допомогою профілографування;
- в) визначення величини зносу шляхом мікрометричних вимірювань;
- г) визначення величини зносу методом штучних баз.

2 Методи вимірювання величини зносу в процесі випробувань. До них відносять:

- а) визначення величини зносу за змістом продуктів зносу в певному маслі;
- б) визначення величини зносу за методом радіоактивних ізотопів;
- в) визначення величини зносу за допомогою пристосувань важелів та індикаторів годинникового типу;

г) визначення величини зносу за допомогою індуктивних датчиків;

д) визначення величини зносу за допомогою тензометричного мікрометрування.

3.3 Визначення величини зносу методом штучних баз

Вимірювання величини зносу методом штучних баз полягає у визначенні шляхом обчислення відстані від поверхні тертя до дна поглиблення, штучно зробленого на цій поверхні і який закономірно звужується від поверхні до дна поглиблення.

Метод штучних баз залежно від способу нанесення поглиблень підрозділяється на метод відбитків, метод висвердлених поглиблень, метод вирізаних лунок.

Метод відбитків полягає в тому, що на поверхні тертя яким-небудь індентором робиться відбиток відомої форми. Матеріалом індентора переважно є алмаз, який має форму піраміди з квадратною основою і кутом при вершині між протилежними гранями. По довжині діагоналі відбитка на випробовуваній поверхні шляхом обчислень неважко визначити відстань від поверхні до дна відбитка. Вимірюючи за допомогою мікроскопа довжину діагоналі до і після випробування, можна визначити дуже малі величини лінійного зносу.

Відбитки можуть наноситися за допомогою приладу для випробування на твердість.

На рис.1 показана схема відбитка, зробленого індентором у формі піраміди з квадратною основою.

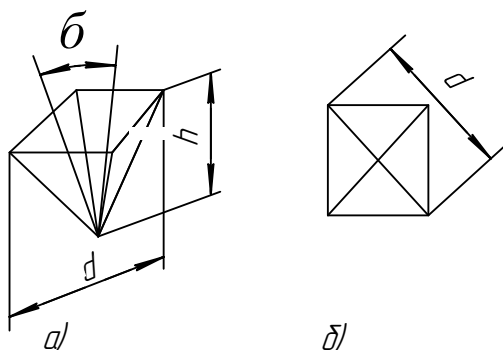


Рисунок 1 – Схема відбитка піраміди з квадратною основою (а) і проєкція відбитка на поверхню тертя (б)

Глибина відбитка від квадратної піраміди обчислюється за формулою:

$$h = \frac{1}{2 \sqrt{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}} \cdot d,$$

де h – глибина відбитка;

α – кут при вершині між протилежними гранями;

d – довжина діагоналі. При куті $\alpha = 136^\circ$; $h = d/7$.

Величина лінійного зносу плоскої поверхні визначається як різниця глибини відбитка до початку зносу і після закінчення. Для піраміди з кутом $\alpha = 136^\circ$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{1}{7} (d_1 - d_2)$$

де Δh – лінійний знос;

h^1 – глибина відбитка перед випробуванням;

h^2 – глибина відбитка після випробування;

d^1 – довжина діагоналі до випробування;

d^2 – довжина діагоналі після випробування.

3.4 Визначення величини зносу за втратою ваги

Ваговий метод, як правило застосовується для визначення зносу невеликих деталей. Їх зважують до і після випробувань. Величину вагового зносу визначають за формулою:

$$Q = q_1 - q_2,$$

де q_1 – вага зразка до випробувань, мг;
 q_2 – вага зразка після випробувань, мг.

Перед зважуванням деталі повинні бути ретельно промиті, просушені, після проведення випробувань з них необхідно змити продукти зносу, мастила і т.п.

Зважування зразків при визначенні величини зносу здійснюється з допомогою аналітичних терезів.

Величину зносу ваговим методом не рекомендується визначати в тих випадках, коли зміна розмірів деталі відбулася не тільки внаслідок відділення частинок, а й унаслідок пластичної деформації. Ваговий метод виявляється неприйнятним і при визначенні величини зносу деталей з пористих матеріалів, просочених маслом.

3.5 Визначення інтенсивності зношування

Інтенсивність зношування за ваговою характеристикою зносу – це вага речовини, що видаляється з одиниці номінальної площі контакту за одиницю шляху тертя. Інтенсивність зношування за ваговою характеристикою визначається за формулою:

$$I = \frac{Q}{S \cdot L},$$

де Q – ваговий знос, мг;
 S – площа контакту, см^2 ;
 L – шлях тертя, км.

Інтенсивність зношування за лінійною характеристикою зносу є висотою зношеного шару, що доводиться на одиницю шляху тертя, і визначається за формулою:

$$I_h = \frac{\Delta h}{L},$$

де Δh – лінійний знос, мкм;

L – шлях, км.

Визначення величини лінійного зносу за втратою ваги здійснюється шляхом обчислень, оснований на припущенні, що знос відбувається рівномірно по поверхні тертя.

Ваговий знос перераховується в інтенсивність зношування за лінійною характеристикою за формулою

$$I_{hQ} = \frac{Q}{S \cdot \gamma \cdot L \cdot 10^8},$$

де Q – ваговий знос, мг;

S – площа контакту, см²;

γ – питома вага матеріалу, г/см³;

L – шлях тертя, км.

3.6 Режими випробувань

Під режимом випробування розуміють сукупність значень тиску P (або навантаження N на зразки) на контактні зразок-контртіло і швидкості V їх відносного ковзання.

Режими, як правило, визначаються цілями випробувань, які можуть бути зведені до двох випадків:

1 Випробування проводяться з метою порівняння характеристик тертя і зношування різних матеріалів при режимах експлуатації цих матеріалів. Тиск P і швидкість відносного переміщення у цьому випадку постійні (P -const, V -const).

2 Випробування проводяться з метою визначення характеристик тертя і зношування матеріалів у діапазоні зна-

чень тиску P , швидкостей ковзання V . За одержаною залежністю ($I=f(P)$; $I=f(V)$; $\mu=f(P)$; $\mu=f(V)$, де I – інтенсивність зношування; μ – коефіцієнт тертя, P – тиск; V – швидкість ковзання) визначають діапазони режимів експлуатацій цих матеріалів.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1 Вивчити методи визначення зносу.

4.2 Вивчити методики визначення зносу й інших характеристик зношування за методом відбитків і втратою ваги.

4.3 Підготувати зразки до проведення випробувань. Підготовку проводити в такій послідовності:

1 Зважити послідовно зразки на аналітичних терезах ВЛА-200.

2 Використовуючи твердомір Роквелла, одержати на поверхнях тертя зразків відбиток піраміди з квадратною основою.

3 За допомогою мікроскопа МПБ-2 зміряти довжини діагоналей відбитка.

4 Занести до табл.1 марки матеріалів, значення ваги q^1 і довжини діагоналей d^1 відбитків, вид тертя при випробуваннях і режими випробувань.

5 За заданим значенням тиску P на зразки визначити навантаження N на зразки:

$$N = \frac{4P}{\pi d^2},$$

де P – тиск на зразки, H/m^2 ;

d – діаметр зразка, м.

Значення навантаження занеси в табл.1.

6 Для розрахованого навантаження N , використовуючи градуювальну характеристику динамометра (рис.2), визначити число поділок α на шкалі індикатора динамометра.

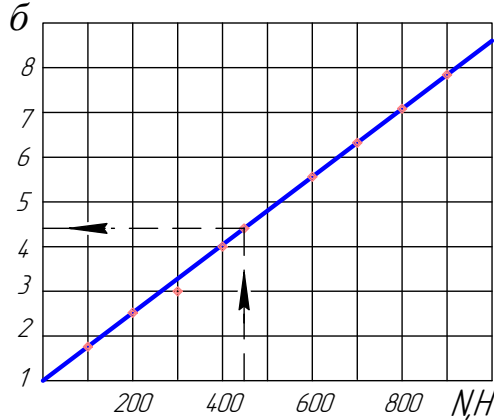


Рисунок 2 – Градуювальна характеристика динамометра

7 За заданим значенням швидкості ковзання визначити частоту обертання шпинделя n :

$$n = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot V}{\pi \cdot R}$$

де V – швидкість ковзання, м/с;

R – радіус установки зразка в зразкотримачі, мм.

8 Використовуючи тарувальні характеристики, визначити для розрахованої частоти обертання шпинделя n число поділок в шкали приладу – покажчика. Занести в табл.1 значення швидкості ковзання V , частоти обертання шпинделя.

9 Встановити зразки в зразкотримач машини тертя.

10 Встановити силовимірювач так, щоб поверхні зразків знаходилися на відстані 20 – 30 мм від поверхні контртіла.

11 Встановити рукоятки регуляторів швидкості "Грубо" і "Точно" на пульті управління в крайнє положення, обертаючи їх у напрямку "Менше".

12 Встановити тумблер перемикання діапазонів у положення, відповідне необхідній частоті обертання шпинделя.

13 Встановити тумблер перемикання діапазонів моменту тертя в положення 40 Н·м.

14 Встановити лічильник числа обертів на пульті управління в положення "0" натисненням кнопки "Скидання".

15 Увімкнути пакетний вимикач і потенціометр КСП-4. Встановити стрілку потенціометра на нульову відмітку, обертаючи рукоятку "Установка 0", "Грубо", "Точно", через 15 хвилин після вмикання потенціометра.

16 Увімкнути кнопку "Пуск" електропривода. Задати шпинделю привода необхідну частоту обертання n рукоятками регуляторів, контролюючи число поділок у за шкалою прилада вимірника.

17 Створити необхідне навантаження N на зразки обертанням гвинта динамометра, контролюючи число поділок α за шкалою індикатора.

18 Тривалість випробувань задається викладачем і контролюється за лічильником обертів шпинделя.

4.4 У процесі випробувань за шкалою потенціометра визначити значення моменту тертя $M_{тр}$. Досягши заданого сумарного числа обертів шпинделя n^{sum} , зняти навантаження на зразки і вимкнути привід машини тертя натисненням кнопки "Стоп". Занести сумарне число обертів шпинделя n^{sum} до табл.1.

4.5 Після випробувань зняти зразки зі зразкотримача. Подальшу обробку результатів випробувань проводити в такій послідовності:

1 Промити і висушити зразки.

2 Зважити зразки на аналітичних терезах ВЛА-200.

3 Визначити довжини діагоналей відбитків за допомогою мікроскопа МПБ-2.

4 Занести до табл.1 значення ваги зразків q^2 і довжини діагоналей відбитків d^2 .

5 Визначити величину вагового зносу Q за формулою 3.

6 Визначити величину лінійного зносу Δh за формулою 2.

7 Визначити шлях тертя L за формулою $L = 20^\pi \cdot R \cdot h$, де R – радіус установки зразка, м; $h^{\text{мм}}$ – показання вимірника сумарного числа обертів шпинделя.

8 Визначити інтенсивність зношування I за ваговою характеристикою за формулою 4.

9 Визначити інтенсивність зношування за лінійною характеристикою за формулою 5.

10 Провести розрахунок інтенсивності зношування за лінійною характеристикою Q за формулою 5.

11 Визначити значення сили тертя $F^{\text{мп}}$ за формулою:

$$F_{mp} = \frac{M_{mp}}{R},$$

де $M^{\text{мп}}$ – момент тертя, Н;

R – радіус установки зразка, м.

12 Визначити значення коефіцієнта тертя μ за формулою

$$\mu = \frac{F_{mp}}{N},$$

де $F^{\text{мп}}$ – сила тертя, Н;

N – навантаження на зразки, Н.

13 Результати розрахунків занести до табл.1.

Таблиця 1 – Результати випробувань матеріалів під час тертя ковзання

Матеріал зразка	Вид тертя за наявністю змащувального матеріалу	Режими випробувань				Довжина діагоналі		Вага зразка		Знос		Інтенсивність зношування			Момент тертя $M_{\text{тер.}}$, Н·м	Сила тертя $F_{\text{тер.}}$, Н	Коефіцієнт тертя, μ
		швидкість ковзання V , м/с	частота обертання n , об/хв	тиск P , МПа	навантаження N , Н	число обертів шпинделя $n_{\text{шп.}}$, об	до випробувань d_1 , мкм	після випробувань d_2 , мкм	до випробувань q_1 , мг	після випробувань q_2 , мг	лінійний Δh , мкм	ваговий Q , мг	Шлях тертя, L , мм	I_h , мкм/км			

4.6 Провести випробування та обробку результатів випробувань у наведеній вище послідовності для заданих матеріалів зразків під час тертя із змащувальним матеріалом і під час тертя без змащувального матеріалу.

4.7 Порівняти одержані результати і зробити висновки.

5 ЗМІСТ ЗВІТУ

У звіті повинні бути відображені такі питання.

1 Мета роботи.

2 Застосовані устаткування, прилади і матеріали.

3 Короткі теоретичні відомості (терміни і визначення, методи визначення характеристик зношування, визначення величини зносу за методом штучних баз і за методом відбитків).

4 Результати випробувань матеріалів під час тертя ковзання.

6 ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

6.1 Усі відкриті частини машини тертя УМТ-1, що рухаються, повинні бути закриті кришками і кожухами.

6.2 Забороняється під час роботи перевищувати параметри, зазначені в паспортних даних на машину тертя УМТ-1.

6.3 Під час роботи привода з передавальним відношенням 1:1 діапазон швидкості обертання шпинделя – від 30 до 3000 хв⁻¹, максимальний момент тертя, що допускається, при цьому – 20.

6.4 Під час роботи привода з передавальним відношенням 1:2 діапазон швидкості обертання шпинделя – від 15 до 1500 хв⁻¹, максимальний момент тертя, що допускається, при цьому – 40 Н·м.

6.5 Забороняється робота на машині на резонансних або автоколивальних режимах.

6.6 Не допускається випробування зразків у режимі "схоплювання".

6.7 Забороняється під час випробувань вводити руки в зону випробувань.

7 ПИТАННЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

7.1 Характеристики зношування.

7.2 Методи визначення зносу.

7.3 Визначення зносу за методом штучних баз.

7.4 Визначення зносу за втратою ваги.

7.5 Визначення інтенсивності та швидкості зношування.

7.6. Визначення коефіцієнта тертя.

7.7 Призначення режимів випробування.

Лабораторна робота 3

Визначення характеристик змащувальних матеріалів

1 МЕТА РОБОТИ

1.1 Вивчити призначення, види і фізико-хімічні характеристики змащувальних матеріалів (ЗМ).

1.2 Вивчити вплив в'язкості ЗМ на режим тертя в підшипнику ковзання.

1.3 Вивчити вплив температури на кінематичну в'язкість ЗМ.

1.4 Вивчити методику визначення кінематичної в'язкості та індексу в'язкості.

1.5 Визначити кінематичну в'язкість та індекс в'язкості зазначених ЗМ.

2 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ

2.1 Термостат.

2.2 Віскозиметр Пінкевича ВПЖ-4.

2.3 Термометр.

2.4 Нагрівальний прилад.

2.5 Змащувальні матеріали.

2.6 Секундомір.

3 ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ

3.1 Призначення змащувальних матеріалів

Під роботи вузлів тертя змащувальні матеріали (ЗМ) повинні виконувати такі функції:

1) зменшувати інтенсивність зношування поверхонь деталей, що труться, а також оберігати їх від заїдання на всіх режимах роботи;

2) зменшувати тертя між зв'язаними поверхнями для скорочення непродуктивних втрат енергії і підвищення к.к.д. машини;

3) відводити тепло від контактуючих і гарячих деталей, що труться;

4) захищати робочі поверхні від корозії;

5) покращувати компресію циліндропоршневої групи машин;

6) змивати з поверхонь деталей, що труться, продукти зносу та ін. забруднення;

7) захищати поверхні деталей від нагару і відкладень, що погіршують тепловіддачу.

3.2 Фізико-хімічні характеристики ЗМ

Фізико-хімічні характеристики ЗМ – це регламентовані стандартами показники для оцінки якості ЗМ.

Такими показниками є:

а) густина номінальна (при заданій температурі);

б) в'язкість номінальна (визначається при температурі 50 або 100°C);

в) температура спалаху – мінімальна температура спалаху пари ЗМ, що нагрівається, при наближенні полум'я в умовах атмосферного тиску;

г) температура застигання – максимальна температура, при якій масло втрачає свою текучість (масло після нахилу стандартної пробірки під кутом 45° залишається нерухомим протягом 1 хв);

д) кислотне число (КОН) – число міліграмів їдкого калію, потрібного для нейтралізації 1г ЗМ;

е) коксівність – відношення (в %) маси до навішування випробовуваного ЗМ;

ж) зольність – наявність в ЗМ речовин, що не згорають;

з) вміст механічних домішок;

и) вміст води;

к) вміст водорозчинних кислот і лугів;

л) корозійна дія;

м) вміст сірки;

н) вміст розчинників, що використовуються при селективному очищенні.

За винятком в'язкості, всі показники або побічно, або обмежено характеризують поведінку ЗМ в експлуатації або служать для контролю їх якості під час виробництва, транспортуванні і зберіганні.

3.3 В'язкість ЗМ і її вплив на режими тертя в підшипнику ковзання

В'язкісні властивості ЗМ.

В'язкістю називається об'ємна властивість газоподібної, рідкої, напіврідкої або напівтвердої речовини чинити опір відносному переміщенню його шарів.

Розрізняють динамічну і кінематичну в'язкості.

Динамічна в'язкість – це відношення діючої дотичної напруги до градієнта швидкості.

Динамічну в'язкість визначають за формулою:

$$\eta = v \cdot \rho,$$

де v – кінематична в'язкість;

ρ – густина.

Одиницею динамічної в'язкості в системі СІ є паскаль·секунда (Па·с). На практиці застосовують МПа·с = 10Па·с⁻³, а також сантипауз (СП = МПа·с).

Кінематична в'язкість – це відношення динамічної в'язкості рідини до густини при тій самій температурі:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

У системі СІ одиницею кінематичної в'язкості є м/с^2 . На практиці застосовується менша одиниця – $\text{мм/с}^2 = 10\text{м/с}^{-6}$, а також сантистокс ($\text{сСт} = \text{мм/с}^2$).

Показник кінематичної в'язкості входить в умовні позначення ЗМ.

Наочне уявлення про вплив в'язкості на режими тертя в підшипниках ковзання дає діаграма Герсі (рис.1), в якій коефіцієнт тертя μ пов'язаний з параметром $\eta = V/P$,

де η – динамічна в'язкість;

V – швидкість ковзання;

P – тиск.

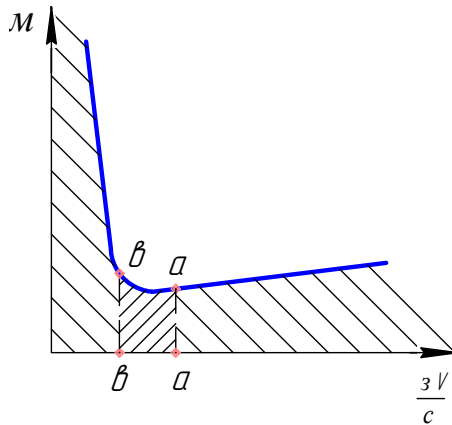


Рисунок 1 – Діаграма режимів тертя у підшипнику: 1 – тертя незмазаних поверхонь; 2 – тертя при граничному і при напіврідинному мащенні; 3 – тертя при рідинному мащенні

При малій в'язкості масла підшипник тертя працює в режимах тертя незмазаних поверхонь (коефіцієнт тертя $\mu = 0,15-0,9$), граничного і напіврідинного мащення ($\mu = 0,08-0,15$). Після досягнення мінімального коефіцієнта

тертя в підшипнику реалізується гідродинамічний ефект. Зі збільшенням в'язкості масла збільшується опір тертю, збільшується коефіцієнт тертя ($\mu = 0,007-0,3$).

В'язкість змінюється залежно від температури: з підвищенням температури в'язкість знижується. Інтенсивність зміни в'язкості ЗМ при зміні температури у різних ЗМ однакова. Характер в'язкісно-температурної кривої оцінюється індексом в'язкості (ІВ). На в'язкість чинить вплив тиск: в'язкість усіх ЗМ з підвищенням тиску збільшується.

3.4 Визначення кінематичної в'язкості та індексу в'язкості ЗМ

Для визначення кінематичної в'язкості ЗМ застосовують капілярні віскозиметри зі скла з малим коефіцієнтом температурного розширення.

Як термостат використовують прозору посудину. ЗМ, що знаходиться у віскозиметрі, занурюють не менше ніж на 20 мм нижче за рівень рідини в термостаті і на 20 мм під дном посудини (рис. 2).

Для заповнення використовують рідини: дистильовану воду для температури від 15 до 60°C; гліцерин або розчин гліцерину з водою 1:1 – для температури понад 60°C. Визначають кінематичну в'язкість таким чином. Віскозиметр зі ЗМ занурюють у термостат при заданій температурі (як правило, 50 або 100°C) протягом 15 хв.

Потім засмоктують ЗМ в коліно віскозиметра приблизно на 1/3 розширення і вимірюють час переміщення меніска ЗМ від мітки M^1 до M^2 .

Кінематичну в'язкість ν (мм/с²) випробовуваного матеріалу ЗМ визначають за формулою:

$$\nu = \tau \cdot K,$$

де K – постійна віскозиметра 0,009677 мм/с²;

τ – час закінчення меніска у віскозиметрі в секундах.

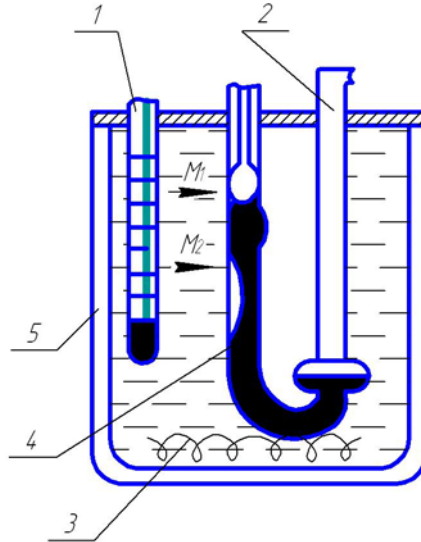


Рисунок 2 – Пристрій для визначення кінематичної в'язкості ЗМ: 1 – термометр; 2 – віскозиметр; 3 – підігрівач; 4 – капляр віскозиметра

Індекс в'язкості – безрозмірна величина, що характеризує за стандартною шкалою пониження в'язкості при підвищенні температури.

Визначають його способом порівняння кривої в'язкості випробовуваного ЗМ з аналогічними кривими двох еталонних ЗМ. Один із них характеризується дуже пологою кривою, його індекс прийнятий за 100 одиниць, інший – крутою кривою, індекс в'язкості прийнятий за 0 одиниць. В'язкість еталонних і випробовуваного ЗМ однакова при температурі 100°C.

Для обчислення ІВ визначають кінематичну в'язкість випробовуваного ЗМ при температурі 40°C і 100°C.

ІВ обчислюють за формулою

$$IB = \frac{v - v_1}{v - v_2} \cdot 100,$$

де v – кінематична в'язкість ЗМ при 40°C $IV=0$, що володіє при 100°C такою самою кінематичною в'язкістю, як випробовуваний ЗМ, $\text{мм}/\text{с}$;

v^1 – кінематична в'язкість випробовуваного ЗМ при 40°C , $\text{мм}/\text{с}^2$;

v^1 – кінематична в'язкість ЗМ при 40°C з $IV=100$, що володіє при 100°C такою самою кінематичною в'язкістю, як випробовуваний ЗМ, $\text{мм}/\text{с}^2$.

За цими формулами визначають IV , якщо кінематична в'язкість ЗМ при 100°C знаходиться в межах $2 - 70 \text{ мм}/\text{с}^2$. Значення v і v^1 беруть з табл.1. IV округляють до цілого числа.

Таблиця 1 – Значення кінематичної в'язкості ЗМ при 100°C , $\text{мм}^2/\text{с}$

Кінематична в'язкість при 100°C	v	v^3	v^2	Кінематична в'язкість при 100°C	v	v^3	v^2
6,0	57,97	19,78	38,19	11,1	176,6	80,20	96,45
6,1	59,74	20,57	39,17	11,2	179,4	81,65	97,71
6,2	61,52	21,38	40,15	11,3	182,1	83,13	98,97
6,3	63,32	22,19	41,13	11,4	184,9	84,63	100,2
6,4	65,18	23,03	42,14	11,5	187,6	86,10	101,5
6,5	67,12	23,94	43,18	11,6	190,4	87,61	102,8
6,6	69,16	24,92	44,24	11,7	193,3	89,18	104,1
6,7	71,29	25,96	45,33	11,8	196,2	90,75	105,4
6,8	73,48	27,04	46,44	11,9	199,0	92,30	106,7
6,9	75,72	28,21	47,51	12,0	201,9	93,87	108,0
7,0	78,00	29,43	48,57	12,1	204,8	95,47	109,4
7,1	80,25	30,63	49,61	12,2	207,8	97,07	110,7
7,2	82,39	31,70	50,69	12,3	210,7	98,66	112,0
7,3	84,53	32,74	51,78	12,4	213,6	100,3	113,3
7,4	86,66	33,79	52,88	12,5	216,6	101,9	114,7
7,5	88,85	34,87	53,98	12,6	219,6	103,6	116,0
7,6	91,04	35,94	55,09	12,7	222,6	105,3	117,4
7,7	93,20	37,01	56,20	12,8	225,7	107,0	118,7
7,8	95,43	38,12	57,31	12,9	228,8	108,7	120,1
7,9	97,72	39,27	58,45	13,0	231,9	110,4	121,5
8,0	100,0	40,40	59,60	13,1	235,0	112,1	122,9

Продовж. табл. 1

Кінематична в'язкість при 100°C	v	v3	v2	Кінематична в'язкість при 100°C	v	v3	v2
8,1	102,3	41,57	60,74	13,2	238,1	113,8	124,2
8,2	104,6	42,72	61,89	13,3	241,2	115,6	125,6
8,3	106,9	43,85	63,05	13,4	244,3	117,3	127,0
8,4	109,2	45,01	64,18	13,5	247,4	119,0	128,4
8,5	111,5	46,19	65,32	13,6	250,6	120,8	129,8
8,6	113,9	47,40	66,48	13,7	253,8	122,6	131,2
8,7	116,2	48,57	67,64	13,8	257,0	124,4	132,6
8,8	118,5	49,75	68,79	13,9	260,1	126,2	134,0
8,9	120,9	50,96	69,94	14,0	263,3	128,0	135,4
9,0	123,3	52,20	71,10	14,1	266,6	129,8	136,8
9,1	125,7	53,40	72,27	14,2	269,8	131,6	138,2
9,2	128,0	54,61	73,42	14,3	273,0	133,5	139,6
9,3	130,4	55,84	74,57	14,4	276,3	135,3	141,0
9,4	132,8	57,10	75,73	14,5	279,6	137,2	142,4
9,5	135,3	58,36	76,91	14,6	283,0	139,1	143,9
9,6	137,7	59,68	78,08	14,7	286,4	141,1	145,3
9,7	140,1	60,87	79,27	14,8	289,7	142,9	146,8
9,8	142,7	62,22	80,46	14,9	293,0	144,8	148,2
9,9	145,2	63,54	81,67	15,0	296,5	146,8	149,7
10,0	147,7	64,86	82,87	15,1	300,0	148,8	151,2
10,1	150,3	66,22	84,08	15,2	303,4	150,8	152,6
10,2	152,9	67,56	85,30	15,3	306,9	152,8	154,1
10,3	155,4	68,90	86,51	15,4	310,3	154,8	155,6
10,4	158,0	70,25	87,72	15,5	313,9	156,9	157,0
10,5	160,6	71,63	88,95	15,6	317,5	158,9	158,6
10,6	163,2	73,00	90,19	15,7	321,1	161,0	160,1
10,7	165,8	74,42	91,40	15,8	324,6	163,0	161,6
10,8	168,5	75,86	92,65	15,9	328,3	165,2	163,1
10,9	171,2	93,92	93,92	16,0	331,9	167,3	164,6
11,0	173,9	78,75	95,19				

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1 Вивчити призначення ЗМ та їх фізико-хімічні характеристики.

4.2 Вивчити вплив кінематичної в'язкості на режим тертя в підшипнику ковзання, а також вплив температури на кінематичну в'язкість.

4.3 Вивчити методику визначення кінематичної в'язкості та індексу в'язкості.

4.4 Визначити кінематичну в'язкість та індекс в'язкості для вказаних викладачем ЗМ. Визначення проводити в такій послідовності:

4.4.1 Зміряти час переміщення меніска вказаних ЗМ послідовно при температурах 40, 50, 100°C.

4.4.2 Обчислити значення кінематичної в'язкості за формулою 3.

4.4.3. Використовуючи значення кінематичної в'язкості ЗМ, одержані при температурах 40 і 100°C, обчислити значення індексів в'язкості.

4.4.4. Одержані результати занести в таблицю 2 і зробити висновки з роботи.

Таблиця 2. – Результати визначення кінематичної в'язкості та ІВ.

Марка ЗМ	Час переміщення меніска t, с			Кінематична в'язкість ν , мм ² /с			Індекс в'язкості
	40°C	50°C	100°C				

5 ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт про виконану роботу повинен містити такі розділи:

5.1 Мета роботи.

5.2 Короткі теоретичні відомості. Призначення і фізико-хімічні характеристики ЗМ. Вплив в'язкості ЗМ на режим тертя підшипника ковзання (рис.1). Вплив температури на в'язкість. Визначення кінематичної в'язкості та індексу в'язкості (рис.2).

5.3 Висновки з роботи.

6 ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

6.1 Усі випробування ЗМ, під час проведення яких можуть виділятися отруйні пари або гази, проводять у витяжній шафі.

6.2 Усі зразки ЗМ, що підлягають випробуванню, повинні знаходитися в лабораторії в справному скляному або пластмасовому посуді з пробками, що щільно закриваються.

6.3 Щоб уникнути опіку під час роботи з нагрівальними приладами, не можна торкатися або брати нагріті прилади і посуд голіруч. Особливо уважно поводитися з нагрітими ЗМ.

6.4 Під час роботи з речовинами, діючими на шкіру, користуватися гумовими рукавичками.

7 ПИТАННЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

7.1 Призначення ЗМ.

7.2 Фізико-хімічні характеристики ЗМ.

7.3 Вплив в'язкості на режим тертя підшипника ковзання.

7.4 Вплив температури на в'язкість ЗМ.

7.5 Визначення кінематичної в'язкості та індексу в'язкості.

9.1 ЗАВДАННЯ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНИХ РОБІТ З КУРСУ

Завдання 1

- 1 Збитки від тертя.
- 2 Показники якості поверхні.
- 3 ХТО поверхонь деталей для збільшення терміну служби.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 2

- 1 Термін служби деталей, що труться.
- 2 Поділ матеріалів на тертя за призначенням.
- 3 Обкатка машин.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 3

- 1 Основні терміни і визначення та загальні довідки.
- 2 Контакт деталей тертя.
- 3 Абразивне зношування.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 4

- 1 Етапи розвитку триботехніки в СНД.
- 2 Окислювальне зношування.
- 3 Перспектива розвитку машинобудування і триботехніки.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 5

- 1 Загальні відомості про поверхню деталі та її геометрії.
- 2 Тертя кочення.
- 3 Підвищення зносостійкості механічним наклепом алмазним вигладжуванням, обробка променем лазера.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 6

- 1 Контакт деталей, взаємопроникнення.
- 2 Стадії зношування пар тертя, розподіл зносу між деталями.
- 3 Матеріали пар тертя і їх призначення.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 7

- 1 Руйнування поверхні тертя при контактних навантаженнях.
- 2 Порошкові антифрикційні матеріали і пластмаси.
- 3 Конструктивні способи заміни тертя кочення тертям ковзання.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 8

- 1 Схоплювання і заїдання поверхонь при терті.
- 2 Критерії працездатності матеріалу в парах тертя.
- 3 Підвищення зносостійкості деталей пари, що треться, металізацією напилення.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 9

- 1 Фізико-хімічні властивості поверхні деталі.
- 2 Зношування при фретинг-корозія.
- 3 Наплавлення поверхні тертя деталі.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 10

- 1 Зношування і терміни служби вузлів деталей машин.
- 2 Плівки на металевих поверхнях.
- 3 Шляхи вдосконалення змазування вузлів і деталей машин.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 11

- 1 Етапи розвитку триботехніки в СНД.
- 2 Окислювальне зношування.
- 3 Розвиток машинобудування і триботехніки.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 12

- 1 Етапи розвитку триботехніки в СНД.
- 2 Режими тертя в підшипнику ковзання.
- 3 Підвищення зносостійкості деталей машин графітуванням і покриттям дисульфідом молібдену.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 14

- 1 Руйнування поверхні тертя при контактних навантаженнях.
- 2 Порошкові антифрикційні матеріали і пластмаси.
- 3 Конструктивна заміна тертя ковзання тертям кочення.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 15

- 1 Терміни і визначення триботехніки. Загальне відомості про тертя і знос.
- 2 Стадії зношування пар тертя. Розподіл зносу між тілами, що труться.
- 3 Чисельні критерії працездатності матеріалів у вузлах тертя і правила поєднання матеріалів пар тертя.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 16

- 1 Загальні відомості деталей, що поверхнево труться, і шорсткість поверхонь.
- 2 Корозійно-механічне зношування, корозія, ерозія.

- 3 Правило поєднання матеріалів пар, що труться, пористість матеріалу в об'ємі і поверхневому шарі.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 17

- 1 Плівка на металевих поверхнях.
- 2 Режими тертя в підшипниках ковзання.
- 3 Гальванічні покриття поверхонь деталей.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 18

- 1 Остаточне напруження. Структурні і фазові перетворення.
- 2 Рідинне змащування. Тертя при напіврідинному змащуванні.
- 3 Термічна обробка робочих поверхонь деталей.
- 4 Розрахункове завдання.

Завдання 19

- 1 Плівки на металевих поверхнях.
- 2 Стадії зношування пар тертя.
- 3 Граничний знос і терміни служби деталей.
- 4 Розрахункове завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ І РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. -М.: Физматгиз, 1963.- 472 с.
2. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. -Л.:Химия,1972. -240 с.
3. Бершадский Л.И. Масштабное переупорядочение структуры и энтропийные эффекты при трении и износе металлов//Физика износостойкости поверхности металлов. -Л., 1988. -С.166-182.
4. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. -М.: Наука, 1979. - 344 с.
5. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания. Трение и износ, 1997. -Т. 18. -№ 1.
6. Гуляев А.П. Металловедение. -М.: Металлургия, 1978. -647с.
7. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел// Вести. Ан СРСР, 1957. - № 11.
8. Иванов В.С. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. -М.: Наука, 1994. -384 с.
9. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. -М.: Металлургия, 1976. -176 с.
10. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. -Омск, 1996. -298 с.
11. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа твердых тел. -М.: Наука, 1974. -560 с.
12. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. -Ташкент: Фан, 1979. -168 с.
13. Гаркунов Д.Н. Триботехника. -М.: Машиностроение, 1985. -192 с.
14. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. -М.: Наука, 1968. -112 с.
15. Демкин Н.В. Контактное шероховатых поверхностей. -М.: Наука, 1970. -228 с.

16. Демкин Н.В., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. –М.: Машиностроение, 1981. -224 с.
17. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. –М.: Наука, 1980. -228 с.
18. Износостойкость /Под ред. Р.М.Матвеевского. –М.: Наука, 1975. -192 с.
19. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трении и износ. –М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
20. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. -270 с.
21. Носовский И.Т. Влияние газовой среды на износ металлов. –Киев: Техника, 1968. -180 с.
22. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания. -М.: Машиностроение, 1978. -264 с.
23. Решение задач тепловой динамики и моделирования трения и износа /Под ред. А.В.Чичинадзе. –М.: Наука, 1980. - 151 с.
24. Трение, изнашивание, смазка: Справочник /Под ред. И.В.Крагельского. –М.: Машиностроение, 1980. Т. 1. -358 с.
25. Трение, изнашивание, смазка: Справочник /Под ред. И.В.Крагельского. –М.: Машиностроение, 1980. Т. 2. -358 с.
26. Трение и износ фрикционных материалов /Под ред. А.В.Чичинадзе. –М.: Наука, 1977. -136 с.
27. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. -М.: Машиностроение, 1984. -224 с.
28. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. –М.: Наука, 1986. -248 с.

Навчальне видання

**Будник Анатолій Федорович,
Юскаєв Володимир Борисович,**

**ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА
ТРИБОДИЗАЙНУ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Дизайн обкладинки Будника А.Ф.
Редактор Гавриленко Н.А.
Комп'ютерне верстання Вінницької В.Д.

Підп. до друку 1.09.2008
Формат 60x84/16. Папір ксероксний. Гарнітура Times New Roman Суг.
Друк офс.
Ум. друк. арк. 11,86. Обл-вид. арк. 8,48
Тираж 300 пр. Вид. № 274
Зам. №

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті
40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру ДК № 3062 від 17.12.2007.
Надруковано у друкарні СумДУ
40007, Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.