

**Міністерство освіти і науки України
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка**

А.М. Антипенко, О.М. Белас, В.А. Войтов, О.С. Вотченко,
О.І. Сідашенко, М.Г. Стадніченко, В.М. Стадніченко, М.І. Суханов,
О.В. Тіхонов, О.М. Трошін

ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ

Підручник

**За редакцією доктора технічних наук, професора
В.А. Войтова**

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

**Харків
2008**

ББК 34.41 2 075

УДК 620.179.112

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів від 09.01.08 № 14/18-Г-18

Автори: Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А., Вотченко О.С., Сідашенко О.І., Стадніченко М.Г., Стадніченко В.М., Суханов М.І., Тіхонов О.В., Трошін О.М.

Рецензенти:

Бойко А.І. – професор кафедри стандартизації і ремонту машин Національного аграрного університету, доктор техн. наук;

Пащенко В.Ф. – професор, доктор техн. наук, зав. кафедрою механізації і електрифікації сільського господарства Харківського національного аграрного університету імені В.В. Докучаєва;

Пастухов В.І. – професор, доктор техн. наук, зав. кафедрою ЕМТП Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

Основи трібології: Підручник / Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А. та ін. / За ред. Войтов В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. - 342с.

Викладено сучасні наукові представлення трібології про фізичну природу явищ, що протікають у фрикційному контакті, механіка і термодинаміка процесів тертя, зношування і мащення. Розглянуто молекулярно-механічну і структурно-енергетичну теорію тертя та зносу, механізми формування і руйнування поверхневих шарів, основи фрикційного матеріалознавства, застосовувані фізичні методи дослідження властивостей поверхневих шарів, технологічні способи підвищення зносостійкості і експлуатаційних властивостей деталей трібосистем.

Для студентів і викладачів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації, магістрів, аспірантів, а також інженерно-технічних працівників підприємств технічного сервісу різних форм власності.

© Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А. та ін., 2008.

© Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2008

ISBN 978-966-8726-91-0

ВСТУП

Однією з найважливіших задач, що стоять перед технічним забезпеченням агропромислового комплексу України, є поліпшення експлуатаційних властивостей автотракторної і сільськогосподарської техніки за рахунок підвищення надійності, довговічності та економічності.

Надійність і довговічність колісних і гусеничних транспортних засобів та інших видів машин та обладнання багато в чому обумовлені явищами тертя і зношування, що відбуваються в трибосистемах. Зношування призводить до порушення герметичності вузлів та втрати точності взаємного розташування деталей і переміщень. В результаті цього виникають заклинювання, удари, вібрації, що призводять до поломок. Тертя викликає втрати енергії, перегрів механізмів, зниження переданих зусиль, підвищення витрат пального. Позитивна роль тертя полягає в забезпеченні роботи гальм, зчеплення, руху коліс. Явища тертя і зношування взаємно обумовлені: тертя призводить до зношування, а зношування поверхонь деталей у ході роботи викликає зміну робочих параметрів.

Для ліквідації наслідків зношування проводяться поточні і капітальні ремонти, у ході яких зношені деталі і вузли або замінюють, або відновлюють. У процесі експлуатації долають зношування шляхом проведення планових техобслуговувань.

З урахуванням перерахованих обставин, трудовитрати за термін служби машин розподілені таким чином: 1,4 % – на виготовлення; 45,4 % – на технічне обслуговування; 46 % – на поточний ремонт; 7,2 % – на капітальний ремонт.

Проблеми тертя, зносу і мащення в машинах і механізмах вивчає трибологія. Прикладними задачами щодо підвищення зносостійкості і управління тертям за рахунок застосування нових конструкцій вузлів, матеріалів і експлуатаційних прийомів займається триботехніка.

Одним з стимулів розвитку науки про тертя, зношування і мащення є бурхливий розвиток автомобілебудування та інших видів транспортного машинобудування на початку ХХ століття. До теперішнього часу трибологія остаточно сформувалася як самостійна галузь знань. У всіх розвинутих країнах є наукові трибологічні центри і здійснюється підготовка інженерів-трибологів. Вирішення проблем тертя, зношування і мащення дозволило досягти високого економічного ефекту. За оцінками міжнародних експертів широке впровадження досягнень у цій галузі дасть можливість на третину скоротити витрати на ремонт і експлуатацію автотранспортних засобів, причому на одну шосту без помітних капітальних вкладень.

Безсумнівно, що розширення застосування досягнень трибології в нашій країні теж дозволить істотно підвищити експлуатаційну якість технічних засобів і досягти значних економічних і екологічних результатів.

Основними напрямками робіт з підвищення експлуатаційних власти-

востей машин і механізмів на основі використання трибології є:

- удосконалення конструкції трібосистем, зниження матеріалоемності, підвищення надійності і ресурсу;
- застосування нових матеріалів і технологій для підвищення зносостійкості й несучої здатності трібосистем;
- розробка і застосування мастильних матеріалів четвертого і п'ятого покоління;
- використання екологічно чистих методів експлуатації, нових антифрикційних і фрикційних матеріалів з покращеними параметрами, в яких не міститься: азбест, свинець, сполуки важких металів та інші токсичні і канцерогенні речовини;
- удосконалення конструкцій ущільнень, які забезпечують герметичність і виключають потрапляння абразиву в спряження деталей;
- прискорення переведення транспортних енергетичних установок на більш ефективні і екологічно чисті енергоносії: паливний газ, електроенергію, водень, сонячну енергію, застосування енергоємних акумуляторів енергії як електрохімічних, так і механічних; використання ефективних каталітичних пристроїв газоочищення;
- розробка прогресивних технологій проведення технічного обслуговування і ремонту машин та обладнання;
- підвищення освітнього рівня інженерів-конструкторів, технологів і експлуатаційників в галузі тертя, зносу, мащення та інших проблем трибології.

Знання наукових основ трибології в інженерній практиці є обов'язковою умовою правильних розрахунків і будування вузлів тертя, підбору оптимальних матеріалів трібосистем, включаючи мастильні матеріали і присадки до них, визначення раціональних шляхів використання сучасних технологій виготовлення, обробки і зміцнення тріботехнічних матеріалів, а також забезпечення ефективних режимів експлуатації й обслуговування машин і механізмів.

В підручнику разом з аналізом природи тертя та зносу викладені необхідні для практичного використання розрахункові залежності сили тертя та величини зносу, які пов'язують в одне ціле зовнішні характеристики процесів і властивості контактуючих тіл. Розглядається також вплив навколишнього середовища на тертя та знос. Формулюються вимоги до фізико-механічних властивостей матеріалів контактуючих тіл, що обумовлюють їх поведінку в рухомих сполученнях. Окрім того, в підручнику використані результати фундаментальних наукових досліджень, які впровадженні в навчальний процес авторами цього видання.

Враховуючи сказане, матеріали, приведені в книзі, можуть бути корисними для студентів і викладачів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації, магістрів, аспірантів, а також для широкого кола інженерних та технічних працівників машинобудівних підприємств та майстерень технічного сервісу різних форм власності.

1 ТРИБОЛОГІЯ І ЇЇ СТРУКТУРА

1.1 Етапи розвитку трибології

Перші наукові дослідження з трибології були здійсненні Леонардо да Вінчі (1452 – 1519 рр.). У 1508 р. він провів експерименти і прийшов до такого висновку: "Будь-яке тертьове тіло створює при терті опір, що дорівнює одній чверті своєї ваги, за умови дотику рівної площини з полірованою поверхнею". Отже, він уперше сформулював поняття про коефіцієнт тертя. Користуючись сучасною символікою, можна записати закон тертя в такому вигляді: $F = fN$, де N – тиск тіла на площину; f – коефіцієнт тертя; F – сила опору ковзання. Цей закон, відкритий Леонардо да Вінчі, довгий час помилково називали законом Кулона.

Леонардо да Вінчі вважав, що f залежить від шорсткості поверхні тіла: "Тіла з більш гладкою поверхнею мають менше тертя". На його думку тертя буває чотирьох родів: обидва тіла шорсткі; тіло котре ковзається, шорстке, а поверхня, по якій воно рухається, гладка; тіло, що ковзається, гладке, а поверхня нерухомого тіла шорстка; обидва тіла гладкі. Леонардо да Вінчі висловив судження про те, що, якщо між двома тілами розташовані круглі гладкі зернятка, то тертя зменшується, тобто показав можливість створення підшипника кочення.

Забутий закон Леонардо да Вінчі знову був відкритий французьким вченим Гільомом Амонтоном (1663 – 1705 рр.). Суть отриманих ним результатів була викладена в статті, представленій Французькій академії наук у 1699 р. Г. Амонтон установив, що тертя не залежить від розмірів тертьових тіл, коефіцієнт тертя дорівнює 0,3, а сила тертя прямо пропорційна навантаженню. Він також припускав, що тертя – це результат підйому одного з тіл, що сполучаються, на нерівності іншого. Результати Амонтона були експериментально підтверджені на зразках з дерева і мармуру Деллагіром, який висловив гіпотезу, відповідно до якої тертя обумовлене зачепленням і вигином нерівностей, що поводяться подібно до мініатюрних пружин.

У 1734 р. викладач фізики Оксфордського університету І.Т. Дезагюльє опублікував книгу "Курс експериментальної фізики", у якій висловив гіпотезу про вплив на тертя сил молекулярної взаємодії. Він вважав, що сила тертя повинна зростати зі зменшенням шорсткості тіл, тому що молекулярне зчеплення повинно бути вище.

У роботах французького фізика Ш. Кулона (1736 – 1806 рр.) підтверджується думка про те, що тертя залежить від молекулярної взаємодії поверхонь, наводяться дані, що збільшення площі поверхонь контакту супроводжується зростанням сили тертя. Ним вперше в примітивній формі висловлена думка про те, що тертя має двоїсту природу.

У 1778 р. Ш. Кулон уперше запропонував двочленну формулу, відповідно до якої $F = A + fN$, де A – характеристика зчеплення, що не залежить від навантаження (опублікована в книзі "Теорія простих машин" у 1781 р.). Ця

формула була забута, і лише в ХХ столітті німець Г. Сакс (1924 р.), англієць Г. Мороу (1930 р.) і радянський вчений Б. Дерягін (1934 р.) незалежно один від одного знову запропонували і теоретично обґрунтували двочленну формулу закону тертя. Кулон вважав, що зчеплення A мале і ним можна знехтувати, а тертя обумовлене в основному взаємним проникненням і деформацією (вигинам у напрямку ковзання) нерівностей тертьових тіл (у деревини нерівності схожі на ворс шітки). Мاستильний матеріал, знаходячись між нерівностями, згладжує рельєф і зменшує тертя. Таким чином, у його теорії зароджується поняття про фактичну площу дотику тертьових тіл. Кулон показав, що коефіцієнт тертя залежить від природи тертьових тіл, розмірів поверхні тертя, швидкості, тиску і тривалості контакту, що передує ковзанню. Кулон провів також дослідження з тертя кочення дерев'яного циліндра по горизонтальних полозах і одержав формулу $F_k = f_k N/R$, яка використовується і нині.

Подальша розробка теорії тертя здійснювалася професором Единбургського університету Д. Леслі (1766 – 1832 р.). Причину тертя він бачив у безперервній зміні форми поверхонь тіл, що сполучаються. Виступи одного тіла натискають на виступи іншого, які деформуючи самі, вдавлюються в нижчі шари з утворенням впадин. Іншими словами, навколо кожного новоствореного виступу утвориться хвиля відтиснутого матеріалу, на яку цей виступ беззсідшно прагне піднятися і яка чинить опір його переміщенню. У процесі тертя йде постійне перемішування (перedefормування) матеріалу.

Перші дослідження, що свідчать про перетворення при терті механічної енергії в теплову, були виконані англійським вченим Б. Томпсоном, відомим в історії науки під ім'ям графа Румфорда. У 1798 р. він помітив, що при свердлінні гарматного ствола вода, поміщена в нього, закипає. Після дослідів з тупим свердлом він установив, що джерелом тепла є тертя. У доповіді в Лондонському королівському товаристві Б. Томпсон вказував: "Ми не повинні випустити з уваги, що джерело тепла, яке виникає при терті в цих дослідах, є очевидно, не вичерпним". Фактично він дав підставу вважати, що між роботою проти сил тертя і тепловою енергією, яка при цьому виділяється, існує кореляція. Надалі Р. Майер (1842 р.) і Д. Джоуль (1843 р.) розвили цю ідею й обґрунтували принцип еквівалентності механічної енергії і теплоти.

Ці дослідження є початком зародження нової галузі трибології – теплової динаміки тертя. Найбільш важливі досягнення в цій сфері були зроблені англійськими вченими на початку ХХ століття. Було показано, що тепла енергія, яка виділяється при терті, не розподіляється рівномірно по поверхні дотику тертьових тіл, а концентрується на дискретних ділянках – плямах фактичного контакту. Так, у 1936 р. Ф. Боуденом і К. Рідлером була опублікована робота, у якій наводилися результати експерименту, які свідчать про те, що матеріал контактуючих виступів поверхонь тертьових тіл імпульсно нагрівається до температури, близької до точки плавлення матеріалу одного з цих тіл. Докладно розрахунок температури плям контакту при терті був здійснений Х. Блоком.

У другій половині XIX ст. Б. Тауер випадково відкрив явище динамічного тиску при відносному русі шарів мастильних матеріалів. В 1886 р. на підставі експериментів Тауера О. Рейнольдсом була розроблена гідродинамічна теорія мащення. У 1883 р. незалежно від Рейнольдса основи гідродинамічної теорії мащення були розроблені російським вченим М.П. Петровим. За цією темою ним було опубліковано більше 20 робіт. Істотний внесок у розвиток теорії гідродинамічного мащення внесли М.С. Жуковський, С.А. Чаплигін, М.В. Коровчинський та ін.

Родоначалником одного з найбільш важливих напрямків трибології – теорії граничного мащення, є У. Гарді. У 1922 р. він у книзі "Вибрані твори" виклав основні положення теорії граничного мащення і розробив концепцію структури граничного шару.

У 30-і рр. XX ст., ґрунтуючись на працях У. Гарді, Ф. Боуден і Д. Тейбор створили адгезійну теорію тертя. Основні її положення були сформульовані в двох статтях, опублікованих у 1938 р. У 60-і рр. ними була запропонована і експериментально підтверджена адгезійно-деформаційна теорія тертя.

Припущення про двоїсту природу тертя вперше обґрунтував видатний радянський триболог І.В. Крагельський у 1939 р. Згодом на базі цієї наукової гіпотези І.В. Крагельським і його учнями була розроблена молекулярно-механічна теорія тертя.

Широке застосування полімерних матеріалів у трибологічних спряженнях призвело до необхідності вивчення природи явищ, що відбуваються у контакті при їх фрикційному навантаженні. У 1953 р. А. Шамомах висловив гіпотезу про молекулярно-кінетичну природу тертя, яка згодом була розвинута в молекулярно-кінетичну теорію тертя.

Початок досліджень у другій найважливішій галузі трибології – зношуванні твердих тіл – було покладено М.В. Ломоносовим. У 1752 р. в доносенні до Російської Академії наук він запропонував проводити дослідження з опору матеріалів зношуванню шляхом стирання на бруску. На думку М.В. Ломоносова опір твердих тіл стиранню пов'язаний з їхньою міцністю, обумовленою силами зв'язку між частками.

Помітний внесок у дослідження зношування матеріалів зробив Д. Рені. У 1825 р. він опублікував доповідь Королівському товариству в Лондоні, у якому викладалися результати експериментів з тертя і зношування шкіри, дерева, металів, текстильних тканин і льоду.

Слід відзначити, що ця галузь трибології розвивалася досить слабко до початку XX ст. У першу чергу це пов'язано з відсутністю потреб техніки. Типові для того часу вузли тертя машин і механізмів, що експлуатувалися при низьких швидкостях, навантаженнях і температурах, відповідали вимогам довговічності. Зношування як явище не являло собою особливої небезпеки, а проблема підвищення довговічності машин вирішувалася в основному шляхом підвищення точності виготовлення тертьових деталей і застосування більш сучасних систем мащення. Малий прогрес у цій галузі трибології приз-

вів до того, що знання про зношування твердих тіл залишалися досить спрощеними до початку ХХ ст. Процес зношування уявляли як зминання, виломлювання або зріз виступів поверхонь контактуючих тіл. Більше того, панувала думка, що зношування можна вивчати тільки емпірично.

Початком систематичних досліджень природи зношування твердих тіл при терті можна вважати 30-і рр. ХХ ст., коли були опубліковані роботи В.Д. Кузнєцова, а в пізніше, В.Ф. Лоренца, І.В. Крагельського, А.К. Зайцева, Ф. Боудена, Д. Тейбора, В.С. Щурова, М.М. Хруцова, Ф. Барвела та ін. Перша спроба одержати формулу для розрахунку зносу на основі емпіричних даних була зроблена В. Тоном в 1937 р. Через три роки Р. Хольм запропонував розраховувати знос, ґрунтуючись на атомарному механізмі зношування твердих тіл. Найбільш глибокі і значні дослідження в сфері створення розрахункових методів оцінювання зносу почали вестись з 50-х років внаслідок розвитку адгезійної й утомної теорій зношування.

Тріботехніка – прикладний розділ трібології, який охоплює кінцеву стадію створення трібосистеми(вузлів, деталей і елементів) з урахуванням досягнень трібоаналіза, трібоматеріалознавства і тріботехнології.

Принципи трібології знаходять відображення в методах розрахунку і конструювання, виготовлення, випробування, мащення, експлуатації, діагностування та ремонту вузлів трібосистем і трібоелементів.

Цими питаннями задаються конструктори, технологи, експлуатаційники, такі ж питання стоять перед дослідниками в сфері тертя, зношування і мащення машин.

При величезному парку машин і устаткування зростання ефективності виробництва неможливе без підвищення довговічності техніки і зниження витрат на її експлуатацію та ремонт. Перед тріботехнікою стоять складні задачі:

- у 2...3 рази підвищити терміни служби трібосистем, двигунів внутрішнього згоряння, компресорів, автомобілів, металообробного устаткування та інших машин масового застосування;

- знизити витрати на ремонт машин та їх технічне обслуговування, для чого зменшити регульовальні роботи, у кілька разів скоротити обсяг мастильних робіт, виключити дорогі фінішні операції при виготовленні трібоелементів, знизити витрату мастильних матеріалів;

- знизити тертя в машинах, підвищити їх ККД, скоротити час припрацювання машин;

- створити нові конструкції трібосистем з використанням сучасних антифрикційних і зносостійких матеріалів, здатних нести навантаження у 1,5...2 рази більші, ніж колишні;

- розробити нові мастильні матеріали для роботи при високих навантаженнях, швидкостях і температурах, з кращою здатністю мащення, яка забезпечує велику стійкість матеріалів до задирання при терті.

1.2 Трібологія як наука

Термін "трібологія" увійшов в наукову практику з 1966 р. У сучасному трактуванні він був використаний головою Міжнародної ради з трібології (м. Лондон) професором П. Джостом. У доповіді він звернув увагу уряду Великобританії на проблеми пов'язані з втратами в результаті мащення машин та механізмів. Слово трібологія, яке походить від грецького "трібос", що означає тертя, було визначене як "наука і технологія взаємодії поверхонь, що знаходяться у відносному русі, а також пов'язані з цим явища та їхні практичні наслідки".

Значущість трібології в останні десятиліття незмінно підвищується. Вона торкається найрізноманітніших сфер діяльності людини, але особливу важливість придбала у зв'язку з необхідністю підвищення зносостійкості машин, приладів, устаткування, інструментів, робочих органів та інших виробів, а також зниження втрат на тертя при їх використанні. Вирішення задач з застосування досягнень трібології носить яскраво виражений міжгалузевий характер і здійснюється на державному рівні в багатьох високорозвинених у науково-технічному плані західних країнах.

Приклад економічної значущості цього напрямку висловив у своїй статті проф. П. Джост: "Звіт DES констатує, що тільки в Сполученому Королівстві Великобританії можна було б заощадити 515 млн. фунтів стерлінгів (за оцінкою 1965 р.) якби більше уваги приділялося трібології. Досвід останніх 22 років показав, що ця цифра, яка складає близько 1% валового національного доходу, значно занижена. Тепер вважають, що належна увага до трібології, особливо на стадії навчання, наукових досліджень і використання, могло дати економію засобів від 1,3 до 1,6% валового національного доходу. І ще важливіше те, що перші 20% такої економії можна одержати без значних капітальних вкладень".

У багатьох офіційних дослідженнях, значно більш широких, ніж у Великобританії, наприклад, у Німеччині, Канаді, Китаї та деяких інших країнах, у кожному окремому випадку підтверджувалася справедливність розміру зазначеної економії від валового національного доходу. Тому слово "трібологія" одержало остаточне етимологічне визнання і занесено в додаток до Оксфордського словника англійської мови.

В багатьох університетах і політехнічних ВНЗ світу зараз є професорські кафедри і курси з трібології. Трібологія проникла навіть у шкільні програми. Трібологічні товариства процвітають у всіх розвинутих країнах.

До кінця 90-х років минулого століття на Україні не існувало подібних кафедр або дисциплін при кафедрах, а слово трібологія навіть було невідоме більшості інженерів, що займались проектуванням, експлуатацією і ремонтом техніки. Необхідно відзначити, що останнім часом відбулися позитивні зміни в цьому напрямку. У деяких вищих технічних навчальних закладах України як експеримент впроваджуються курси лекцій з трібології. Крім цього, в Ук-

раїні створено "Товариство трібологів" з центром у Київському національному авіаційному університеті, метою якого є впровадження перспективних ідей і розробок у промисловість.

Важко навести приклади економічних втрат в Україні, тому що їх немає. В друку 1990 р. у журналі "Тертя і знос" академік В.С. Авдуєвський описав: "На практиці недостатня зносостійкість призводить до простоїв машин через непрацездатність (в сільськогосподарській техніці збитки від простоїв у період збирання врожаю складають 2...3 млрд. крб. на рік), надзвичайно великого завантаження основних виробничих потужностей для виготовлення запасних частин (до 30% по автотракторній техніці), розростання мережі ремонтних організацій і майстерень (4 млн. робітників у країні зайнято ремонтом), складної і неефективної системи розподілу запасних частин".

На жаль, в провідних конструкторських бюро і підприємства, що займаються проектуванням і виготовленням складних агрегатів, бракує фахівців – трібологів і вирішують перераховані завдання методом "проб і помилок", шляхом стендових випробувань, що малоефективно і не економічно. Виходячи з усього сказаного можна констатувати, що розвиток і реалізація потенціалу фундаментальних і прикладних знань в галузі трібології в багатьох випадках відстають від потреб науково-технічного прогресу, а ті знання які є, не повною мірою використовуються провідними конструкторськими організаціями через недостачу фахівців у цій області. Тому останні два-три десятиліття в усіх промислово розвинених країнах характеризуються посиленням уваги до проблем тертя і зношування, шкідливі наслідки яких оцінюються значними коштами щорічно.

1.3 Структура трібології

Аналіз наукових публікацій та тематики великих комплексних і спеціалізованих науково-технічних конференцій останніх років дає підставу виділити в сучасній трібології як сфері знань і її додатків, шість найважливіших перспективних галузей (рис. 1.1): трібоаналіз (теоретичні положення трібомеханіки, трібофізики і трібохімії); трібоматеріалознавство (вивчення тріботехнічних матеріалів і управління їх властивостями); тріботехнологія (технологічні методи управління фрикційними характеристиками рухомих спряжень); тріботехніка (сукупність технічних засобів, що піддаються впливу тертя і зношування); трібомоніторинг (засоби і методи діагностики, контролю і випробувань трібосистем); трібоінформатика (засоби і методи обробки, збереження і передачі трібологічної інформації).

Трібоаналіз – найважливіший розділ трібології, що охоплює проблеми накопичення і систематизації наукової інформації про фундаментальні дослідження основних фрикційних процесів, а також побудови моделей цих процесів з метою прогнозування результатів контактної взаємодії твердих тіл у заданих умовах. Трібоаналіз є базисом для побудови і розвитку п'яти галузей

науки трибології, що залишилися, і має на меті побудову моделей процесів для практичного використання результатів у реальних конструкціях трибосистем.

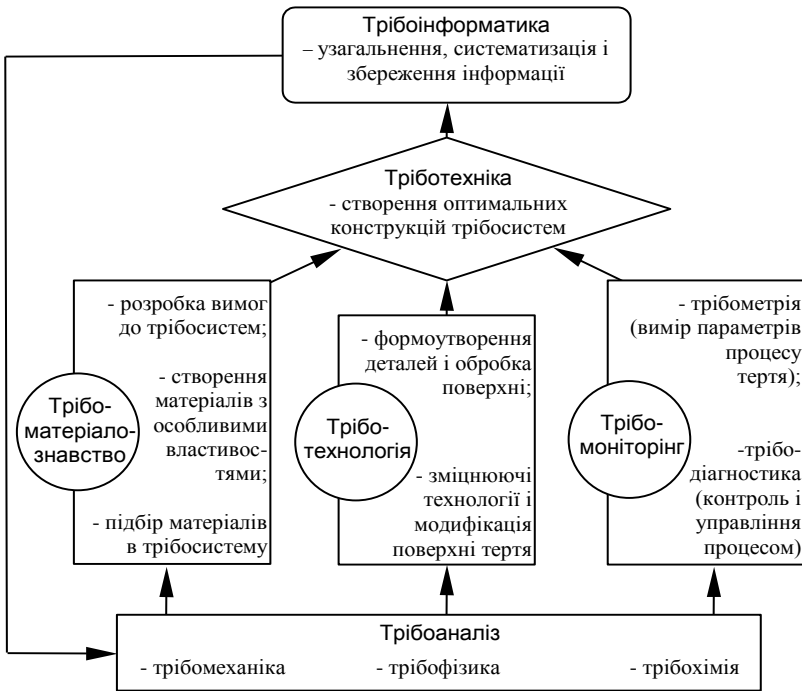


Рис. 1.1 Структура науки "Трибологія"

Триботехнічне матеріалознавство (трибоматеріалознавство) складає специфічний розділ науки про матеріали для трибосистем.

Трибоматеріалознавство є сполучною ланкою між результатами теоретичних досліджень, проведених в сфері трибоаналізу і комплексом знань, втілюваних в триботехніці у вигляді реальних конструкцій трибосистем.

Ще 30...40 років тому метали та їх сплави відігравали роль основних матеріалів для трибосистем. В останні роки вони активно витісняються насамперед різноманітними композитами, але в багатьох випадках зберігають своє значення і продовжують удосконалюватися. Тому метою цієї галузі є розробка вимог до матеріалів для трибосистем, технологій створення таких матеріалів, основ їхнього підбору у трибосистемі і аналіз закономірності їхньої роботи. Сказане стосується різних мастильних матеріалів (твердих; рідких; газоподібних і пластичних).

Триботехнологія як і трибоматеріалознавство, є сполучною ланкою між трибоаналізом і реальними конструкціями трибосистем і охоплює два великих

напрямки прикладної трибології: по-перше – вивчення триботехнічних аспектів формоутворення деталей, обробки матеріалів руйнуючими і деформуючими способами; по-друге – вивчення і розробка методів досягнення необхідних триботехнічних властивостей поверхонь тертя за рахунок зміцнюючих впливів і нанесення спеціальних покриттів.

Варто підкреслити, що особливо важливою технологічною характеристикою поверхні тертя є шорсткість та її орієнтація стосовно напрямку переміщення тертьових тіл. Вона визначає коефіцієнт тертя, знос, контактну твердість, час припрацювання, фактичну площу дотику, тепло- і електропровідність контакту. Оптимальний вибір технологічної шорсткості, її орієнтації на деталях дає значне скорочення часу припрацювання виробів і зменшення зносу на цьому етапі. При неправильному урахуванні цих факторів знос за час припрацювання виробу може досягати величин, що дорівнюють зносу за весь період експлуатації, що залишився.

Трибомоніторинг – самостійна галузь трибології, яка ґрунтуючись на трибоаналізі повинна використовуватися як на етапі випробувань і допрацювань трибосистем, так і на етапі їхньої експлуатації. Трибомоніторинг включає такі два напрямки – трибометрію і трибодіагностику.

Трибометрія охоплює методи і засоби вимірювання основних параметрів процесу тертя і є найважливішим елементом усіх видів експериментальних, модельних і натурних досліджень трибосистем.

Трибодіагностика – як сукупність методів і засобів безперервного контролю і керування станом фрикційних параметрів деталей і трибосистем машин – один з наймолодших напрямків забезпечення створення сучасної і надійної триботехніки. Одночасне застосування трибометрії і трибодіагностики на модельних і реальних конструкціях дозволяє забезпечити створення оптимальної конструкції вузла тертя, визначити можливі сфери її функціонування і спрогнозувати ресурс. Наявність вбудованих систем контролю на реальних конструкціях призводить до значного скорочення матеріальних засобів у процесі експлуатації і ремонту машин та механізмів.

У коло проблем моніторингу включається все більше завдань з усіх сфер трибоаналіза, трибоматеріалознавства, триботехнології, тому що всі вони служать для створення надійних і довговічних трибосистем, тобто є основою для розвитку триботехніки і трибоінформатики.

Триботехніка як прикладна галузь трибології охоплює кінцеву стадію процесу створення трибосистем, акумулюючи в них новітні досягнення трибоаналізу, трибоматеріалознавства, триботехнології і трибомоніторингу в методах розрахунку і конструювання.

Однак досвід показує відставання в багатьох випадках практичних застосувань триботехніки від рівня досягнутих результатів наукових досліджень, з одного боку, і неготовність трибоаналізу дати відповіді на багато питань конструкторів і технологів – з іншого. Дотепер немає надійних модельних схем і критеріїв переходу від простих схем випробувань на тертя і зно-

шування до реальних трібосистем. Це призводить до того, що в конструкцію закладаються завищені запаси "незнання", які нерідко зводять до мінімуму використання досягнень в галузі трібоматеріалів і тріботехнології.

Значні резерви підвищення працездатності техніки закладені в удосконаленні конструктивних рішень трібосистем.

Трібоінформатика є замикаючою ланкою в наукових дослідженнях і практичних додатках трібології. Метою трібоінформатики є одержання, узагальнення, збереження і використання інформації отриманої у всіх перерахованих раніше галузях трібології. Ця інформація повинна широко використовуватися вченими - трібологами в процесі аналізу, створення нових матеріалів і технологій для трібосистем, розробки методик діагностування. Використання такої інформації на етапі проектування дозволить конструктору приймати правильні рішення при створенні нових конструкцій.

1.4 Загальні поняття та основні терміни

Згідно з ДСТУ 2823–94 "Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення" використовуються такі поняття.

Абразивне зношування – механічне зношування внаслідок дії твердих тіл або твердих частинок, які ріжуть чи дряпають поверхню матеріалу.

Адгезійне зношування – зношування внаслідок локального з'єднання двох твердих третьових тіл та глибинного виривання матеріалу з їхніх поверхневих шарів.

Адгезія в умовах тертя; адгезія – явище локального з'єднання двох твердих тіл, яке відбувається внаслідок дії молекулярних сил під час тертя.

Газове, рідинне, тверде мащення – мащення, в умовах якого розділення поверхонь тертя тіл, що рухаються одне відносно одного, відбувається за рахунок газоподібного, рідкого, твердого мастильного матеріалу.

Гідроабразивне, газоабразивне зношування – абразивне зношування внаслідок дії твердих тіл або твердих частинок, що їх переносить потік рідини.

Гідродинамічне (газодинамічне) мащення – рідинне (газове) мащення, в умовах якого повне розділення поверхонь тертя відбувається за рахунок тиску, що самовільно виникає в шарі рідини (газу) під час руху поверхонь одна відносно одної.

Гідроерозійне (газоерозійне) зношування – механічне зношування внаслідок дії потоку рідини (газу).

Гідростатичне (газостатичне) мащення – рідинне (газове) мащення, в умовах якого повне розділення поверхонь тертя тіл, які перебувають у стані відносного руху чи спокою, відбувається за допомогою рідини (газу), що подається під зовнішнім тиском у проміжок між поверхнями тертя.

Граничне мащення – мащення, в умовах якого тертя та зношування поверхонь, що рухаються одна відносно одної, визначаються їх властивостями,

а також тими властивостями мастильного матеріалу, які відрізняються від об'ємної в'язкості.

Електроерозійне зношування – зношування матеріалу внаслідок дії на поверхню тертя електричних розрядів.

Еласто-гідродинамічне мащення – мащення, в умовах якого характеристики тертя і товщина плівки рідкого мастильного матеріалу між двома поверхнями, що рухаються одна відносно одної, визначаються пружними властивостями матеріалів поверхонь тертя, а також реологічними властивостями мастильного матеріалу.

Елемент трібосистеми (трібоелемент) – тіла, що перебувають у контакті, а також мастильний матеріал і навколишнє середовище, які беруть безпосередню участь у процесі тертя.

Інтенсивність зношування – відношення величини зносу до шляху тертя, вздовж якого відбувалося зношування.

Зайдання – нестационарний стан трібосистеми, який характеризується саморозвитком процесу зростання сили тертя і пошкодження поверхонь тертя внаслідок адгезії переносу матеріалу.¹

Зовнішнє тертя (тертя) – явище опору відносному переміщенню, яке виникає між двома тілами в зонах контакту їх поверхонь, тангенціально до них.

Зношування – процес відокремлювання матеріалу від поверхні тертя твердого і (чи) збільшення його залишкової деформації в умовах тертя, що виявляється у поступовому змінюванні розмірів, форми і (чи) маси тіла.

Знос – наслідок зношування, визначений у прийнятих одиницях: довжини, об'єму, маси тощо.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню у певних умовах тертя, яка оцінюється величиною, оберненою до швидкості зношування чи інтенсивності зношування.

Змащування – підведення і (або) нанесення мастильного матеріалу до (на) поверхні тертя

Змішане мащення – мащення, під час застосування якого відбувається частково гідродинамічне, частково граничне мащення.

Кавітаційне зношування – механічне зношування в умовах руху твердого тіла в рідині, під час якого бульбашки газу руйнуються біля поверхні, що призводить до створення локального високого ударного тиску чи високої температури.

Коефіцієнт зчеплення – відношення найбільшої сили тертя спокою до нормальної сили, що притискує тіла одне до одного.

Коефіцієнт тертя – відношення сили тертя до нормальної сили, що притискує тіла одне до одного.

Мастильний матеріал – матеріал, який підводять (наносять) до поверх-

¹ – Зайдання може викликати припинення відносного руху.

ні тертя для зменшення сили тертя і (чи) зносу.

Мастильна здатність – властивість мастильного матеріалу зніжувати знос і силу тертя.

Машення – дія мастильного матеріалу, в результаті якої зменшується знос, пошкодження поверхні і (чи) сили тертя.

Механічне зношування – зношування матеріалу внаслідок механічних впливів під час тертя.

Механохімічне зношування – зношування матеріалу внаслідок механічних впливів під час тертя, що супроводжуються хімічною і (чи) електрохімічною взаємодією матеріалу з середовищем.

Найбільша сила тертя спокою – сила тертя спокою, перевищення якої призводить до виникнення переміщення одного тіла по поверхні іншого.

Окислювальне зношування – механохімічне зношування, під час якого переважає хімічна реакція матеріалу з киснем чи окисним середовищем.

Перенос матеріалу – явище, яке виникає під час тертя твердих тіл і полягає в тому, що матеріал першого тіла з'єднується з другим і, відокремлюючись від першого, залишається на поверхні другого.

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

Попереднє зміщення – відносне мікрозміщення двох твердих тіл в момент переходу від стану спокою до відносного руху.

Припрацювання – процес переходу трібосистеми до стаціонарного стану, зумовлений зміною геометрії поверхонь тертя, складу та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів тертьових тіл, а також фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів.

Припрацьовуваність – властивість матеріалів тертьових тіл в процесі припрацювання змінювати геометрію поверхонь тертя та фізико-механічні властивості поверхневих шарів, внаслідок чого відбувається зменшення сили тертя і зносу.

Прострибування – явище, що полягає в самочинному чергуванні і спокою або в чергуванні збільшення і зменшення відносної швидкості ковзання під час тертя руху.¹

Пристаюваність – властивість трібосистеми в умовах зовнішнього впливу змінювати і стійко відтворювати свою структуру в енергетично вигідному напрямку.

Стійкість заїдання – властивість трібосистеми працювати без заїдання під навантаженням.²

Сила тертя – сила, що чинить опір відносному переміщенню одного тіла по поверхні іншого під дією зовнішньої сили, і яка спрямована тангенційно до спільної границі між цими тілами.

¹ – Прикладом може бути рух, що виникає внаслідок автоколивань під час зниження коефіцієнта тертя з підвищенням швидкості ковзання.

² – Характеризується значенням навантаження, перевищення якого призводить до заїдання.

Стале тертя – стаціонарний стан трібосистеми, який характеризується динамічною рівновагою та саморегулюванням процесів у трібосистемі, в якому характеристики тертя і зношування залишаються сталими.

Структура трібосистеми – елементи трібосистеми, їхні властивості і зв'язки між ними, що виникають у процесі тертя.

Сумісність в умовах тертя – властивість матеріалів третьових тіл і мастильного матеріалу разом забезпечувати задані характеристики тертя і зношування та запобігати адгезії в умовах тертя.

Теплостійкість в умовах тертя – властивість трібосистеми працювати без заїдання під час розігрівання.¹

Тертя кочення – тертя руху, під час якого швидкості тіл однакові за величиною і напрямком, принаймні, в одній точці зони контакту.

Тертя кочення з проковзуванням – тертя руху двох тіл з одночасним тертям кочення і ковзання в зоні контакту.

Тертя ковзання – тертя руху, під час якого швидкості тіл в точках дотику відрізняються за величиною і (чи) напрямком.

Тертя руху – тертя двох тіл, що рухаються одне відносно одного.

Тертя спокою – тертя двох тіл при відсутності їх руху одне відносно одного.

Трібологія – наука про явища і закономірності тертя, зношування, мащення та взаємодії двох тіл під час їх переміщення одне відносно одного.

Тріботехніка – сукупність знань про методи і засоби, які використовуються у прикладних галузях трібології.

Трібосистема – сукупність усіх трібоелементів, що беруть участь у терті і зношуванні, їхніх властивостей і зв'язків, параметрів, які впливають ззовні на трібоелементи, а також характеристики тертя та зношування.

Утомне зношування – механічне зношування внаслідок руйнування від утоми в умовах багаторазового деформування мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару.

Фретингове зношування – механічне зношування тіл, що перебувають у контакті, в умовах малих коливальних відносних їх перемішень.

Фретинг-корозійне зношування – механохімічне зношування тіл, що перебувають у контакті, в умовах їх малих коливальних відносних перемішень.

Швидкість ковзання – різниця між швидкостями тіл в точках їх дотику в умовах ковзання.

Шлях тертя – відстань, яка проходить точка поверхні тертя одного тіла по поверхні іншого тіла.

¹ – Характеризується значенням температури, яка виникає у трібоелементі в наслідок зовнішнього підведення тепла і (чи) тепла, що утворюється в процесі тертя, перевищення якої призводить до заїдання.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

В останні роки розроблено ряд теорій тертя, при цьому в основу кожної покладено те чи інше явище, яке домінує при фрикційному контакті. Розглянемо деякі з них.

2.1 Молекулярно-механічна теорія тертя

Адгезійна теорія тертя заснована на висунутому Ф. Боуденом і Д. Тейбором положенні про те, що містки, які вступають у контакт нерівності, утворюють "містки зварювання" завдяки адгезії на плямах їхнього контакту. Сила тертя F обумовлена опором руйнуванню цих містків при відносному переміщенні контактуючих тіл:

$$F = \frac{\tau}{c\sigma_m} N, \quad (2.1)$$

де τ – напруга зрізу містків зварювання;

c – стала, що приблизно дорівнює 3;

σ_m – границя плинності більш м'якого матеріалу пари тертя;

N – навантаження на деталях.

У залежності від властивостей контактуючих матеріалів зріз містків зварювання може відбуватися по границі розділу нерівностей або по більш м'якому матеріалі. Зі збільшенням нормального навантаження ростуть пластична деформація контактуючих виступів і зближення тіл тертя. У результаті збільшуються розміри і кількість "містків зварювання", що супроводжуються зростанням сили тертя. Отже, сила тертя зростає пропорційно площі фактичного контакту, або навантаженню.

Молекулярна теорія тертя уперше була запропонована І. Дезаюльє в 1734 р., а розвиток одержала в ХХ ст. у працях В. Гарді, Г. Томлінсона, Б.В. Дерягіна. В її основі лежить положення про те, що тертя обумовлене силами міжмолекулярної або міжатомної взаємодії контакт діючих тіл. При терті молекули, розташовані на вершинах нерівностей, що вступають у контакт, зближаються настільки, що виникають сили взаємного відштовхування. З їх віддаленням, викликаним зсувом тіл при терті, виникають сили притягання, які перешкоджають розриву утворених зв'язків. Сукупність таких взаємодій між парами молекул контактуючих виступів обумовлює опір взаємному переміщенню тертьових тіл. Таким чином, при ковзанні поверхонь відбувається неперервна зміна пар молекул, що врівноважують нормальний тиск, який супроводжується розсіюванням енергії. Сила тертя розраховується за формулою Б.В. Дерягіна:

$$F = f(N + p_g A_r), \quad (2.2)$$

де f – коефіцієнт тертя;

p_g – рівнодіюча сила молекулярного притягання на одиницю площі фактичного контакту;

A_r – площа фактичного контакту.

Молекулярно-кінетична теорія тертя розроблена Г.М. Бартневим на основі гіпотези про природу тертя гуми, запропонованої А. Шаломахом. Сутність її полягає в тому, що ланцюг макромолекули контактує з поверхнею сполученого тіла в даній точці обмежений час, а потім перескакує в іншу точку.

При відсутності зовнішньої сили імовірність перескоку ланцюга в будь-якому напрямку однакова, а величина тангенціальної сили знижує потенційний бар'єр і збільшує імовірність перескакування в напрямку вектора швидкості. Сила тертя в цьому випадку зростає зі збільшенням швидкості ковзання, кількості ланцюгів молекул, які знаходяться в контакті з тілом, що з'єднується, енергетичного бар'єра, а також залежить від температури і молекулярних констант полімеру.

Надалі цю теорію розвинув А.В. Рогачов, який запропонував релаксаційну модель тертя полімерів по металу. Встановлено, що сила тертя визначається кількістю адгезійних зв'язків N_a і активних центрів молекул N , здатних утворити такий зв'язок при зустрічі з активною ділянкою поверхні металу. Числа N_a і N залежать від концентрації активного наповнювача в композиційному матеріалі, а також від швидкості і направленості протікання трибохімічних реакцій на плямах фактичного контакту, що сприяють зміні кількості активних центрів молекул.

Молекулярно – механічна теорія тертя розроблена І.В. Крагельським. Відповідно до цієї теорії, тертя має двоїсту природу: молекулярну і механічну, тобто тертя обумовлене подоланням сил молекулярної взаємодії, на плямах фактичного контакту і опором деформованого матеріалу переміщенню j . Отже, сила тертя F повинна складатися з молекулярної F_a і механічної F_d складових.

Сили молекулярної взаємодії на плямі контакту викликають утворення фрикційних зв'язків. Для відносного переміщення контактуючих тіл необхідно подолати сили молекулярної взаємодії і розрив молекулярних зв'язків. В міру переміщення нерівності розривів одних (старих) зв'язків утворюються інші. Отже, тертя являє собою безперервний процес руйнування і поновлення молекулярних зв'язків на фактичних плямах контакту A_r . Очевидно, що чим більше кількість плям контакту і їхні розміри, тим вищим повинно бути зусилля, необхідне для відносного переміщення контактуючих тіл. Отже, сила тертя $F_a \sim A_r$.

Друга складова сили тертя (деформаційна) обумовлена опором деформування матеріалу, що прилягає до впроваджених нерівностей рухомого трибоелемента. Проникнувши в поверхневий шар одного тіла жорстка мікронерівність іншого тіла, при збільшенні дотичного навантаження, буде деформувати цей шар. Перед нерівністю утворюється хвиля (валик) деформованого ма-

теріалу, а по краях матеріал відтискується в сторони. Під нерівністю матеріал підминається, утворюючи канавки, глибина яких складає частки мікрметра. Сила опору переміщенню контртіла, обумовлена деформуванням матеріалу поверхневого шару мікронерівностями, являє собою механічну складову сили тертя F_d , яка залежить від N , $F_d \sim N$.

Основні закономірності контактної взаємодії згідно з молекулярно-механічною теорією тертя. Розглянемо закономірності контактування поверхонь тертя з моменту зрушування елементів тертя.

Сили тертя спокою (F_n) називають зсувним зусиллям, що прикладається до контактуючих тіл, і не викликає їхнього взаємного ковзання (рис. 2.1, а). При цьому взаємне переміщення (L_n) досягається за рахунок деформації матеріалу виступів шорсткості в зоні контакту і називається попереднім зсувом. Деформування носить в основному пружний характер і зникає при знятті зусилля, що зрушує. Однак зі зростанням зусилля, що зрушує, попередній зсув набуває пластичного характеру і стає частково необоротним. На рис. 2.1, показана гранична величина попереднього зсуву (L_{nm}) і відповідно граничне значення сили тертя спокою, що називають статичною силою тертя. При подальшому збільшенні переміщення починається ковзання.

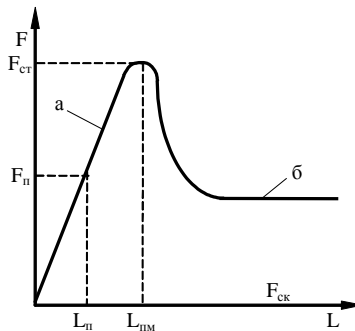


Рис. 2.1 Характерні випадки формування сил тертя:
а – сила тертя спокою; б – сила тертя ковзання

Силу тертя можна подати у вигляді добутку питомої сили тертя (τ) і фактичної площі контакту (A_r):

$$F = \tau A_r. \quad (2.3)$$

Під коефіцієнтом тертя розуміють відношення найбільшої сили тертя спокою до діючого на контактні нормального зусилля:

$$\mu = F/N. \quad (2.4)$$

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

У залежності від характеру мастильного прошарку розрізняють чотири види тертя: тертя без мастильного матеріалу; тертя в умовах граничного мащення; гідродинамічне (газодинамічне) і змішане (яке є частково гідродинамічним, а частково граничним мащенням). У першому випадку контактують поверхні, що не змазуються. Вони покриті окисними плівками і найтоншими шарами молекул газів і води, адсорбованими з навколишнього середовища. В другому випадку, крім перерахованих плівок, присутні молекули мастильних матеріалів у вигляді тонкого шару товщиною в кілька молекул, міцно пов'язани з поверхнею. У третьому випадку шар рідкого мастила цілком розділяє з'єднані сполучені поверхні.

Тертя без мастильного матеріалу і тертя в умовах граничного мащення схожі за своєю природою і мають загальні закономірності, оскільки при граничному терті мономолекулярні шари мащення міцно пов'язані з твердою поверхнею, мають твердоподібні властивості і служать ніби продовженням твердої фази. Тому, як і при терті без мастильного матеріалу, фактично має місце контакт двох твердих поверхонь. Відмінність полягає в різних значеннях коефіцієнта тертя: без мастильного матеріалу він звичайно більше 0,2, а при граничному його величина знаходиться в інтервалі 0,05...0,2.

Механізм виникнення тертя пояснює молекулярно-механічна теорія тертя. Згідно з цією теорією він має двоїсту молекулярно-механічну природу. Силу тертя можна подавати як суму молекулярної (адгезійної) і механічної (деформаційної) складових:

$$F = F_A + F_d. \quad (2.5)$$

Молекулярна складова обумовлена опором розриву молекулярних або міжатомних зв'язків, що виникають між контактуючими тілами. Розсіювання роботи тертя в теплоту пов'язане з пружною деформацією кристалічних ґрат. Робота зовнішньої сили переходить у потенційну енергію решіток. Після розриву зв'язку потенційна енергія переходить в енергію коливань атомів – у внутрішню.

Механічна складова викликана опором пружного і пластичного відтискування виступів контактуючих тіл, що утворилися при русі поверхонь, рис. 2.2.

На рис. 2.2, а показане ковзання твердого сферичного виступу по в'язкопружному півпросторі. Матеріал після проходження виступу через запізнювання деформації щодо навантаження не встигає відновлювати форму. Тому поверхні перед виступом і після несиметричні, а реакція опору, прикладена в центрі контактної поверхні, не збігається за напрямком з нормальним зусиллям. Це явище характеризується гістерезисом деформації. На рис. 2.3 показана крива гістерезису при розтягванні-стискуванні в'язкопружного стрижня. Крива *OM* відбиває процес навантаження, а крива *MN* – процес розвантаження. Через запізнювання деформації в той момент, коли напруження дорівнює нулю, деформація не зникає і дорівнює ε_0 . Тому слід, що залишився від руху

виступу, не встигає відновлюватися цілком, чого варто було б очікувати для ідеального пружного середовища.

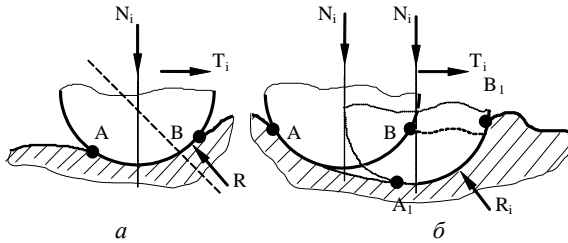


Рис. 2.2 Відтискування матеріалу при ковзанні:
a – пружне; *б* – пластичне

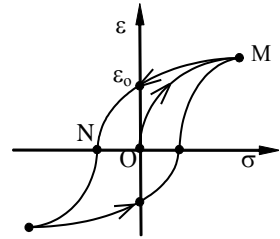


Рис. 2.3 Гістерезис

На рис. 2.2, б показана поведінка твердого виступу при ковзанні по пластичному середовищу. На початку, поки ковзання відсутнє, під дією нормального зусилля виступ заглиблюється. Контактна крива *AB* симетрична. При ковзанні задня границя виступу відривається від лунки. Усе навантаження зосереджується на передній границі, а дуга контакту займає положення *A₁B₁*. Спереду виникає валик матеріалу, що відтискується. Реакція опору не збігається за напрямком з нормальним зусиллям.

Оскільки молекулярна і механічна взаємодія здійснюється на фактичних площинах контакту, то питома сила тертя записується у такому вигляді:

$$\tau = \frac{F}{A_r} = \tau_A + \tau_{\Delta}, \quad (2.6)$$

де τ_A , τ_{Δ} – адгезійна і деформаційна складові питомого зусилля.

Численні спроби вивести розрахункове співвідношення для адгезійної складової (τ_A) не мали успіху через неможливість врахувати вплив різноманітних плівок, що покривають поверхні. У той же час для ювенільних (без плівок) металевих поверхонь встановлено, що при їхньому контакті адгезія обох поверхонь приводить до їх зрощування (холодне зварювання), і питома сила тертя близька до опору зсуву решітки. Останні дослідження показали, що на фактичній площі контакту, обумовленій змінанням субмікронерівностей, опір зрушенню контактуючих кристалів наближається до теоретичної міцності. Однак для реальних поверхонь, покритих плівками, адгезійна складова значно нижча. Залежність адгезійної складової питомої сили тертя від фактичного тиску ($\sigma_r = N/A_r$) виражається у вигляді двочленного закону:

$$\tau_A = \tau_0 + \beta \sigma_r, \quad (2.7)$$

де τ_0 і β – молекулярні константи тертя, визначені експериментально.

Таким чином, молекулярно-механічна теорія тертя ґрунтується на таких положеннях:

– взаємодія між тертьовими тілами здійснюється на дискретних ділянках контакту, що складають фактичну площу контакту (ФПК);

– оскільки фактична площа контакту мала порівняно з номінальною площею A_a , та на одиничних плямах контакту розвиваються тиски, достатні для зближення контактуючих виступів і виникнення міжмолекулярної взаємодії між ними. Сумарна сила міжмолекулярної взаємодії між зближеними ділянками поверхонь тертя являє собою молекулярну складову тертя. Критерієм оцінювання сил міжмолекулярної взаємодії є відношення $\tau_{зріз}/\sigma_0 \cdot \tau_{зріз}$ – опір зрізу; σ_0 – тимчасовий преділ міцності;

– при відносному переміщенні контактуючих тіл проникли виступи поверхні, одного тіла проорюють більш м'який матеріал іншого. Опір цього матеріалу переміщення в його об'ємі нерівностей поверхні тіла, що спряжується, обумовлює механічну складову тертя. Критерієм оцінювання внеску механічної складової у формуванні сил тертя є величина $h_{вист}/r_{вист}$, де $h_{вист}$ – висота виступу; $r_{вист}$ – радіус при вершині виступу;

– поверхні тертя реальних тіл покриті оксидними і адсорбційними плівками, тому міжмолекулярна взаємодія здійснюється не між самими тілами, а між плівками різної природи. Це забезпечує позитивний градієнт механічних властивостей за глибиною – необхідна умова зовнішнього тертя.

Відповідно до молекулярно-механічної теорії вираз для коефіцієнта тертя має такий вигляд:

$$f = \frac{\tau_{зріз}}{\sigma} + \beta + ka \sqrt{\frac{a}{r_{вист}}}, \quad (2.8)$$

де $\tau_{зріз}$ – опір зрізу при відсутності нормальних напруг;

σ – нормальна напруга на контактї;

β – п'єзокоефіцієнт, що характеризує зміцнення адгезійного зв'язку під дією нормальних напруг,

$r_{вист}$ – радіус заокруглення нерівностей,

k – коефіцієнт, що залежить від шорсткості поверхні, для найбільш типових видів обробки поверхонь, розповсюджених у машинобудуванні, $k = 0,44$;

a – відстань між поверхнями.

Перші два доданки характеризують молекулярну складову тертя, а третій – деформаційну. Якщо матеріал на плямах контакту деформується в основному пружно, значення f залежить від молекулярної взаємодії. При пластичному контактї істотну роль відіграє деформаційна складова.

Коефіцієнт тертя являє собою функцію ряду факторів, яка визначає умови роботи трібосистеми: навантаження, швидкість ковзання, наявність плівок на поверхнях тертя контактуючих тіл, мікрогеометрії поверхонь цих тіл, умов

тепловідводу тощо. Розглянемо деякі з них.

Нормальне навантаження. Вплив навантаження N на коефіцієнт тертя залежить від виду контактної взаємодії – пружної або пластичної. У загальному випадку залежність $f(N)$ немонотонна, (рис. 2.4). Положення мінімуму цієї кривої залежить від співвідношення молекулярної і механічної складових. При збільшенні відношення F_a/F_d мінімум кривої зміщається в зону менших значень N . В зоні малих навантажень (ліва гілка кривої) реалізується переважно пружний контакт і значення f визначається в основному молекулярною складовою коефіцієнта, тертя. Зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням N обумовлене, тим, що N росте швидше, ніж викликане цим ростом збільшення площі фактичного контакту, і як наслідок – сили тертя.

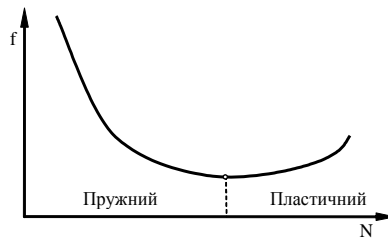


Рис. 2.4 Загальний вигляд функціональної залежності коефіцієнта тертя від навантаження

Після досягнення мінімуму f реалізується в основному пластичний контакт. При цьому тиск на плямах фактичного контакту дорівнює твердості більш м'якого матеріалу і не залежить надалі від навантаження. Отже, $F_a = const$ і коефіцієнт тертя залежать тільки від механічної складової, тобто від глибини відносного проникнення виступів дотичних тіл.

Швидкість ковзання. Вплив швидкості ковзання V на коефіцієнт тертя залежить від ряду факторів, у тому числі від навантаження і механічних властивостей тертьових тіл. У загальному випадку залежність $f(V)$ має два екстремуми: максимум і мінімум. Такий вигляд кривої характерний для недосконалого пружного контакту, рис. 2.5.

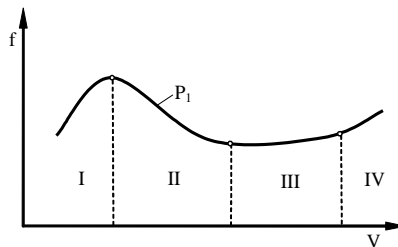


Рис. 2.5. Вплив швидкості ковзання на коефіцієнт тертя при різних контактних тисках

Зі збільшенням швидкості ковзання V в зоні малих її значень (ділянка I) трохи збільшується температура на плямах ФПК, що сприяє змінанню нерівностей, збільшенню площі їхнього контакту з контртілом і зростанню в'язкого опору деформування. У зоні контакту не встигає також утворитися захисна плівка достатньої товщини, і завдяки цьому на окремих ділянках поверхні тертя можливе мікрорізнання.

Падіння коефіцієнту тертя f при подальшому підвищенні V (ділянка II) обумовлене зниженням як молекулярної, так і механічної складових. Деформації матеріалу контактуючих виступів при збільшенні швидкості не встигають поширюватися на значну глибину, пружно-пластичне тіло поводитьяся як пружне, зменшуються глибина відносного проникнення нерівностей, розміри і кількість фрикційних зв'язків.

При високих швидкостях ковзання (ділянка III), поряд з характерними для другої ділянки явищами, нагрівається значний шар деформованого матеріалу і реалізується в більшій мірі пластична деформація. В результаті можливе зростання відносної глибини проникнення нерівностей і, як наслідок, деяке збільшення коефіцієнта тертя.

Температура в зоні контакту тертьових тіл. Залежність коефіцієнта зовнішнього тертя від температури T в зоні контакту тертьових тіл немонотонна (рис. 2.6.) Це обумовлене сумарним ефектом зміни молекулярної і механічної складових коефіцієнта тертя. Зі збільшенням T знижується F_a унаслідок утворення плівок і зниження міцності адгезійних сполук на зріз, а також зниження F_d , за рахунок збільшення твердості поверхневих шарів. Це викликає зниження коефіцієнта тертя. З наближенням до T_0 падіння f сповільнюється, оскільки збільшення твердості матеріалу не відбувається, а навпаки, через нагрівання поверхневих шарів відбувається зменшення твердості матеріалу, що сприяє збільшенню розмірів і кількості плям фактичної площі контакту, тобто F_a .

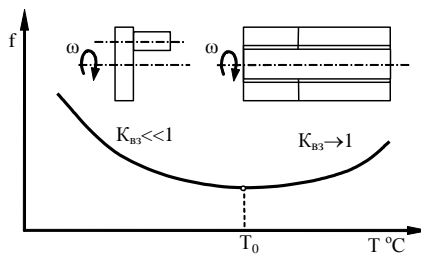


Рис. 2.6 Залежність коефіцієнта тертя від температури в зоні фрикційного контакту

Подальше зростання T призводить до збільшення F_a і F_d одночасно через нагрівання і втрату твердості поверхневого шару, що сприяє збільшенню коефіцієнта тертя в цілому (права гілка кривої).

Мікрогеометрія поверхонь тертя. Вплив мікрогеометрії на коефіцієнт тертя залежить від того, який вид контакту (пружний або пластичний) є домінуючим. При пружному контакті залежність $f = f(R_z)$ немонотонна, (крива 1 на рис. 2.7), де R_z - середньоарифметична висота шорсткості.

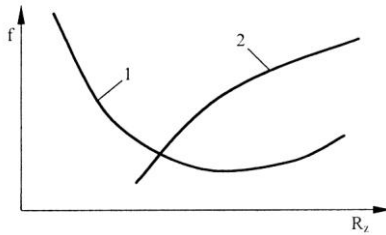


Рис. 2.7 Вплив шорсткості сполучення поверхонь на коефіцієнт тертя:
1-пружний контакт; 2- пластичний контакт

Збільшення R_z приводить спочатку до зниження площі фактичного контакту і зменшення молекулярної складової F_a . При подальшому збільшенні R_z радіуси заокруглення вершини нерівностей зменшуються. Це сприяє глибшому проникненню матеріалу і збільшенню F_d (права гілка кривої 1 на рис. 2.7). При пластичному контакті молекулярна складового тертя від мікрогеометрії не залежить, а механічна – росте, що і обумовлює монотонне зростання f при збільшенні R_z (крива 2 на рис. 2.7).

Фізико-механічні властивості контактуючих тіл. Вплив властивостей контактуючих тіл на коефіцієнт тертя обумовлений кількістю і міцністю фрикційних зв'язків. Так, при збільшенні твердості тіл, що спряжуються, зменшуються глибина відносного проникнення і кількість контактуючих нерівностей. Це призводить до одночасного зменшення молекулярної і механічної складової тертя.

В умовах пружного контакту коефіцієнт тертя залежить від модуля пружності контактуючих тіл. Зі збільшенням модуля пружності зменшується фактична площа контакту і глибина відносного проникнення нерівностей, що зменшує відповідно F_a і F_d і призводить до падіння коефіцієнта тертя.

Закономірності руйнування поверхні тертя згідно з молекулярно-механічною теорією тертя. Відповідно до утомної теорії, зношування обумовлене наявністю таких факторів:

- дискретним характером взаємодії третьових тіл, тобто взаємодією нерівностей контактуючих поверхонь на дискретних ділянках, що утворюють фактичну площу контакту;
- багаторазово повторюваним імпульсним тепловим впливом і деформаціями локальних об'ємів матеріалу поверхневого шару в зонах контакту з нерівностями;
- наявністю мікрodefектів структури та їхньою акумуляцією в поверхневому шарі тіла, що зношується у процесі тертя;
- існуванням характерного для кожного матеріалу граничного стану, що визначає умови його руйнування (наприклад, гранична щільність енергії, на-

копиченої в локальному об'ємі).

Руйнування поверхні тертя і утворення часток зносу при утомному зношуванні являють собою багатостадійний процес. Підлягаючий руйнуванню мікрооб'єм поверхневого шару тіла, що зношується, зазнає деформації в процесі тертя. Це супроводжується появою ушкоджень (пружних спотворень решіток, дислокацій) у мікрооб'ємі. Багаторазове деформування матеріалу призводить до підвищення концентрації мікрodefектів і після досягнення певної концентрації до утворення ультрамікротріщин. Подальше навантаження матеріалу викликає їхній розвиток і злиття. Результатом цього процесу є відділення від основного матеріалу його частин, які видаляються згодом із зони тертя у вигляді часток зносу.

Інтенсивність утомного зношування I_h описується рівнянням І.В. Крагельського, отриманим для множинного контакту. Контакт моделюється площиною (матеріал, що зношується), яка сполучається з набором твердих сферичних сегментів однакового радіуса, розташованих по висоті так, що розподіл матеріалу в поверхневому шарі моделі і реальної поверхні описується однаковою опорною кривою. Рівняння має вигляд:

$$I_h = k k_{\text{єз}} \sqrt{\frac{a}{R}} \cdot \frac{p_a}{p_r} \cdot \frac{1}{n}, \quad (2.9)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від розташування нерівностей по висоті, звичайно $k = 0,2$;

$k_{\text{єз}}$ – коефіцієнт взаємного перекриття третьових тіл;

a/R – відносне зближення контртіла і зношуваного матеріалу;

p_a, p_r , – номінальний і фактичний тиск(в контактї);

n – кількість циклів до руйнування деформованого об'єму матеріалу, що зношується.

Число циклів n до руйнування є степеневою функцією діючих на пружному контактї напруг $\sigma_{np} = k' f p_r$:

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{np}} \right)^{t_y}, \quad (2.10)$$

де σ_0 – руйнівне напруження при однократному навантаженні;

t_y – коефіцієнт утоми, змінюється від 1,3 до 12 і залежить від матеріалу зношуваного тіла;

k' – коефіцієнт, що залежить від природи зношуваного матеріалу.

Для пластичного контакту кількість циклів до руйнування є функцією амплітудних значень деформацій ε , які зазнає матеріал, що зношується, у процесі тертя:

$$n = \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} \right)^{t_n}, \quad (2.11)$$

де ε_p – деформація матеріалу при розриві;

t_n – коефіцієнт втоми, вимірюваний від 2 до 3, тобто в більш вузькому інтервалі, ніж при пружному контакті.

Природа руйнування при одноосьовому циклічному і фрикційному навантаженнях істотно не відрізняється. З огляду на це, коефіцієнт втоми може бути визначений при обробці кривих об'ємної втоми Велера, якщо при терті матеріал, що зношується, не вступає в механохімічну взаємодію з навколишнім середовищем, мастильним матеріалом або контртілом. Складові, наведені в формулі напруги і деформації, можуть бути визначені розрахунковими шляхом або експериментально.

На сьогодні немає єдиної думки про те, у якій зоні (на поверхні або в підповерхневому шарі) починається руйнування, і чи є утворення часток зносу результатом розвитку підповерхневих або поверхневих тріщин. Це зумовлено виникненням при терті зони пластичних деформацій в підповерхневому шарі, в якому переважно концентруються дислокації.

Скупчення мікрodefektів і пустот на відстані від поверхні тертя сприяє розповсюдженню мікротріщин паралельно поверхні тертя. Розвиток мікротріщин може відбуватися або шляхом з'єднання порожни, або внаслідок збільшення однієї з них. Після багаторазового навантаження матеріалу тіла, що зношується, тріщина, поширюючись паралельно поверхні тертя, відокремлює від основного матеріалу тонкий шар. При виході її на поверхню утвориться частка зносу.

Існують численні дослідження, що підтверджують можливість реалізації поверхневого механізму руйнування металів і полімерів. Шліф сталевго зразка, зображений на рис. 2.8. Видно, що, розташовані перпендикулярно до поверхні тертя тріщини поширюються всередину зразка. На деякій глибині вони повертаються і орієнтуються паралельно поверхні тертя (тріщини 1 і 2). При цьому можливо злиття тріщин і викрашування мікрооб'єму матеріалу, укладеного між ними.

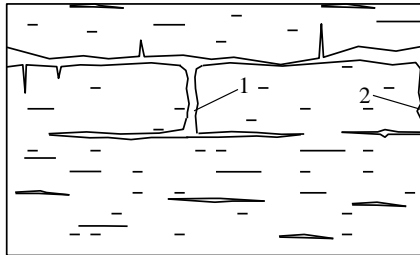


Рис. 2.8 Розповсюдження поверхневих тріщин втоми по глибині зразка сталі

Утворення часток зносу може відбуватися в результаті одночасного зростання як поверхневих, так і підповерхневих тріщин.

Зношування полімерних матеріалів є наслідком імпульсно теплових впливів, що протікають на дискретних ділянках контакту, і напруг, що призводять до необоротних змін їхньої структури.

Короткочасне підвищення температури в точках контакту призводить до збільшення рухливості ланцюгів макромолекул і зниження сил внутрішньо і міжмолекулярної взаємодії. Збільшення сегментальної рухливості супроводжується ростом імовірності необоротного зсуву ланцюгів макромолекул під дією механічних напруг за умови, якщо сили внутрішню або міжмолекулярної взаємодії виявляються менше діючих напруг.

З накопиченням розривів зв'язків у процесі тертя збільшуються напруги на сусідніх, менш напружених зв'язках і створюються умови для їх розриву. В результаті в структурі полімеру утворюються мікрodefекти. Після багаторазового прикладання навантаження утворюються мікротріщини в зонах максимального скупчення мікрodefектів, у яких локалізуються механічні напруги. При збільшенні неоднорідності розподілу напруг завжди мають місце дефекти технологічного походження, а також аморфні прошарки у полімерів, що кристалізуються, і наявність двох різко відмінних за енергією типів взаємодії: хімічної (внутрішньо молекулярної) і фізичної (міжмолекулярної). Кінетика розвитку тріщин і утворення часток зносу визначається типом полімерного матеріалу і співвідношенням теплового і механічного навантажень на плямах фактичного контакту.

Інтенсивність утомного зношування залежить від навантаження, швидкості, наявності мастильного матеріалу, механічних властивостей матеріалу, що зношується, топографії поверхонь, що спряжуються, і фрикційних властивостей третьових тіл.

Вплив нормального навантаження N на швидкість утомного зношування може бути виражений степеневою функцією вигляду:

$$I_h \sim p_a^{1+\beta_0 t_y}, \quad (2.12)$$

де p_a – номінальний тиск на контакті;

β_0 – коефіцієнт, що залежить від шорсткості контртіла, орієнтовно дорівнює 0,05;

t_y – коефіцієнт утоми матеріалу.

Показник степеня в наведеній формулі змінюється в інтервалі від 1,4 до 3. При терті без мастильного матеріалу показник степеня наближається до 1, а при наявності мастильного матеріалу він значно перевищує 1.

Вплив навантаження на I_h , здійснюється в основному при посередництві коефіцієнта тертя і температури. Так, збільшення N призводить до зростання температури в зоні тертя, зміни властивостей поверхневого шару, збільшення

частки пластичних деформацій та їхніх амплітудних значень. Наслідком цього є зниження опору матеріалу утомному зношуванню.

Вплив швидкості ковзання на інтенсивність зношування I_m здійснюється через швидкість деформування матеріалу, що зношується, і в більшій мірі через температуру в зоні тертя. Найбільше швидкість ковзання впливає на зношування полімерів і композитів на їхній основі. У загальному випадку залежність $I_m(V)$ відображається кривою з мінімумом. В зоні малих швидкостей збільшення V призводить до зменшення часу існування фрикційних зв'язків і глибини відносного проникнення нерівностей поверхні контртіла. Деформації матеріалу в точках контакту зменшуються, інтенсивному деформуванню піддається більш тонкий поверхневий шар. В результаті це призводить до зниження інтенсивності зношування матеріалу. При високих швидкостях ковзання визначальна роль у процесі руйнування поверхневого шару належить температурі. Підвищення V викликає зростання температури в зоні тертя. Це супроводжується падінням модуля пружності і міцності матеріалу поверхневого шару, ростом контактних деформацій і коефіцієнта утоми. Результатом зміни зазначених факторів є підвищення інтенсивності зношування тертьових тіл. У даному випадку може мати місце малоциклова утома матеріалу, що зношується.

2.2 Структурно-енергетична теорія тертя

Явища, що мають місце при терті і зношуванні, багато в чому визначаються властивостями матеріалів, з яких виготовлені деталі машин, а також станом їхніх поверхневих шарів. Розглядання цього питання має на меті засереджити увагу до вивчення процесів руйнування поверхонь тертям, які будуть викладені надалі, оскільки для їхнього розуміння необхідно володіти мінімальною сукупністю знань з термодинаміки, фізики твердого тіла і фізичного металознавства.

Вважається, що при терті навантажені ділянки поверхонь одержують енергетичні впливи до 100 еВ/(атом·с), тобто на рівні руйнування атомних зв'язків. Однак у дійсності частка латентної (накопиченої) енергії, яка створює руйнування, знижується до 4...5 порядків. Це зниження руйнівної енергії, її розсіювання обумовлене дисипативними властивостями поверхневих структур. Виходячи з термінології фізичного металознавства у трібології їх прийнято називати дисипативними структурами. Сучасні підходи до розуміння явищ, що відбуваються під час тертя, пов'язують ці процеси із самоорганізацією дисипативних структур, досліджуваних синергетикою і термодинамікою нерівноважних процесів.

2.2.1 Структура і дефекти матеріалів трібосистем

Конструкційні матеріали, які застосовуються у трібосистемах, поділяються на кристалічні та аморфні. З фізичної точки зору твердими тілами вважаються тільки кристали. Їхні атоми розташовуються в вузлах регулярної просторової стру-

ктури – кристалічних решітках, структурною одиницею яких є елементарний осередок. Приклади ряду структурних схем кристалів наведені на рис. 2.9.

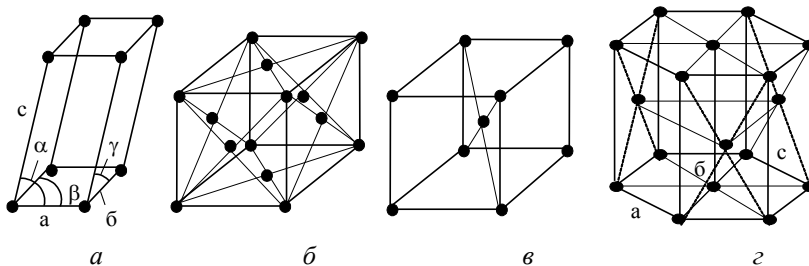


Рис. 2.9 Схеми елементарних осередків кристалів

У загальному випадку елементарний осередок має вигляд косокутного паралелепіпеда, (рис. 2.9, а) який характеризується значеннями сторін a , b , c і кутів α , β , γ . За співвідношенням сторін і кутів виділяють 7 кристалічних систем. Найбільш розповсюдженими є решітки кубічні (рис. 2.9, б, в) і гексагональні (рис. 2.9, г). Якщо в центрах граней куба розташовуються додаткові атоми, то решітки називаються гранецентрованими (ГЦК), якщо атом впроваджується в центр куба – решітки об'ємноцентровані (ОЦК). Гексагональні щільно упаковані решітки мають осередок з основою у вигляді правильного шестикутника. Кубічні решітки типу ГЦК і ОЦК характерні для сталей. Між атомами в решітках можливий зв'язок 3-х типів: іонний, ковалентний, металевий. У першому випадку у вузлах знаходяться позитивні і негативні іони, у 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 залишають свої атоми і здійснюють хаотичний тепловий рух у загальному полі атомних залишків, які знаходяться у вузлах решіток (вільні електрони).

Між молекулами в молекулярних решітках діють сили Ван-дер-Ваальса, енергія яких приблизно на 2 порядки нижча, ніж в атомних зв'язках. Особливим видом молекулярної взаємодії є водневий зв'язок. Слабко екранований одним електроном ядро атома водню, який бере участь у ковалентному зв'язку, може притягатися до сильно електронегативних атомів (кисень, фтор) і утворювати з ними другий зв'язок. Водневий зв'язок міцніший за інші міжмолекулярні зв'язки. Він характерний для взаємодії молекул вуглеводнів, зокрема полімерів, з киснем окислів металів є найважливішою формою зв'язку між молекулами води в рідкому стані й у виді льоду. У табл. 2.1. подані величини енергії перерахованих видів зв'язків і зазначені характерні властивості кристалів.

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 гарна іонна провідність при високих температурах. Високі 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 Ar, CH ₄	~ 10	Низька температура плавлення, сильна стискальність, пластичність, повзучість, в'язка пружність
Водневий	H ₂ O, HF	~ 50	Схильність до утворення розгалужених багатомолекулярних структур

Дефекти кристалів поділяють на нульвимірні (точкові), одновимірні і двовимірні. До точкових відносяться енергетичні, електронні і атомні. Найбільш поширені енергетичні дефекти – фонони-кванти хвиль розтягування-стискування і зрушення (звукові хвилі). Тепло в кристалі поширюється також у виді механічних хвиль зі звуковою швидкістю. У квантовій механіці поширення звукових хвиль, як і електромагнітних, розглядається як рух часток – фононів. Енергія фонона, як і фотона, за формулою Планка дорівнює $h\nu$. До електронних дефектів належать надлишкові електрони, дірки, екситони. Останні являють собою пари електрон-дірка, пов'язані кулонівськими силами.

Основні види атомних дефектів включають вакансії (рис. 2.10, а), атоми в міжвузлях (рис. 2.10, б), чужорідні атоми у вузлах. Відстані між атомами в різних напрямках решіток (рис. 2.10, в) різні (AA, AB, AB). Оскільки від міжатомної відстані залежать фізичні властивості кристалів: міцність, електропровідність, показник переломлення тощо, то ідеальні кристали є анізотропними середовищами (у різних напрямках різні властивості).

Анізотропія властивостей характерна для ідеальних кристалічних решіток – монокристалів. Монокристали вирощуються при строго контрольованій температурі і тиску з ретельно очищеного від домішок матеріалу. Їхня міцність близька до ідеальної. Якщо при відливанні виробу ці умови не дотримуються, то кристалізація починається одночасно на безліч центрів, якими є домішки атоми та інші дефекти. У результаті виникає безліч довільно орієнтованих мо-

нокристалів з розмірами порядку десятків мікрметрів (рис. 2.11). У той час, як кожен кристаліт має анізотропію, тверде тіло, яке складається з багатьох тисяч кристалів, у середньому однорідне, практично ізотропне і називається полікристалом. Звичайні конструкційні матеріали є полікристалами.

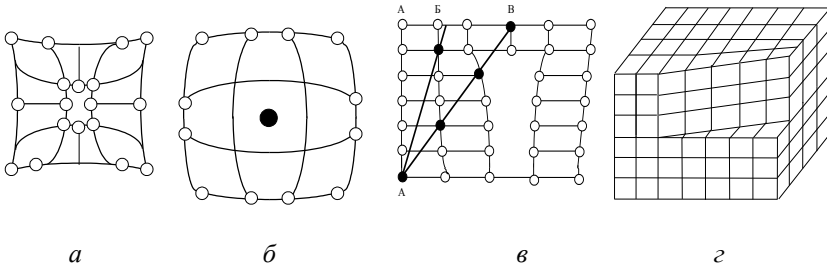


Рис. 2.10 Дефекти кристалічних решіток

Одномірні дефекти – дислокації відіграють величезну роль у поведінці кристалів при деформації. Найпростіша лінійна дислокація являє собою відсутній ряд атомів (рис. 2.11, а). Більш складною є гвинтова дислокація (рис. 2.11, б), що виникає в результаті повороту однієї частини кристала щодо іншої. Пластична деформація кристалів здійснюється при зсувних напругах, у багато разів менших, ніж теоретичні, завдяки руху дислокацій, що починається при порівняно невеликій відносній деформації порядку $10^{-4} \dots 10^{-3}$. Коли дислокація проходить через весь кристал, одна частина останнього зміщується щодо іншої на величину міжатомної відстані. Зважаючи на те, що щільність дислокацій велика (складає на початку зрушення $\sim 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$), то зрушення призводить до однорідного ковзання безлічі блоків кристала один відносно одного з виходом дислокацій і утворенням сходинок на границях тіла. Рухливість дислокацій, а отже швидкість пластичної деформації, росте по експоненті з ростом температури.

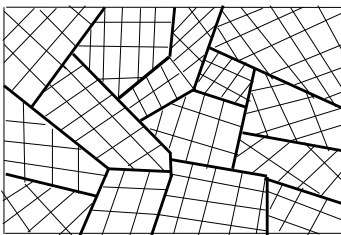


Рис. 2.11 Схема полікристала

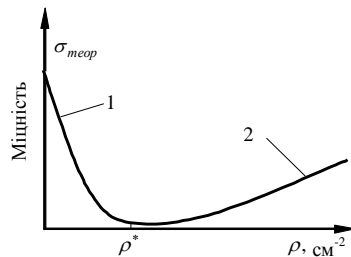


Рис. 2.13 Крива міцності

На рис. 2.12 показана залежність міцності матеріалу від щільності дефектів ρ . Спочатку зростання кількості дефектів (дислокацій) призводить до падіння міцності. Після досягнення мінімуму міцність наростає. У цьому випадку

дку виявляється взаємодія дислокацій одна з одною та іншими дефектами, яка призводить до гальмування руху дислокацій. Тому існують два способи зміцнення матеріалів: зниження кількості дефектів, тоді міцність наближається до теоретичної (ділянка 1 на кривій міцності), або збільшення щільності дефектів (ділянка 2). Обидва шляхи реалізовані в промисловості. У строго контрольованих умовах одержують високоміцні волокна (наприклад з бору), близькі за будовою до бездефектних монокристалів. На основі цих волокон виготовляють метало-композиційні матеріали з величезною міцністю на розрив. З таких легких і міцних матеріалів розпочато виготовлення кузовів гоночних автомобілів. Іншим прикладом одержання виробів з металів, що містять найменше дефектів, є технологія виготовлення лопаток турбін турбореактивних двигунів. На сучасному етапі лопатку вирощують як монокристал у спеціальних формах в строго контрольованих умовах.

Інший шлях полягає в насиченні кристала дефектами за рахунок загартування, легування або механічного наклепу. Легування приводить до появи в решітках сторонніх атомів. Загартування викликає здрібнювання зерен полікристала, причому границі зерен є двовимірними дефектами. На них розсіюються дислокації. Деформаційне зміцнення – наклеп приводить до утворення величезної кількості нових дислокацій, який перешкоджає їхньому взаємно-му переміщенню.

Аморфні речовини, на відміну від кристалічних, мають ближній порядок у розташуванні молекул, який стає хаотичним при віддаленні від цієї молекули на кілька діаметрів. У таких речовин відсутня точка плавлення. Вони ізотропні. Плин, як і в рідинах, відбувається при будь-якому навантаженні і різко інтенсифікується з підвищенням температури, тому вони не мають межі плинності. Напруги і деформації є функціями навантаження, часу і температури. До таких речовин відносяться багато полімерів. Макромолекули полімерів мають ланцюг із сотень і тисяч атомів вуглецю, до якого бічними зв'язками приєднані групи ОН, СООН, NH₂, атоми водню, хлору, фтору. До складу молекул можуть входити бензольні кільця та інші сполуки атомів. Між макромолекулами діють сили Ван-дер-Ваальса. Як конструкційні матеріали використовуються термопластичні і терморективні полімери. До термопластичних належать поліетилен, вініпласт, капрон, нейлон тощо. Вони розм'якшуються під дією температури. У них, поряд з аморфними, є і кристалічні зони. Прикладом цілком кристалічного полімеру є фторопласт – унікальний хімічно інертний теплостійкий матеріал з надзвичайно низьким коефіцієнтом тертя.

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

Особливу групу складають еластомери, що мають здатність до великих, порядку сотень відсотків відносних пружних деформацій (гуми, поліурета-

ни). Великі деформації пов'язані з особливою формою макромолекул, які скручені у клубки і розпрямляються при розтягуванні. За рахунок введення різних наповнювачів з полімерів вони створюють композиції, що мають комплексом фізико-механічних і хімічних властивостей.

2.2.2 Фізичні властивості поверхневих шарів

Атоми, що знаходяться усередині тіла, взаємодіють при найбільш щільному розташуванні з 12 сусідніми (рис. 2.13). Результуюча усіх сил взаємодії наближається до нуля. Частка, котра знаходиться на поверхні, взаємодіє з 6 сусідніми. Рівнодіюча сил притягання з боку сусідів F спрямована усередину тіла. Інакше кажучи, F діє на граничну молекулу. Оскільки енергія сил притягання негативна, то поверхнева частка має енергію, надлишкову в порівнянні з тією, що знаходиться усередині (поверхнева енергія). Надлишкова енергія характеризує здатність до міжмолекулярного притягання поверхонь, що називають адгезією. Адгезія виявляється в прилипанні. Притягання між шарами атомів усередині тіла називають когезією.

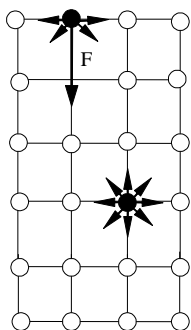


Рис. 2.13 Атоми в об'ємі і на границі

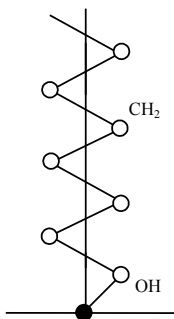


Рис. 2.14 Молекула ПАР

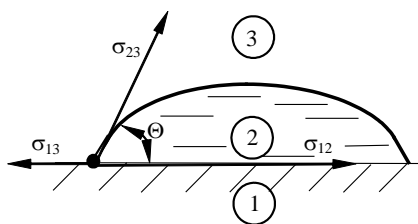


Рис. 2.15 Сили натягу

Наявність не скомпенсованих зв'язків у граничних шарах приводить до осідання на поверхні молекул речовин з навколишнього середовища, що знижує запас поверхневої енергії. Процес притягування поверхнею молекул називається адсорбцією. У результаті зменшення запасу поверхневої енергії виділяється теплота адсорбції. Процес, зворотний адсорбції, називається десорбцією. Розрізняють адсорбцію фізичну і хімічну. Фізична адсорбція пов'язана з притяганням сторонніх 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 відбувається

окислення поверхонь, які викликає корозію. Сорбована волога і температура стимулюють процес окислювання. Збільшення окисної плівки спочатку відбувається швидко, потім сповільнюється. Плівки розрізняють за товщиною: тонкі (товщина до 40 нм), середні (до 500 нм), товсті – видимі (товщиною більш 500 нм). Окисли бувають м'якими і пухкими, наприклад, у міді, заліза і його сплавів (іржа). Тверді і суцільні плівки утворюються на алюмінії, кольорових металах. Властивості окисних плівок звичайно істотно відрізняються від властивостей матеріалу основи. Найбільш важливими є коефіцієнт теплового розширення, крихкість, співвідношення адгезійної і когезійної міцності. Через різні властивості плівки можуть розтріскуватися і відшаровуватися, що істотно впливає на зношування при терті.

Особливе значення має фізична адсорбція молекул поверхнево-активних речовин (ПАР). До них відносяться, зокрема, органічні речовини, молекули яких мають полярні групи (ОН, СООН, NH₂) і неполярні – CH₂ (рис. 2.14). Молекули ПАР активними групами сорбуються на активних центрах поверхні, утворюючи молекулярний ворс, що розділяє пари контактуючих поверхонь та істотно знижує тертя.

ПАР, адсорбовані на поверхні твердого тіла, здатні змінювати характер взаємодії з рідиною (змочування). У залежності від того, як орієнтуються молекули ПАР щодо твердої поверхні, остання може добре змочуватися (гідрофільна) або погано (гідрофобна поверхня). Так, якщо молекулярний ворс спрямований полярними групами до поверхні, а протилежні кінці є неполярними, то змочування гарне, якщо орієнтація молекул протилежна – змочування погане. Оцінюється гідрофільність проводиться за величиною кута змочування Θ (рис. 2.15). При змочуванні $0 \leq \Theta < \pi/2$, при незмочуванні $\pi/2 < \Theta \leq \pi$.

Оскільки система прагне скоротити запас поверхневої енергії, то тіло намагається зменшити площу поверхні. Крапля рідини набуває сферичної форми, оскільки сфера має найменше 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 по контуру силами натягу.

Мірою надлишкової поверхневої енергії є коефіцієнт поверхневого натягу σ , що дорівнює надлишковій енергії в розрахунку на одиницю площі поверхні або силі натягу, що діє на одиницю довжини контуру елемента поверхні. На рис. 2.15. показані сили натягу на границях розподілу 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. 2.16), під якими виникає тиск, що розраховується за формулою Лапласа і спрямований до центру кривизни:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma}{r}, \quad (2.13)$$

де r – радіус капіляра.

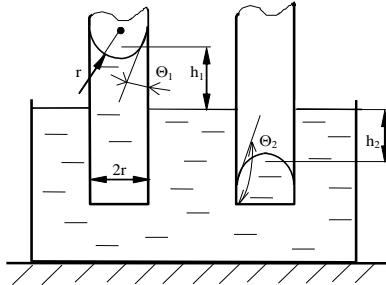


Рис. 2.16 Капілярний ефект

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

$$h = \frac{2\sigma\cos\Theta}{r\rho g}, \quad (2.14)$$

де ρ – густина рідини;

g – прискорення вільного падіння.

Капілярний ефект має велике значення для пористих тіл. Він використовується для подачі мастила в зону тертя в підшипниках з пористими втулками.

Адсорбовані молекули ПАР, знижуючи поверхневий натяг, зменшують опір пластичної деформації поверхневого шару, пластифікують його. Це явище називають ефектом П.А. Ребіндера. Матеріал легше обробляється, тому до складу мастильно-охолоджувальних рідин, застосовуваних при механічній обробці металів, додають ПАР. Іншим проявом ефекту Ребіндера є проникнення молекул ПАР в систему мікротріщин і місця скупчення дислокацій.

Найбільш важливими для трибології фізико-механічними показниками поверхневих шарів є мікротвердість H_μ , модуль Юнга і зсув E , G , межа зсувної міцності τ_s . Ці показники визначають процеси тертя і зношування. Мікротвердість визначається найчастіше методом вдавнення в досліджувану поверхню алмазної піраміди з кутом між гранями 136° з навантаженням N . Під мікроскопом вимірюють діагональ відбитка d . Величина мікротвердості розраховується за формулою:

$$H_\mu = 1,854 \cdot N/d^2. \quad (2.15)$$

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

$$H_{\mu} \cong 3\sigma_s \cong 6\tau_s . \quad (2.16)$$

Для оцінювання фізичних властивостей поверхневих шарів застосовуються методи оптичної, електронної, іонної мікроскопії, рентгенівського спектрального мікроаналізу, дифракції повільних електронів і рентгенівських променів з малими кутами ковзання, екзотелектронної емісії тощо.

Вплив пластичного деформування на службові властивості поверхневого шару трібосистем. 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 механічному впливі інтенсивно утворюються і переміщуються дислокації, виникають нові структури, пов'язані зі здрібнюванням і орієнтацією зерен у напрямку дії сил. Деформування (витягування) зерен та їхня орієнтація відбуваються не тільки при механічній обробці поверхонь, але і при терті. Подібні зміни структури в поверхневих шарах називають текстуруванням. Наявність орієнтації текстурованих зерен, що відбувається в напрямку руху обробного інструменту або тертя, змінює міцність, твердість матеріалу, магнітні, електричні та інші властивості (рис. 2.17). Текстуровані шари мають високий ступінь анізотропії.

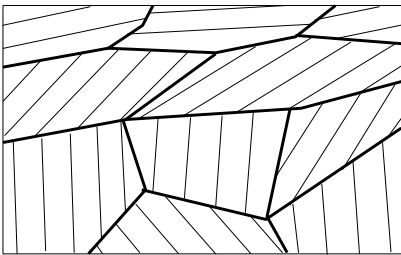


Рис. 2.17 Текстуровання

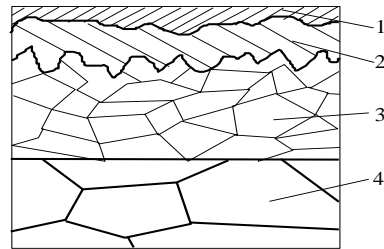


Рис. 2.18 Будова граничного шару

При текстуруванні, що відбувається при обробці або терті, в самому поверхневому шарі і в підшарі виникають залишкові напруги розтягування-стискування, різні дефекти у вигляді мікротріщин і пор. Пластичне деформування супроводжується тепловиділенням. Збільшення локальних температур прискорює окисні процеси, чому сприяє середовище (охолоджуванні емульсії, змащення). У поверхневому шарі при терті можуть відбуватися фазові перетворення.

Зміну міцності при деформації поверхневого шару називають деформаційним зміцненням або наклепом. На рис. 2.18 показана схема граничного

шару після механічної обробки. Верхня частина 1 являє собою шар адсорбованих молекул рідин і газів, включаючи ПАР. Наступний шар 2 складається з оксидів. Його товщина звичайно порядку 10 нм. Сюди ж входять пилові включення, продукти зносу інструмента. Шар 3 складається з кристалітів, які зазнали змін під дією пластичної деформації і температури. Саме він і визначає експлуатаційні властивості (зносостійкість) деталі. Далі йде основа 4, не порушена обробкою. Чим глибше поширюється пластична деформація, наприклад, при обробці різанням, під час розкочування, калібрування, тим товстіший шар 3. З оздоблювальних операцій найбільшої товщини цей шар досягає при обробці лезом. У таблиці 2.2 наведені дані про властивості шару 3.

Таблиця 2.2 - Властивості деформованого шару

Вид обробки	$H_{\text{цпов}}/H_{\text{ц}} \text{ об'ємн.}$	Товщина шару h , мкм
Гостріння	1,2...2	30...200
Фрезерування	1,4...2	40...200
Чистове гостріння	1,5...2	20...75
Шліфування	1,5...2,5	30...60
Притирання	1,1...1,2	3...7

На рис. 2.19 зображений типовий розподіл мікротвердості після механічної обробки. Найбільша твердість спостерігається не на поверхні, а на глибині порядку 10...20 мкм. На сталевих поверхнях верхній шар під впливом тертя або багаторазової пластичної передеформації може розміцнитися. У ньому відбувається тонке здрібнювання кристалів і структура наближається до аморфної. Такий шар, товщина якого звичайно складає порядку 5 мкм, називається шаром Бейльбі.

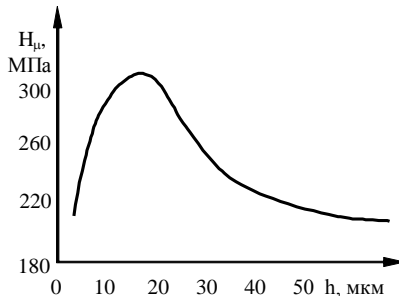


Рис. 2.19 Розподілення мікротвердості по глибині

Кількісно ступінь анізотропії поверхневих шарів може бути оцінений застосуванням статистичних методів шляхом Фур'є-аналізу поверхонь знятих на растровому електронному мікроскопі при різних збільшеннях.

Дамо короткий аналіз цього виду досліджень.

Напрямок упорядкованості структури завжди можна охарактеризувати

функціями зсуву, повороту і порушення періодичності, тобто відповідно функціями $f(x, y, z)$, $f(\alpha, \beta, \gamma)$, і $P(x, y, z)$. Усі ці характеристики, що відбивають ступінь організації структури, виявляються в спектрі і можуть бути зареєстровані і якісно оцінені скануванням вузького електронного променя по аналізованій поверхні. Фур'є-аналіз отриманого спектра здійснюється за допомогою спеціалізованої програми, адаптованої до більшості сучасних комп'ютерів. У цій програмі аналізується двовимірний Фур'є-спектр. Різні ділянки структури по різному відбивають скандувальний промінь, що обумовлює зміну (відбитого) сигналу, який реєструється.

Використання Фур'є-аналізу при металофізичних дослідженнях дозволяє оцінити вклад текстурування поверхневих шарів на зносостійкість триботехнічних матеріалів.

Відповідно до термодинаміки поверхневий шар можна розглядати як відкриту термодинамічну систему, здатну обмінюватися енергією і речовиною з навколишнім середовищем і яка характеризується комплексом інтенсивних характеристик. Наявністю сорбційних процесів на поверхні матеріалів робить їх схожими на мембрани, але, на відміну від звичайних мембранних систем, поверхневий шар має ще й об'ємні характеристики і, отже, комплексом власних інтенсивних характеристик. У рамках термодинамічного підходу з'явилася можливість 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. Для опису зношування було зроблено спроби вивести рівняння стану поверхневого шару у вигляді загальних рівнянь балансу енергії або балансу ентропії. Це призвело до створення енергетичних моделей, що зображують функціональну залежність швидкості зношування від термодинамічних факторів:

$$J = f(U, S, t, \dots), \quad (2.17)$$

де J – швидкість зношування;

U – внутрішня енергія;

S – ентропія;

t – час.

В основу термодинамічного підходу лягли такі ідеї:

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

– процеси тертя і зношування можуть бути описані рівняннями енергетичного балансу;

– швидкість деструкції контролюється швидкістю виробництва ентропії.

Рівняння балансу ентропії для локальної зони (локальна термодинамічна рівновага) має вигляд:

$$\rho \frac{dS}{dt} + \text{div}S = \sigma [S], \quad (2.18)$$

де $\rho \frac{dS}{dt}$ – швидкість приросту ентропії в цій зоні;

$\text{div}S$ – швидкість відтоку ентропії з певної зони в навколишнє середовище;

$\sigma[S]$ – швидкість виникнення або виробництва ентропії усередині цієї зони.

Однак у подібних моделях, не врахований той факт, що в процесі деформації активуються дисипативні процеси самоорганізації, у результаті яких перед руйнуванням у деформованому матеріалі, замість очікуваного хаосу і деградації спостерігаються високо впорядковані структури, тобто із системи безупинно "відкачується" ентропія, утворена в ході нагромадження дефектів. Крім того, відомо, що на стадії вичерпання пластичності перевага надається колективним процесам, які охоплюють масштаб більший, ніж розміри локальних зон усередині дислокаційних осередків, врахування яких у виразі не передбачене.

В основі механізмів нагромадження ушкоджень і утомного руйнування поверхневого шару лежать термоактивні кінетичні процеси.

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

$$J = f(U_0, \gamma, \sigma, T, \dots). \quad (2.19)$$

2.2.3 Активація та пасивація поверхонь тертя

Контактна пружно-пластична деформація є основним фактором, що активує зумовлюючі процеси структурної пристосовуваності матеріалів при терті.

Відповідно до першого закону термодинаміки робота сил тертя A в основному перетворюється на теплоту Q і частково запасується трібосистемою ΔE , тобто:

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

Виділення теплоти викликає термічну активацію процесів при терті. Процес запасу енергії обумовлений в основному утворенням активної ультра - дисперсної орієнтованої структури, що викликає структурну активацію матеріалу в контактній зоні деформації. Структурна і термічна активація при терті відбуваються одночасно, і їхній поділ досить умовний. Однак, у визначених діапазонах умов тертя можна виділити переважний вплив структурної або термічної активації на механізми процесів при терті.

Кількісно рівень структурно-термічної активації при терті можна характеризувати величиною питомої роботи тертя A_y , що являє собою добуток коефіцієнта тертя μ і питомого навантаження p та швидкості ковзання V : $A_y = \mu p V$.

Для умов структурної пристосовуваності справедливі такі твердження:

$$A \neq Q; \Delta E \neq 0; \Delta E/A = \min.$$

У загальному енергетичному балансі при нормальному терті ΔE складає незначну величину (менше 1%). Однак, якщо врахувати, що ця енергія запасється в найтоншому поверхневому шарі (товщина порядку десятків і сотень нанометрів), то густина запасеної енергії в одиниці об'єму, що деформується, буде близька до граничних критичних значень енергії, яка може поглинути метал у твердій фазі при деформації або при нагріванні до температур, близьких до температури плавлення.

Висока густина запасеної енергії обумовлює аномальні ефекти підвищеної активності поверхневих субмікрооб'ємів. Логічно пов'язати ці ефекти з особливостями ультра дисперсної орієнтованої структури, оскільки енергія, що запасється, складається насамперед з енергій точкових дефектів і мікро-спотворень у дезорганізованих границях цієї структури.

Структурно-термічна активація при терті відіграє визначальну роль у протіканні процесів адсорбції, дифузії та хімічних реакцій. Процеси структурної активації визначаються кінетикою зародження і руху недосконалостей кристалічної будови в контактній зоні деформації. Ця кінетика, у свою чергу, пов'язана з енергетичним станом атомів, що залежать від термічної активації. Тому взаємного посилення фізико-хімічних процесів, що одночасно протікають, структурної і термічної активації можна чекати тільки безпосередньо при терті.

Поряд з утворенням шарів, насичених киснем та іншими хімічно активними елементами середовища, виявляється інтенсивна дифузія вуглецю, азоту та інших менш активних елементів.

Одночасно протікаючі структурна і термічна активації при терті не тільки прискорюють процес насичення, але і сприяють дифузії практично всіх елементів, що заповнюють зону тертя, незалежно від їхньої природи, атомних розмірів тощо. У результаті досліджень було розроблено ряд методів зміцнення поверхонь при терті (механохімічна цементація, азотування, насичення киснем тощо).

При відсутності можливостей насичення за рахунок елементів середовища структурно-термічна активація при терті призводить до взаємної дифузії контактуючих металів (схоплювання I і II роду). Головною передумовою утворення металевих зв'язків при схоплюванні є структурна активація металу, обумовлена щільністю вакансій і дислокованих атомів. Ці дефекти кристалічної будови виникають у результаті пластичної деформації і реалізації механізмів взаємодії різних видів недосконалостей.

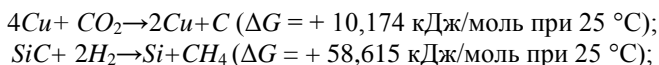
Підвищення адсорбційної активності деформованої при механічній обробці металу було відзначено П.А. Ребіндером, який отримав ряд експеримента-

льних доказів збільшення адсорбційного потенціалу. Структурно-термічна активація поверхневих шарів тіл, що труться, підвищує їхню реакційну здатність, тому що при цьому збільшується ентальпія і ентропія в поверхневих об'ємах, що приводить до зсуву констант рівноваги хімічних реакцій.

Вивченню хімічних реакцій, що активуються механічним впливом, присвячений новий розділ науки – механохімія. Активація пов'язується із сильним збільшенням енергії поверхні, високою концентрацією дефектів кристалічної будови і спотворенням решітки. Термодинамічна активність ΔG визначається різницею вільних ентальпій активної G^* і стабільної G речовини:

$$\Delta G = G^* - G. \quad (2.20)$$

Особливістю механохімічних реакцій є те, що в них можливі перетворення з позитивною вільною ентальпією, які за законами термохімії не повинні були б протікати мимовільно. Наприклад, можливі такі реакції:



Загальний хід механохімічної реакції показаний на рис. 2.20. Без механічного активування твердого тіла (зона I) ступінь реакції незначна, або реакція зовсім не протікає. При механічному впливі відбувається активація і реакція підсилюється (зона II). За цим індукційним періодом йде період стаціонарного плину реакцій, що відповідають умовам активування (зона III). Після механічного впливу активність твердої речовини, а разом з нею і швидкість реакції падають (зона IV). Реакція з високим рівнем активації характеризується різким підйомом ступеня реакції при механічному впливі і таким же крутим спадом, тобто відсутністю періодів індукції і загасання.

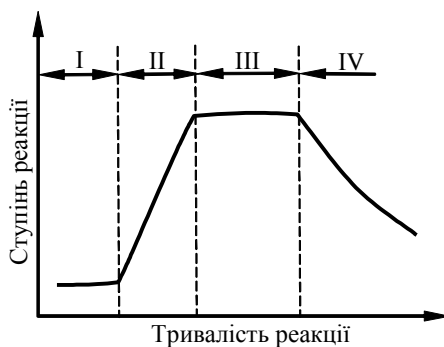


Рис. 2.20 Схема протікання механотермічної реакції

Таким чином, структурно-термічна активація обумовлює своєрідність протікання фізичних і хімічних реакцій і впливає на розвиток процесів при зовнішньому терті.

Активація приводить поверхневі шари матеріалу в аномально нерівноважний, хиткий стан. З погляду термодинаміки природним є прагнення такого матеріалу перейти в більш рівноважний стан. Тому за процесами активації при терті завжди йдуть процеси пасивації. Можна виділити три основних групи реакцій пасивації поверхонь твердих тіл при терті, що відбуваються в результаті: взаємодії з активними елементами середовища; взаємодії з матеріалом контртіла; внутрішньої перебудови структури поверхневих шарів.

Усі три види пасивації є конкуруючими процесами, кожен з яких реалізується при строго визначених умовах тертя.

У результаті взаємодії активованих поверхневих шарів металу з активними елементами середовища – пасиваторами (киснем, сіркою, фосфором, хлором, азотом тощо) утворюються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові об'єкти, що одержали назву вторинних структур. Утворення вторинних структур відбувається у визначеному діапазоні режимів тертя при наявності динамічної рівноваги процесів активації та пасивації і є необхідною умовою для реалізації явища структурної пристосовуваності матеріалів при терті. Якщо здатність середовища, що пасивує, недостатня для утворення і регенерації плівок вторинних структур, то реалізується другий тип пасивації. Наприклад, при терті металів контакт активованих ювенільних поверхонь викликає процеси взаємної дифузії атомів сполучених металів, у результаті чого досягається метастабільний стан утворення локальних вузлів схоплювання. Їх подальше руйнування супроводжується інтенсивною глибинною пошкоджуваністю поверхонь тертя.

Процес пасивації схоплюванням неприпустимий при нормальних умовах тертя.

Якщо матеріал поверхні тертя має хімічну інертність і не здатний активно взаємодіяти з пасиваторами і матеріалом контртіла, то структурно-термічна активація ініціює внутрішню перебудову структури поверхневих шарів. Такий механізм пасивації можливий, наприклад, при терті полімерів у режимі структурної пристосовуваності, коли процеси адгезії мінімізовані і не можуть викликати пошкодження полімерного матеріалу.

У результаті досліджень кінетики механізмів утворення і властивостей трансформованих поверхневих плівок, проведених у широкому діапазоні змін умов тертя на різних матеріалах і в різних середовищах, було визначено існування двох основних типів вторинних структур і великої гами їхніх проміжних станів.

Загальними для вторинних структур обох основних типів є їхня поверхнева локалізація, високоміцна ультрадисперсна будова, здатність мінімізувати руйнування поверхневого шару і екранувати неприпустимі процеси схоп-

лювання, втоми, корозії тощо. Але разом з тим, для кожного типу вторинних структур характерні свої індивідуальні особливості:

– поверхні тертя, покриті вторинними структурами I і II типів, різко відрізняються за зовнішніми ознаками (табл. 2.3); при дослідженні на макроскопічному рівні ці відмінності виявляються в різній здатності поверхонь відбивати світло, на мікроскопічному – у різному фарбуванні поверхонь, на субмікроскопічному – у різному субрел'єфі поверхонь;

Таблиця 2.3 - Зовнішні ознаки вторинних структур

Тип вторинних структур на поверхнях тертя	Загальна характеристика стану поверхонь тертя		
	На макроскопічному рівні	На мікроскопічному рівні	На субмікроскопічному рівні
I (тверді розчини окислювачів в металах)	Блискуча	Блискуча, покрита скловидною плівкою	Гомогенна (сплошна плівка без відчутних ознак субмікрорел'єфу)
II (хімічне з'єднання не стехіометричного складу)	Матова	Покрита плівками різноманітного забарвлення	Гетерогенна (вигладжені ділянки, покриті плівкою, і ділянки з зруйнованою плівкою)

– вторинні структури I типу мають властивості надпластичності, легко переміщуються по поверхні тертя; структури II типу мають більшу поверхневу міцність, однак менш пластичні;

– поверхні, покриті вторинними структурами I типу, мають знижене, а покриті структурами II типу – підвищене змочування мастилами.

Структурне пристосовування матеріалів при терті. Залежність коефіцієнта тертя μ та інтенсивності поверхневого руйнування I від параметрів тертя (навантаження p , швидкості переміщення V , температури T і властивостей середовища C_p) є ділянкою мінімального тертя і руйнування для будь-яких контактуючих матеріалів. У залежності від властивостей матеріалів і середовища змінюються тільки діапазон і рівень мінімального тертя і зносу (рис. 2.21). Цей діапазон структурної пристосовуваності (СП) обумовлений виникненням стійкої дисипативної структури тертя, яка підтримується стаціонарними потоками механічної енергії і речовини зовнішнього середовища, взаємодіючою з поверхнями тертя, активованими механічними впливами.

При створенні умов СП відбувається масштабний стрибок: усі взаємодії локалізуються в тонкоплівковому об'єкті – вторинних структурах, що являють собою нову метастабільну фазу, утворену в результаті структурно-термічної

активації поверхні, її адсорбційно-хімічної взаємодії із середовищем і пасивації. Ця нова фаза є істинним об'єктом руйнування, що екранує вихідну фазу (матеріал третьових тіл) від механічних і фізико-хімічних впливів.

Перебудова структури відбувається в напрямку максимального зміцнення і орієнтації щодо напрямку переміщення (наприклад, для металевих матеріалів – це орієнтація ультрадисперсних кристалів). Вторинні структури екранують вихідний матеріал від механічної і фізико-хімічної деструкції і є істинним об'єктом руйнування, весь об'єм якого поглинає енергію, близьку до граничної енергії руйнування.

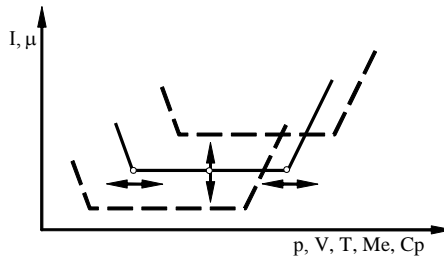


Рис. 2.21 Схема зміни коефіцієнта тертя μ та інтенсивності зношування I від параметрів тертя p , V , температури T , властивостей матеріалів Me і середовища Cp

Зовнішні механічні впливи неминуче призводять до руйнування вторинних структур, але ці впливи поєднанні з процесами переносу речовини із середовища, забезпечують регенерацію фази, що екранує. Стійкість СП обумовлена динамічною рівновагою, а також саморегулюванням усіх деструктивних процесів, що активують та екранують (процесів пасивування і утворення фази). Таким чином, СП пов'язана з утворенням стійкої дисипативної структури переносу енергії і речовини зовнішнього середовища в систему тертя.

В загальному випадку більша частина роботи зовнішнього тертя перетворюється в теплоту, а менша йде на зміну внутрішньої енергії поверхневих шарів металу.

Було встановлено, що від умов тертя залежить не тільки сумарна величина роботи тертя, але і співвідношення між основними її складовими, тобто між кількістю поглинаючої енергії і кількістю виділеного тепла. Співвідношення між складовими енергетичного балансу ΔE і Q залежить від властивостей матеріалів трібосистеми, зовнішніх навантажень і фізико-хімічних характеристик робочих середовищ. Для заданого з'єднання контактуючих матеріалів і середовища існує певний діапазон навантажень і швидкостей ковзання, у якому відношення $\Delta E/A$ практично незмінне і мінімальне в порівнянні з його значеннями поза розглянутим діапазоном. Схема зміни величини $\Delta E/A$ показана на рис. 2.22. Тут ділянка I відповідає перехідній зоні малих значень p і

V; II – процесу нормального тертя і зносу; III – виникненню пошкоджуваності; IV – розвитку пошкоджуваності.

Як критерій зносостійкості матеріалів при терті A_3 пропонувалося відношення роботи A , витраченої на видалення маси Δm :

$$A_3 = \frac{A}{\Delta m} . \quad (2.21)$$

Ця величина найбільш пов'язана з істинною (фізичною) твердістю матеріалу і повною мірою могла б характеризувати процес диспергування матеріалу при терті.

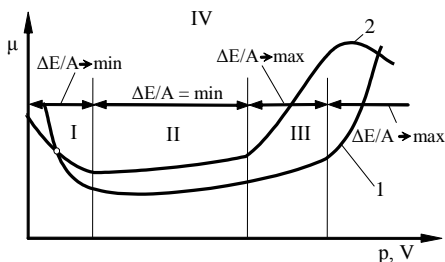


Рис. 2.22 Енергетичні співвідношення для різних зон тертя:

1 – при зміні питомого навантаження p ; 2 – при зміні швидкості руху

Описаний механізм явища СП показує, що при цьому явищі мінімальні принципи виявляються у формі мінімізації ефективного об'єму усіх видів взаємодії твердих тіл і середовища при терті (деформаційного, хімічного, електромагнітного тощо), який описується фізичною моделлю (рис. 2.23). Цей принцип може бути записаний у такому вигляді:

$$\int_V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min , \quad (2.22)$$

й ілюструється схемою зображеною на рис. 2.24, де напрямок z є нормаллю до поверхні тертя, лінією 1 показане збільшення внутрішньої енергії при СП, локалізоване в зоні I вторинних структур, лінією 2 – обмежена зона збільшення внутрішньої енергії при інших процесах тертя (пошкоджуваності).

Наслідками принципу є умови:

$$V_{ef} \rightarrow \min ; \frac{A}{V_p} \rightarrow \max ; \frac{V_{\bar{E}}}{V_{ef}} \rightarrow \max , \quad (2.23)$$

де V_{ef} – ефективний об'єм взаємодії;

V_p – об'єм зруйнованого матеріалу,

$V_{\bar{E}}$ – об'єм матеріалу, що поглинув енергію \bar{E} , близьку до граничної.

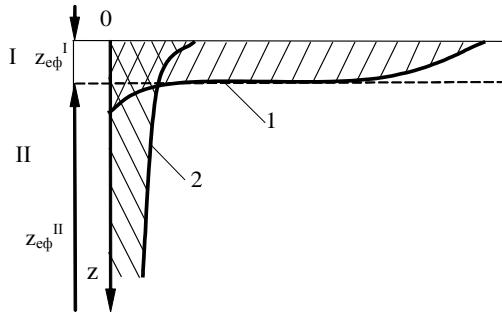


Рис. 2.24 Схема розподілу поглиненої енергії:
1 – структурна пристосовуваність; 2 – інші процеси тертя

Таким чином, при явищі СП відбувається масштабний і енергетичний стрибок, що полягає в локалізації ефективного об'єму взаємодій V , і досягненні в цьому об'ємі граничної енергонасиченості фази, що руйнується, яка реалізується шляхом переходу матеріалу до метастабільного стану, яке відповідає максимальній міцності.

Експериментально встановлено, що питома робота руйнування при СП на кілька порядків вища, ніж при інших процесах тертя.

2.2.4 Параметри оцінки зношування машин

Зношування – процес руйнування і відокремлення матеріалу від поверхні твердого тіла і (чи) збільшення його залишкової деформації в умовах тертя, що виявляється у поступовому змінюванні розмірів, форми і (чи) маси тіла. Результатом зношування є знос тертьових тіл.

Знос – наслідок зношування, визначений в одиницях довжини, об'єму, маси. Знос деталей і вузлів призводить до погіршення функціональних показників машин і, як правило, регламентує її ресурс. В результаті зносу порушується кінематична точність механізмів, зменшується продуктивність, знижується міцність деталей, збільшуються витрати на ремонт машин, затрати енергії на виробництво кінцевої продукції, з'являються не передбачені розрахунками додаткові навантаження, вібрація, шум.

Про величину зносу можна судити за зменшенням розмірів тертьового тіла в напрямку, перпендикулярному до його поверхні тертя.

Кількісними характеристиками процесу зношування є швидкість і інтенсивність зношування.

Швидкість зношування – відношення величини зносу до інтервалу часу зношування. Визначається швидкість зношування як відношення товщини зношеного шару Δh , зміни об'єму ΔV або маси Δm твердого тіла до інтервалу часу Δt , протягом якого це тіло піддавалося зношуванню. Розрізняють лінійну i_h , об'ємну i_V і масову i_m швидкості зношування:

$$i_h = \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad i_V = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad i_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}. \quad (2.24)$$

Більш розповсюдженими є характеристики процесу зношування, що враховують шлях тертя L , що, при постійній силі тертя і швидкості ковзання V дорівнює добутку V на час стирання Δt . Розрізняють лінійну I_h , масову I_m , об'ємну I_V і енергетичну I_w інтенсивності зношування.

Лінійна інтенсивність зношування являє собою товщину зношеного шару Δh , що приходиться на одиницю шляху тертя:

$$I_h = \Delta h / L. \quad (2.25)$$

Ця величина може бути визначена за зміною об'єму ΔV або маси Δm зношеного шару:

$$I_h = \Delta V / (A_a L), \quad I_h = \Delta m / (\rho A_a L), \quad (2.26)$$

де ρ – щільність матеріалу що стирається;

A_a – площа поверхні тертя елемента, що стирається (номінальна площа контакту, якщо поверхні тертя тіл, які спряженні, однакові).

Очевидно, що I_h , є безрозмірною величиною. У більшості випадків інтенсивність зношування реальних тіл визначається як: $I_h = 10^{-3} \dots 10^{-13}$.

Масова інтенсивність зношування – це маса речовини, що віддаляється з поверхні тіла, яке зношується, за одиницю шляху тертя:

$$I_m = \Delta m / L. \quad (2.27)$$

Об'ємна інтенсивність зношування – це об'єм матеріалу, зношеного за одиницю шляху тертя:

$$I_V = \Delta V / L. \quad (2.28)$$

Енергетична інтенсивність зношування визначає об'єм зношеного матеріалу, що приходиться на одиницю роботи сили тертя:

$$I_w = \Delta V / (FL), \quad (2.29)$$

де F – сила тертя.

Ця характеристика застосовується в основному при вивченні роботи гальмових пристроїв і муфт зчеплення.

Зносостійкість третьових тіл визначають величиною, зворотною інтенсивності зношування чи швидкості зношування. Вона характеризує опір матеріалу зношуванню при заданих режимах тертя. Зносостійкість ε_u різних реальних трібосистем може набувати значення, що належать широкому інтервалу: від 10^3 до 10^{13} . Розрізняють десять класів зносостійкості (від 3-го до 12-го), кожний з яких відрізняється величиною ε_u від наступних у 10 разів. Номер класу відповідає мінімальному показнику ступеня при ε_u . При вивченні опору матеріалів абразивному зношуванню найчастіше в лабораторних випробуваннях використовують поняття відносна зносостійкість ε_0 ,

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta h_0}{\Delta h}, \quad (2.30)$$

де Δh_0 – товщина зношеного шару еталона;

Δh - товщина зношеного шару матеріалу, що досліджується.

Величини Δh_0 і Δh визначаються при однакових режимах навантаження.

2.3 Види зношування

2.3.1 Класифікація видів зношування

Зношування третьових тіл варто розглядати як сумарний результат одночасного протікання елементарних актів руйнування і змін властивостей матеріалу, природа яких різноманітна. Це визначає різноманіття видів зношувань, що мають місце на одній і тій же контактній площадці в будь-який заданий момент часу і є причиною розробки великої кількості класифікацій видів зношування, кожна з яких відрізняється принципом, взятим за основу. Розглянемо деякі з них.

У основу першої класифікації, запропонованої Бринелем у 1921 р., була покладена кінематична ознака і наявність прошарку між поверхнями тертя. Відповідно до цієї класифікації, існують такі види зношування: при терті коченні з мастильним матеріалом; при терті коченні без мастильного матеріалу; при терті ковзанні з мастильним матеріалом; при терті ковзанні без мастильного матеріалу; при терті тіл, розділених твердими частками.

Ф.Т. Барвел і К. Стронг запропонували класифікацію видів зношування, яка ґрунтується на фізико-механічних і хімічних явищах у контакті. Вони розрізняють сім видів зношування:

– заDIR або заїдання, обумовлені сильною адгезійною взаємодією на плямах контакту;

– пластична плинність поверхні;

- викришування;
- стирання твердими частками;
- безперервне зношування, яке призводить до утворення дрібних часток зносу і вигладжування поверхні тертя (у результаті впливу слабких механічних навантажень і адгезії);
- зношування в результаті хімічної корозії;
- фретинг-корозія.

Класифікація І.В. Крагельського, що базується на характері порушення фрикційних зв'язків і руйнування поверхонь тертя, включає:

- утомне зношування, яке спостерігається при пружному відтискуванні матеріалу прониклою нерівностями контртіла;
- малоциклова утома при пластичному відтискуванні матеріалу;
- мікрорізання з утворенням стружки при великих значеннях глибини щодо проникнення нерівностей поверхні контртіла в об'єм поверхневого шару матеріалу, що зношується;
- адгезійне порушення фрикційних зв'язків, що спостерігається при схоплюванні плівок;
- когезійне руйнування поверхневих шарів при схоплюванні третьових тіл на ювенільних ділянках контакту.

Відповідно до ДСТУ 2823–94, усі види зношування можна поділити на чотири групи: механічне; механохімічне, фретинг-корозійне і електроерозійне (рис. 2.25).

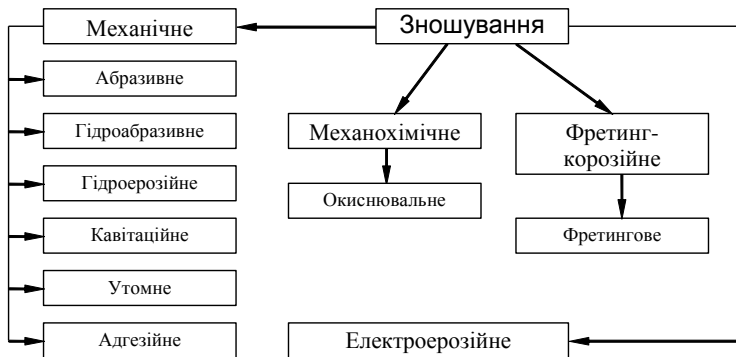


Рис. 2.25 Класифікація видів зношування згідно з ДСТУ 2823–94

2.3.2 Абразивне зношування

Абразивне зношування – це відділення з поверхні тертя матеріалу або його пластичне деформування під впливом твердих часток, що різуть чи дряпають поверхню матеріалу, які супроводжуються зміною лінійних розмірів тіла, що зношується. Цей вид зношування реалізується при наявності:

– нерухомо закріплених твердих зерен на поверхні тертя одного з тіл, що спряжуються. Це тверді структурні складового матеріалу елементів пари тертя, частки абразивної шкірки, брусків та іншого інструменту, частки нагару на стінках циліндра двигуна внутрішнього згоряння;

– вільних часток, що потрапляють у зону контакту тертьових тіл (оксидні плівки, частки зносу, пилу);

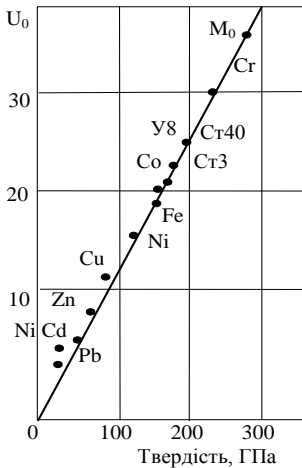
– незакріплених часток, що передають тиск маси (абразивні частки в ґрунті, гірських породах, насипних вантажах при їх транспортуванні), що деформується.

Найбільш значні результати дослідження абразивного зношування отримані М.М. Хрущовим при випробуваннях матеріалів по корундовій полотниці. Дослідження показали, що при стиранні чистих металів у відпаленому стані при ковзанні по вільному абразиву відносна зносостійкість пропорційна твердості (рис. 2.26, а). Для термооброблених сталей зв'язок має лінійний характер (рис. 2.26, б):

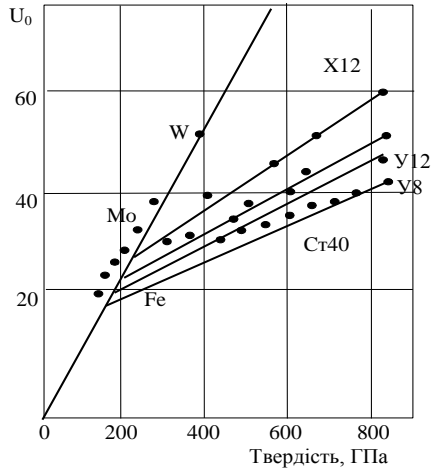
$$U_0 = U_{e3} + K (HB - HB_{ec}), \quad (2.31)$$

де U_{e3} – відносна зносостійкість у відпаленому стані; K – коефіцієнт; HB – твердість металів; HB_{ec} – твердість у відпаленому стані.

Зносостійкість залежить від співвідношення твердості матеріалу H_M і абразиву H_A : $K_T = H_M/H_A$.



а



б

Рис. 2.26 Залежність відносної зносостійкості від твердості матеріалу

Якщо $K_T < 0,7$, то відбувається руйнування при однократному проході (мікрорізанні). Якщо $K_T > 0,7$, процес переходить в багатоциклічний. Твердість різних матеріалів за шкалою Мооса показана на рис. 2.27. Шкала побудована з таких міркувань: твердість м'якого мінералу тальку – прийнята за одиницю, а твердість алмаза прирівняна до 10 балів.



Рис. 2.27 Твердість матеріалів за шкалою Мооса

Абразивне зношування закріпленими частками. Спостерігається при обробці матеріалів абразивним інструментом хонінгування (огранювання каменів, виготовлення лінз і виробів з деревини, обробка металів без застосування мастильно-охолодних рідин).

Міцність абразивних часток зростає зі зменшенням розмірів. Чим менший розмір, тим менше дефектів і нижча імовірність руйнування. Чим жорсткіше закріплена частка, тим вища імовірність багатоциклічного зносу.

При зношуванні металів твердими закріпленими абразивними частками можлива одночасна реалізація двох механізмів руйнування поверхні тертя. Перший – мікрорізання – спостерігається при однократному навантаженні з утворенням стружки перед гранню частки, що ріже. На поверхні тертя виникають канавки, орієнтовані уздовж вектора швидкості ковзання. У більшій мірі цей механізм проявляється при зношуванні крихких матеріалів. При реалізації другого механізму руйнування частки зносу утворюються в результаті багаторазового пластичного деформування зношеного тіла абразивною часткою. Багаторазове передформування матеріалу в результаті наступних проходів часток призведе до втоми і відділення цього матеріалу від поверхні тертя. Звичайно перший механізм вносить незначний вклад у процес зношування в порівнянні з другим.

Поверхня металів, що піддаються абразивному зношуванню, покриваються безліччю паралельно розташованих канавок, орієнтованих у напрямку відносного переміщення тіл, що спряжуються. В окремих випадках, особливо коли домінуючим є другий механізм зношування, дно канавок покривається мікротріщинами, площина яких перпендикулярна вектору швидкості V . При абразивному зношуванні частки, що утворюються, можуть набувати форму стружки, якщо переважає перший механізм зношування. Однак найбільш ймовірна поява абразивних часток у вигляді багатогранника. При важких режимах навантаження можливе утворення сферичних часток зносу розміром до 30 мкм.

Інтенсивність абразивного зношування залежить від ряду факторів. Найбільш істотними з них є номінальний тиск p_a на контакт і твердість матеріалу HV або HB , що зношується:

$$I_n \cong k \frac{p_a}{HV}, \quad (2.32)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

При зношуванні по закріпленому абразиву відносна зносостійкість ε_0 технічно чистих металів і відпаленої сталі прямо пропорційна їхній твердості. Це обумовлене зменшенням глибини проникнення абразивних часток в об'єм тіла, що зношується. Зі збільшенням твердості сталей шляхом термообробки їх відносна зносостійкість також зростає. Причому ця залежність є лінійною. Підвищення твердості сталі методом попереднього деформаційного зміцнення не викликає істотної зміни (рис. 2.26).

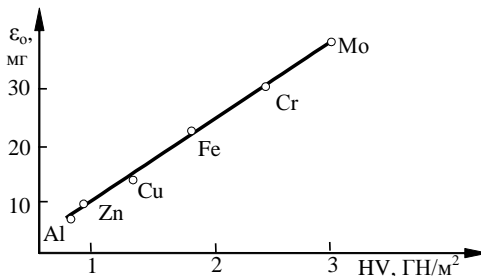


Рис. 2.28 Вплив твердості на зносостійкість технічно чистих металів

Інтенсивність зношування металів залежить також від твердості часток абразиву HV_a . Якщо HV_a , значно перевищує твердість металу HV , що зношується, то інтенсивність зношування останнього порівняно слабо залежить від різниці твердостей абразиву і металу. Так, зміна відношення HV_a/HV від 25 до 200 викликає зниження опору чистих металів зношуванню тільки в 4...8 разів.

Якщо твердість металу перевищує на 60% твердість абразиву, то зносостійкість металу різко зростає, а залежність ε_0 (HV_a/HV) стає більш яскраво вираженою. В інтервалі зміни HV_a/HV від 3 до 25 залежність I_h від співвідношення твердостей тіл, що спряжуються, відображається нелінійною функцією.

Вплив швидкості ковзання на I_h металів при абразивному зношуванні неоднозначний. Характер залежності $I_h(V)$ є досить складним і визначається структурою металу і рівнем нормального навантаження. При $V > 2$ м/с спостерігається тенденція до зменшення I_h зі збільшенням швидкості ковзання.

Механізм абразивного зношування високоеластичних матеріалів полягає в такому. При проникненні абразивного зерна в поверхневий шар матеріалу і прикладання до нього дотичного навантаження перед плямою контакту утворюється зона деформацій стискування, а позаду матеріал піддається розтягванню. Багаторазові деформації розтягання викликають утворення на поверхні тертя мікророзривів, площина яких перпендикулярна напрямку ковзання одного з тіл пари тертя. При великій глибині проникнення частки мікророзриви можуть утворюватися після однократного навантаження. Мікророзриви утворюються на поверхні тертя періодично, що вказує на стрибкоподібне ковзання абразиву по поверхні еластомеру. При додатку дотичної сили до частки, що впровадилася, еластомер, маючи високу еластичність, розтягується доти, поки пружна сила, що відновлюється, не перевищить силу тертя (силу зчеплення абразивної частки з еластомером). Після цього розтягнута ділянка еластомеру, відновлюючи свою форму, відскакує у напрямку, протилежному вектору швидкості V , і в контакт вступає нова ділянка поверхні тертя, що значно віддалена від попередньої.

Подальше навантаження призводить до появи нових і розвинення раніше утворених мікророзривів. При високій їх щільності матеріал, обмежений з усіх боків мікророзривами, відривається від основного матеріалу і видаляється з зони тертя. Згодом руйнування локалізується на тих ділянках поверхні, що мають більш високу щільність мікророзривів.

Зношування полімерів у склоподібному стані обумовлене сукупністю фізико-хімічних процесів у контакті, що призводять в основному до двох видів руйнування: мікрорізанню і утомі поверхневого шару при багаторазовому деформуванні абразивними частками.

Контактно-абразивне зношування вільними частками. Абразивне зношування вільними частками спостерігається у трібосистемах двигунів внутрішнього згоряння (циліндр – поршневе кільце), транспорту (колесо – рейка, п'ята – під'ятник поворотного механізму вагонів, у парах вал – втулка, палець – вушко гусениці) та інших пристроїв.

Для тяжконавантажених трібосистем (зубчасті передачі, підшипники кочення) найбільш імовірним є процес дроблення абразиву. Потрапляючи в зону контакту частки абразиву не встигають проникнути в об'єм одного з тертьових тіл на необхідну для мікрорізання глибину ($h/R > 0,1$) і руйнуються.

При навантаженнях, які менші зусилля руйнування часток, відбувається їхнє проникнення в менш твердий матеріал (шаржування), і процес зношування визначається умовами шаржування і властивостями того тіла, твердість якого вища. При цьому можливі два типи руйнування поверхонь спряжених тіл. При першому типі зусилля, яке зсовує частку, що проникла, менше критичного, при якому було б можливе переміщення цієї частки в поверхневому шарі м'якого матеріалу. У таких умовах має місце тертя закріпленого абразиву по більш твердому матеріалі, що зношується в більшій мірі. Так, знос шийок загартованих колінчатих валів автомобілів найчастіше виявляється вище, ніж вкладишів з м'якого металу. При другому типі руйнування зусилля, що зрушує частку абразиву, більше критичного, тому відбувається переміщення часток абразиву в більш м'якому матеріалі, і він піддається інтенсивному зносу.

Інтенсивність зношування металів залежить в основному від твердості тертьових тіл і абразиву, а також від властивостей міцності і структури металу, що зношується. Зі збільшенням міцності, твердості і вмісту вуглецю в сталі її опір абразивному зношуванню росте.

У значно меншій мірі, ніж метали, піддаються абразивному зношуванню еластомери. Їхня здатність до великих пружних деформацій не дозволяє створювати високий тиск на контакт абразивної частки з тілом, що зношується. Полімерні матеріали мають більш високу зносостійкість, ніж метали, що особливо характерно для низьких навантажень.

Гідроабразивне (газоабразивне) зношування. Цей вид зношування має місце у трібосистемах, коли абразивні частинки рухаються в потоці рідини (газу) або іншого середовища, наприклад, ґрунту.

Механізм зношування матеріалів у масі абразивних часток змінюється в залежності від співвідношення твердості часток і матеріалу, що зношується. Якщо при зношуванні твердість часток абразиву вища за твердість матеріалу, то руйнування його поверхні тертя відбувається внаслідок мікрорізання (відділення часток зносу у вигляді стружки при однократному проході абразивної частки) або в результаті багатоциклічного руйнування пластичних ділянок, що деформуються. Якщо твердість часток абразиву нижче, ніж матеріалу, що спряжується з ними, зношування металу відбувається з таких причин:

- через фрикційне нагрівання поверхневого шару, яке викликає зменшення твердості окремих ділянок поверхні металу при терті;
- завдяки підвищенню інтенсивності окиснювання металу при нагріванні в точках контакту, руйнування продуктів окиснювання і видалення їх із зони тертя у вигляді часток зносу.

На інтенсивність зношування металів впливає ряд факторів: твердість металу і абразивних часток, форма, розміри і вміст абразивних часток, тиск на плямах контакту і швидкість переміщення тіла, яке зношується.

Як впливає твердість тертьових тіл на опір зношуванню металу, видно з наведених залежностей на рис. 2.29 результатів випробувань чистих металів. При зношуванні корундовим піском зносостійкість металів ϵ_m підвищується зі

зростанням їхньої твердості (крива 1), а залежність $\epsilon_m(HV)$ є, лінійною. Ця крива відповідає зношуванню в режимі мікрорізання, тому що твердість корунду значно перевищує твердість металу.

При терті по кварцу (крива 2), твердість якого нижча, ніж корунду, реалізується змішаний механізм зношування. Утворення часток зносу відбувається в результаті мікрорізання і багаторазового пластичного деформування.

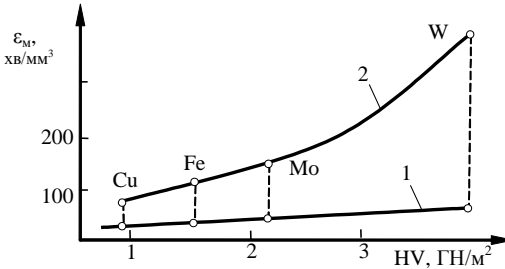


Рис. 2.29 Залежність зносостійкості технічно чистих металів від твердості при терті в масі абразивних часток: 1 – корунд; 2 – кварц

Для полімерних матеріалів не виявлено кореляції між зносостійкістю і твердістю. Установлено, що в зоні малих навантажень існує кореляція між зносостійкістю полімерів та їх модулем пружності (рис. 2.30). З підвищенням навантаження крива $\epsilon_m(E)$ повинна бути більш пологою, тобто зменшення модуля пружності повинно викликати менш істотне зростання ϵ_m . Це підтверджується результатами порівняльних випробувань сталі (Ст.3) і еластомеру вулколана. При малих навантаженнях опір вулколана зносу в 2 рази вище, ніж ϵ_m сталі. Зі збільшенням навантаження значення цих характеристик зближуються, а в зоні високих навантажень ϵ_m сталі стає вище майже на порядок.



Рис. 2.30 Залежність зносостійкості полімерних матеріалів від модуля пружності

2.3.3 Механохімічне зношування

До такого різновиду зношування відносять окиснювальне, фретинг-

корозійне і водневе зношування.

Окиснювальне зношування пов'язане з активацією окисних процесів поверхневих шарів тертьових поверхонь за рахунок пластичної деформації, підвищеної температури, дії циклічних навантажень і наявності кисню в мастилі і навколишньому середовищі.

При окиснювальному зношуванні спочатку, коли плівки окислів тонкі (порядку часток мікрометра) і еластичні, вони відіграють позитивну роль і захищають поверхні від ушкоджень. Але в міру росту плівки стають товстими, крихкими і руйнуються при навантаженнях, які спочатку легко переносилися. Продукти зносу виносяться з мастильного матеріалу. Тим часом окисний процес продовжується, плівки знову наростають і захищають від зносу основний матеріал. Таким чином, окиснювальне зношування – це процес, при якому руйнується не матеріал деталі, що зношується, а його вторинні структури – оксиди, що утворилися в процесі тертя.

Окиснювальне зношування є окремим випадком механохімічного. Протікає воно в умовах, коли метал вступає в хімічну реакцію з окислювачами навколишнього середовища або мастильного матеріалу. Окиснювальне зношування відбувається, коли швидкість утворення плівок оксидів більша або дорівнює швидкості їхнього руйнування. У протилежному випадку можливе протікання інших видів зношування, наприклад, адгезійного.

Окиснювальне зношування зазнають підшипники кочення, шарнірно-болтові з'єднання, металеві колеса фрикційних передач, поршневі пальці двигунів, деталі гідравлічних насосів і двигунів внутрішнього згоряння.

Процес окиснювального зношування умовно можна розділити на три етапи.

1. У результаті пластичного деформування при терті поверхневий шар насичується дислокаціями і вакансіями. Це забезпечує високу активність поверхневого шару і здатність взаємодіяти з киснем.

2. Утворення вторинних структур. Відбувається в результаті взаємодії активних центрів поверхневого шару металу з киснем і прояви оксидної плівки (рис. 2.31, *а*).

3. Руйнування оксидних плівок обумовлене їх багаторазовим деформуванням при терті, наявністю внутрішніх напружень і великою щільністю дефектів структури (пор, дислокацій, вакансій, мікротріщин). Внаслідок відмінності постійних кристалічних решіток оксидний шар зазнає стискаючих напруг, а метал – тих, що розтягують. На поверхні розділу виникають дотичні напруження. При фрикційному навантаженні оксидна плівка відокремлюється від металу по межі розподілу на окремих ділянках завдяки появі і збільшенню підповерхневих мікротріщин, розташованих паралельно поверхні тертя (рис. 2.31, *б*).

Низький опір оксидних плівок розтягуванню, наявність дефектів структури і внутрішніх напружень в плівці сприяють утворенню і розвитку поверхневих мікротріщин. Зі збільшенням кількості циклів навантаження сітка мі-

кротріщин стає більш щільною. Відбувається злиття, поверхневих і підповерхневих тріщин (рис. 2.31, б), викришування її ділянок (рис. 2.31, в), і видалення їх із зони тертя (рис. 2.31, г). На новоутвореній оголеній поверхні металу знову з'являється оксидна плівка.

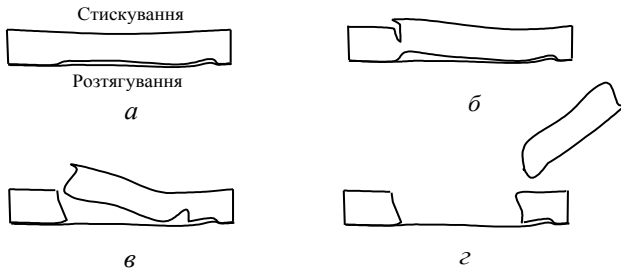


Рис. 2.31 Кінетика утворення часток зносу при окисному зношуванні

При високій міцності з'єднання оксидної плівки з металом можливе поширення тріщин і в об'ємі металу. У результаті частки зносу містять вихідний метал і його оксиди.

Інтенсивність окиснювального зношування I_m металів залежить від швидкості утворення оксидних плівок і швидкості їхнього руйнування.

Про існування кореляції між інтенсивністю зношування і процесом окиснювання свідчать результати вивчення впливу нормального навантаження на I_m і з'ясування вмісту в продуктах зносу оксидів заліза Fe_2O_3 і FeO , які оберігають чистий метал від ушкодження. Максимальній інтенсивності зношування відповідає мінімальний вміст в частках зносу Fe_2O_3 і максимальний – чистого металу. Це свідчить про істотний вплив на I_m адгезійного зношування, що має місце на ділянках контакту, слабо захищених оксидами. Мінімальна інтенсивність зношування спостерігається в тому випадку, коли товщина плівки Fe_2O_3 достатня для захисту основного металу від схоплювання.

Швидкість ковзання впливає на інтенсивність зношування через співвідношення швидкості утворення оксидної плівки (керованою температурою в зоні тертя) і швидкості її руйнування. У залежності від цього співвідношення на контакті може мати місце як окиснювальне, так і адгезійне зношування.

Інтенсивність окиснювального зношування залежить від когезійної міцності оксидних плівок і адгезійної міцності їхнього зчеплення з металом. Так, при терті сурми і кадмію утворюються оксиди з досить низкою когезійною і адгезійною міцністю. Вони легко руйнуються і видаляються з зони тертя. Це призводить до підвищення інтенсивності зношування названих металів при збільшенні вмісту кисню в середовищі.

Оскільки температура на плямах фактичного контакту може досягати температури плавлення одного з третьових тіл, визначаючи при цьому швидкість протікання хімічних реакцій, важливо простежити її вплив на корозійно-механічне зношування металів. Експериментальні дані про вплив темпе-

ратури на об'ємний знос циліндра з інструментальної сталі, що третється по диску з того ж металу, зображені на рис. 2.32. При терті в дихлордифторметані при $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ швидкість корозійних процесів незначна. В цьому випадку інтенсивність зношування є інтегральною характеристикою одночасно протікаючих процесів корозійного і адгезійного зношування.

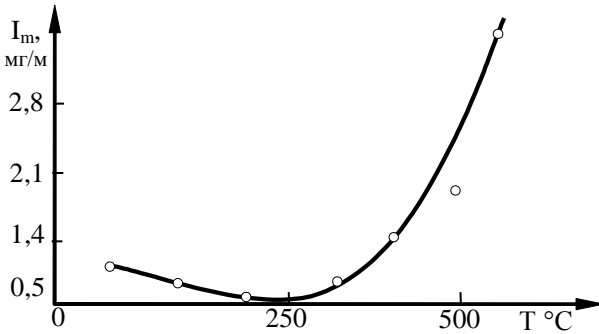


Рис. 2.32 Вплив температури на інтенсивність зношування інструментальної сталі в середовищі дихлордифторметана ($N = 12\text{ Н}$)

Зі збільшенням температури до $300\text{ }^\circ\text{C}$ внесок адгезійного зношування зменшується за рахунок утворення тонкого модифікованого шару в результаті корозії, а вплив механічного зношування росте. У результаті I_m практично не залежить від температури. При $T > 300\text{ }^\circ\text{C}$ хімічна активність середовища різко зростає в результаті розкладання дихлордифторметана і виділення хлору, який вступає в реакцію з металом. При $T > 500\text{ }^\circ\text{C}$ швидкість взаємодії хлору з металом стає настільки великою, що відбувається катастрофічне механохімічне зношування металу.

Наведені дані про вплив різних факторів механохімічного зношування металів показують, що корозія в трибоспряженнях може відігравати двоїсту роль. При оптимальній швидкості протікання корозійних процесів у зоні контакту на поверхнях тертя спряжених тіл утвориться модифікований шар і їхня зносостійкість підвищується. У випадку перевищення оптимуму на поверхнях тертя утворюються товсті шари продуктів хімічної взаємодії, які легко руйнуються. Це забезпечує високу інтенсивність зношування третьових тіл аж до переходу до катастрофічного зносу.

Фретинг-корозійне зношування. Фретинг-корозія – це процес руйнування поверхонь тертя при малих циклічних переміщеннях спряжених тіл, що спряжуються супроводжується зміною лінійних розмірів цих тіл.

Цей процес виявляється як сильно виражений процес окиснювання і схоплювання матеріалів третьових тіл, що локалізується на невеликих ділянках контакту і супроводжується їх утомним і абразивним зношуванням. Цей вид зношування спостерігається в болтових, заклепувальних, штифтових і

шпонкових спряженнях, парax вал – маточина, на посадкових поверхнях деталей, у шарнірах, ресорах, регуляторах електричних контактів, кулачкових механізмах, сталевих канатах.

Необхідною умовою появи фретинг-корозії є проковзування поверхонь контактуючих тіл, починаючи з величин, на порядок перевищуючих міжatomну відстань. Максимальний зсув третьових тіл, що здійснює коливання не повинен перевищувати розмір плями контакту. Завдяки цьому частки зносу не можуть вийти за межі контактної площадки і забезпечують виникнення високих тисків на локальних ділянках.

Кінетика зношування при фретинг-корозії полягає в такому. Спочатку відбувається динамічне навантаження матеріалу контактуючих нерівностей і видалення адсорбційних і оксидних плівок на плямах контакту. При багаторазовому навантаженні матеріал вершин деяких контактуючих нерівностей пластично деформується. Це призводить до збільшення концентрації дефектів і підвищенню фізико-хімічної активності матеріалу на плямах контакту.

Подальше навантаження супроводжується, з одного боку, зростанням інтенсивності локального окиснювання матеріалу, а з іншого боку – утворенням містків зварювання досить малих розмірів. Зсув третьових тіл викликає руйнування цих містків і відрив мікроскопічних часток металу з поверхні одного з третьових тіл.

В зонах адгезійного відриву часток утворюються каверни малих розмірів. Поверхня каверни окислюється, а в її об'ємі накопичуються частки, видалення яких при малих переміщеннях практично неможливе, але відбувається інтенсивне окиснювання цих часток. Продукти окислювання, заповнюючи об'єм каверни, і викликають абразивне зношування її поверхні. З часом окиснювання поступово захоплює нові зони, відбувається їх розширення завдяки абразивній дії продуктів окислювання і руйнування оксидних плівок на сусідніх ділянках і схоплювання. Частки оксидів, які знаходяться в кавернах займають більший об'єм, ніж метал, де вони утворилися. Це призводить до підвищення тиску і температури на локальних ділянках, утворення поверхневих і підповерхневих утомних тріщин, їхнього розвитку і відколювання малих об'ємів металу. Можливе злиття двох каверн в одну, де цей процес продовжується.

Поверхня тертя деталей, які піддаються фретинг-корозійному зношуванню, покривається поглибленнями і нагадує за характером руйнування поверхні після корозійного зношування. Ушкодження концентруються на окремих ділянках, що відповідають вершинам хвиль.

На інтенсивність зношування при фретинг-корозії впливає ряд факторів, зв'язаних з умовами навантаження пари тертя. Встановлено, що збільшення амплітуди коливання спряжених тіл викликає зростання інтенсивності зношування, причому ця залежність близька до лінійної. При малих амплітудах (менше 0,15 мм) частки зносу можуть виконувати роль тіл котіння і охороняють тіла, що спряжується, від інтенсивного зношування. При великих амплітудах частки зносу виконують роль тіл котіння і охороняють тіла, що спряжується, від інтенсивного зношування.

літудах переміщення збільшується імовірність руйнування оксидних плівок і утворення містків зварювання, що супроводжує підвищенням інтенсивності зношування. При подальшому збільшенні амплітуди коливань інтенсивність зношування може також знижуватися. Це можливо внаслідок того, що забезпечуються умови для виходу оксидних часток з каверн.

Підвищенню інтенсивності зношування при фретинг-корозії сприяє також збільшення контактного тиску, що викликає перехід від утомного корозійного зношування до схоплювання. Значною мірою цьому сприяє інтенсифікація фрикційного нагрівання і зростання температури на плямах контакту.

Водневе зношування – це процес насичення воднем підповерхневих шарів металу при терті, з утворенням численних мікротріщин і диспергуванням металу в зоні інтенсивної деформації. При перенасиченні металу воднем можливе його зношування внаслідок в'язкої плинності поверхневого шару.

Цьому виду зношування піддаються сталеві і чавунні деталі при терті об матеріал, якими містить водень або у середовищі, насиченому воднем. Такими матеріалами можуть служити композитні на основі полімерів, а середовищем – мастильні матеріали, розкладання яких супроводжується виділенням водню.

Кінетика водневого зношування включає кілька етапів. В результаті термо- або механодеструкції мастила або матеріалу спряженого з металом, відбувається інтенсивне виділення водню в зону тертя. На плямах фактичного контакту постійно протікають трібохімічні реакції, які є джерелом безпервного постачання водню до поверхні тертя металу.

Другим етапом є дифузія атомарного водню в поверхневий шар металу. Вважається, що дифузія водню всередину металу обумовлена наявністю немонотонного розподілу температури і напруг по нормалі до поверхні тертя. При важких режимах навантаження максимально напружена точка знаходиться не на поверхні тертя, а в підповерхневому шарі. В околі цієї точки матеріал зазнає переважно пластичних деформацій, які є джерелом тепла. Отже, джерело тепла розташовується на деякій відстані від поверхні тертя. Рішення для таких умов нестационарної задачі теплопровідності показало, що розподіл температури по глибині третьового тіла графічно зображується кривою з максимумом у точці, розташованій під поверхнею тертя. У шарі, товщина якого менш ніж відстань від поверхні тертя до максимально напруженої точки, температура і напруги зростають із збільшенням глибини. Це і забезпечує зростання температури і дифузії водню в об'єм поверхневого шару металу при терті. Установлено, що розподіл концентрації водню і температури по глибині близькі за формою кривих. Глибина зони максимальної концентрації водню залежить від режимів навантаження, механічних і теплофізичних характеристик матеріалів тіл, що спряжуються.

З нагромадженням водню в поверхневому шарі металу зростає його руйнуючий вплив, який може проявитися двома способами. Перший з них – це крихке руйнування металу диспергуванням. У процесі дифузії атомарний водень потрапляє в утворені при терті мікротріщини і пори металу, і поєднується там у молекули. Надходження атомів водню в об'єми дефектів полегшу-

ється в момент дії напруг, що розтягують. При впливі стискуючих напруг (при терті матеріал піддається знакозмінним циклам напруг) об'єднаний у молекули водень, не маючи можливості вийти з об'єму металу, створює величезні внутрішні напруження у вершинах мікротріщин, знижуючи таким чином міцність насиченого воднем шару. Крім того, в ділянках підвищеної концентрації атоми водню, які проникли в кристалічні решітки металу, сприяють створенню локальних перенапружених зон. Таким чином, утвориться величезна кількість зародків мікротріщин, які інтенсивно розвиваються під дією циклічних напруг тертя. У результаті в поверхневому шарі з'являється розгалужена зі щільно розташованими мікротріщинами сітка. Результатом утворення цієї сітки є миттєвий перехід металу в тонкодисперсний порошок.

Слід відрізнити водневе зношування, дисперговане при терті, від водневої крихкості металу при об'ємному навантаженні. В останньому випадку об'ємне руйнування зразка відбувається в результаті зростання магістральної тріщини. Воднева крихкість характеризується також більш низькою, ніж при водневому зношуванні, концентрацією водню і більш рівномірним його розподілом по об'єму зразка.

2.3.4 Утомне зношування

До утомного зношування відносять випадки, коли при роботі трібосистем відсутні аномальні uszkodження (схоплювання, задир, мікрорізання, припикання поверхонь тощо), тертя протікає в нормальних умовах, з мастильним матеріалом, але, проте, внаслідок тертя матеріал поверхневого шару "утомлюється" і починає відокремлюватися у вигляді часток зносу. Тут можна провести аналогію з поняттям "утомна міцність".

Розрізняють утомне зношування двох видів: багатоциклічне і малоциклічне. Багатоциклічне зношування виникає при пружному контактуванні. Багаторазовий вплив на мікрОВиступ призводить до поступового нагромадження мікродефектів, утворення мікротріщин, при злитті яких утворюються поверхневі макротріщини, які викликають руйнування матеріалу і відділення часток зносу. При малоциклічному зношуванні спільна дія нормального і дотичного навантажень при терті призводить до того, що максимальне дотичне напруження виникає не на поверхні, а під плямою контакту на невеликій глибині, де накопичуються uszkodження і утворюються тріщини. У крихкого матеріалу тріщина виникає на поверхні. Малоциклічне зношування спостерігається при пластичному деформуванні поверхонь (без різання) більш м'якого матеріалу виступами більш твердого. У місцях такого деформування нерідко утворюються бічні навали, які при наступних проходах теж можуть відокремлюватися у вигляді продуктів зносу.

Особливим проявом багатоциклічного зношування є так званий пітинг (англ. Pit – поглиблення), що виникає на доріжках кочення підшипників при пульсації навантаження.

Пітинг виникає в результаті багаторазового деформування поверхонь, що навантажуються, тілами кочення. Виразки пітинга часто називають викришуванням. Крім підшипників і напрямних кочення, такий знос характерний для зубів шестерень, шліцьових спряжень і ряду інших контактних пар.

Кількісна оцінка контактної утоми виражається в кількості циклів навантаження або в годинах роботи до виникнення утомних руйнувань поверхонь. Поява утомного зношування – викришування – призводить до посилення вібраційно-акустичної активності механізмів, підвищення рівня шуму, збільшення концентрації навантаження, контактних напруг, зменшенню розміру площі несучої поверхні тертьових поверхонь, виникнення інтенсивного зносу і заїдання. Умови виникнення і кінетика розвитку утомного зношування залежать від напруженого і деформованого стану поверхневих і приповерхневих шарів матеріалу, фізико-механічних властивостей матеріалу, фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів і навколишнього середовища, товщини мастильного шару, кінематики контакту, форми і розмірів дотичних деталей. Пружне контактне макродеформування матеріалів супроводжується появою мікропластичних деформацій у мікрооб'ємах.

Виникненню мікротріщин при циклічних контактних впливах сприяє вплив концентраторів напруг. До поверхневих концентраторів напруг належать дефекти у вигляді подряпин, вм'ятин, рисок, припиків тощо. До під поверхневих концентраторів напружень належать неметалічні включення, мікропори, раковини, карбіди та ін. Великий вплив має значення максимальних дотичних напружень. Первинна тріщина частіше виникає на поверхні контакту, але може зароджуватись і у приповерхніх шарах матеріалу.

Зі збільшенням товщини мастильного шару зменшуються кількість взаємодіючих мікронерівностей, тривалість і величина деформування, відвертається металевий контакт. Умовами появи викришування, пов'язаного з пластичними деформаціями, можна пояснити позитивний вплив підвищених значень меж пружності, плинності, в'язкості матеріалу, твердості несучої області матеріалу, а також провідне значення дислокаційних процесів – утворення порожнеч, злиття дислокацій уздовж площин ковзання або спайності.

Рівняння І.В. Крагельського для швидкості зношування при фрикційній утомі має такий вигляд:

$$I_h = \sqrt{\frac{h}{R} \frac{p_a}{p_r} \frac{k_1 \alpha^*}{n}}, \quad (2.33)$$

де h/R – відносна глибина проникнення (h – глибина проникнення одичної нерівності; R – радіус нерівності);

p_a і p_r – відповідно номінальний і фактичний тиски;

k_1 – коефіцієнт, що залежить від розташування нерівностей по висоті;

α^* – відношення номінальної площі до площі тертя;

n – кількість циклів, що витримує деформований об'єм до руйнування.

При ковзанні тіл процес нагромадження ушкоджень має певну стадійність. Спочатку відбувається нагромадження пружних спотворень решітки і збільшується щільність дислокацій. Після досягнення критичної щільності дислокацій виникають субмікроскопічні тріщини. Разом з необоротними спотвореннями кристалічних решіток порушуються міжатомні зв'язки і руйнуються окремі мікрооб'єми.

Теорія зносу відшаровуванням, розроблена Н. Су, виходить з таких концепцій. Тангенціальне зусилля, котре діє в поверхневих шарах, призводить до підповерхневої пластичної деформації, яка накопичується при багаторазових проходженнях нерівностей. При цьому утворюються тріщини і порожечки в підповерхневих шарах металу, відбувається їх збільшення і злиття. Процес відшаровування розглядається як кумулятивний. Під дією кожної нерівності відбувається певний зсув матеріалу. Пелюстки зносу виникають після проходження досить великої кількості нерівностей.

2.3.5 Адгезійне зношування

Адгезійне зношування – це явище утворення міцних сполук у зонах фактичного контакту тертьових тіл, глибинного виривання матеріалу одного тіла і переносу на поверхню тертя іншого, яке супроводжується зміною їхніх лінійних розмірів.

Адгезійне зношування спостерігається в зубчастих і зубчато-гвинтових передачах; тяжко навантажених підшипниках ковзання; підшипниках кочення; парах тертя плунжер – втулка, циліндр – поршневе кільце, напрямні металорізальних верстатів – супорт; у трібосистемах, які експлуатуються у вакуумі або інертному середовищі; в сполученнях, що експлуатуються при високій температурі (ролики прохідних печей, прокатних верстатів, деталі гальмових пристроїв).

Механохімічний процес є результатом руйнування адгезійних зв'язків, що виникають між тертьовими тілами на ювенільних (очищених від плівок оксидів, мастильних матеріалів, забруднень) ділянках поверхонь. Тому для реалізації цього виду зношування необхідно в першу чергу видалити плівки з поверхні контактуючих нерівностей. При терті цей процес відбувається завдяки тепловому і механічному впливам.

Наступним етапом механохімічної (адгезійної) взаємодії є утворення міцних адгезійних зв'язків (містків зварювання) між тертьовими тілами. Необхідною умовою його реалізації є зближення ювенільних ділянок поверхонь, що спряжуються, на відстань дії міжатомних сил. При цьому матеріал нерівностей, що утворює містки зварювання, повинен пластично деформуватися. У протилежному випадку після зняття навантаження пружна енергія деформації може виявитися достатньою для руйнування адгезійного зв'язку. Отже, напруги на плямі контакту повинні перевищувати твердість матеріалу.

Заключний етап процесу механохімічної взаємодії – руйнування містків зварювання – визначається співвідношенням їх адгезійної і когезійної міцно-

стей. Ф.П. Боуден розрізняє чотири види руйнування:

– міцність зв'язку на межі розподілу менша за міцність обох матеріалів пари тертя. У цьому випадку руйнування відбувається переважно по границі розділу, і кількість матеріалу, що видаляється з обох поверхонь (інтенсивність зношування), буде незначною;

– спряження на межі розподілу міцніше одного з третьових тіл. Зріз буде відбуватися по менш міцному матеріалу. Частки цього матеріалу будуть налипати на більш тверду поверхню, утворюючи плівку на його поверхні. У результаті реалізується тертя однойменних матеріалів;

– адгезійне спряження міцніше за матеріал обох третьових тіл. Руйнування відбувається в основному об'ємі більш м'якого матеріалу, але можливе також руйнування і спряженого з ним тіла. Інтенсивність зношування твердого тіла значно нижче м'якого;

– міцність адгезійного спряження і когезійної міцності третьових тіл однакова (тертя однойменних матеріалів). Ця рівність, як правило, порушується внаслідок наклепу, і міцність спряження стає вище міцності металу. Зріз відбувається по об'єму контактуючих нерівностей, що призводить до інтенсивного зношування обох тіл;

Тип руйнування адгезійних зв'язків визначає вид зношеної поверхні, розмір часток зносу та їхню форму, а також інтенсивність зношування. Можливі такі види руйнування адгезійних зв'язків:

1. Вишив матеріалу у вигляді мікрочастинок. У цьому випадку на поверхні тертя утворюються кратероподібні поглиблення. Частки зносу мають неправильну форму, а їх маса досягає 10^{-10} г. Інтенсивність зношування мала, а катастрофічне руйнування поверхонь тертя не досягається. Цей вид руйнування спостерігається переважно за умови, коли адгезійна міцність на межі розподілу нижча за когезійну міцність матеріалів контактуючих тіл.

2. Утворення тонкої плівки більш м'якого матеріалу на поверхні тіла, що сполучається з ним. Типовий випадок такого переносу спостерігається при терті міді по сталі. Після утворення плівки реалізується тертя міді по міді. При цьому можливо підвищення коефіцієнта тертя, досягнення високої інтенсивності зношування і перехід до катастрофічного зносу. Частки зносу можуть приймати форму тонких пластин. На поверхні, яка зношується, з'являються борозни, витягнуті в напрямку ковзання. Цей вид руйнування має місце за умови, коли адгезійна міцність вище когезійної одного з елементів пари тертя.

3. Якщо міцність адгезійного зв'язку вища когезійну міцності обох спряжених тіл, то зношуванню піддається в основному менш міцний елемент пари тертя. Однак після багаторазового навантаження можливе локальне руйнування, відділення і перенос часток більш твердого матеріалу (контртіла) на поверхню, що сполучається. На поверхні контртіла утворюються смуги ковзання, що є результатом дряпання наклепаними частками, закріпленими в поверхневому шарі м'якого матеріалу.

4. Глибинне виривання значних об'ємів матеріалу з утворенням на пове-

рхнях тертя глибоких борозен і великих наростів – задирок. При цьому можливе оплавлення поверхонь тертя, катастрофічний знос і заклинювання деталей. Цей вид зношування, названий заїданням, іноді супроводжується загальним зварюванням поверхонь тертя і зупинкою елементів трібосистеми.

Механохімічна взаємодія полімерних і металополімерних пар тертя принципово не відрізняється від описаної. Вона обумовлена взаємодією активних продуктів деструкції молекулярних ланцюгів полімерів і ювенільних ділянок поверхні металу. Міцність утворених зв'язків може перевищувати міцність зв'язків між окремими елементами надмолекулярних утворень або молекулами. В цьому випадку руйнування (зріз) містків зварювання відбувається по об'єму полімеру. Особливість зношування полімерів полягає в тому, що більш важливу роль у виникненні ступені його прояву відіграє хімічна активність полімеру стосовно контртіла.

Інтенсивність механохімічної (адгезійної) взаємодії збільшується зі зростанням навантаження, швидкості ковзання і температури в зоні тертя, підвищенням хімічної активності матеріалів третьових тіл, зниженням твердості одного з них і швидкості відновлення захисних плівок на поверхнях тертя.

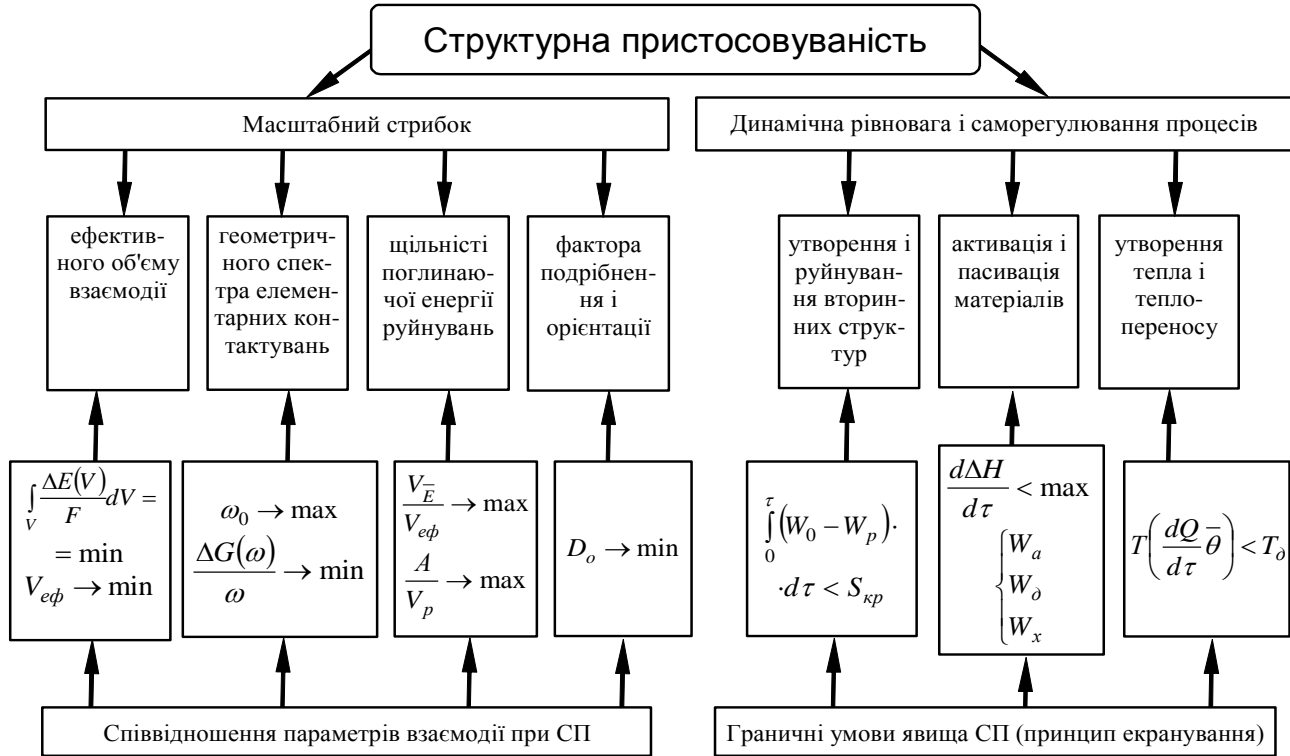


Рис. 2.23 Фізична модель структурної пристосовуваності матеріалів при терті

3 РЕЖИМИ МАЩЕННЯ

3.1 Загальні характеристики режимів мащення

Крива Штрибека і режими мащення. Трібологічні процеси, тобто процеси контакту, тертя і зношування, як правило, пов'язані з безпосередніми фізичними взаємодіями між здійснюючими відносний рух поверхнями. На всі ці процеси впливає мастильний матеріал, призначення якого полягає в поділі рухомих відносно одна одної поверхонь плівкою матеріалу, здатного піддаватися зсуву з малим опором і без будь-яких ушкоджень поверхонь.

Товщина і характер змащувального шару визначає вид мащення і тим самим, тертя. У залежності від товщини плівки мащення (від десятих часток міліметра до декількох нанометрів), розподілу висот нерівностей у плівці мащення і ступеня геометричного прилягання можна виявити різні режими мащення, що зручно обговорити, розглядаючи криву Штрибека. У період з 1900–1902 р. Г. Штрибек провів численні експерименти з тертям підшипників ковзання і кочення. Він виміряв коефіцієнт тертя в залежності від навантаження N , швидкості V і температури T . Щоб виключити вплив на результати залежності в'язкості від температури, Штрибек перерахував і виміряв коефіцієнт тертя у функції навантаження і швидкості при постійній об'ємній температурі оливи $25\text{ }^\circ\text{C}$. Точні виміри Штрибека послужили основою для теоретичних досліджень гідродинамічних підшипників Зомерфельда, Гюмбеля та їхніх послідовників.

Тепер загально визнано, що крива Штрибека являє собою загальну характеристику змазаних поверхонь, що рухаються, у залежності від в'язкості оливи η , швидкості V і нормального навантаження N (або тиску p). На рис. 3.1 показана крива Штрибека в спрощеному вигляді як функція параметру $\eta \cdot V/N$. Цей параметр пов'язаний з величиною, зворотною числу Зомерфельда S_0 .

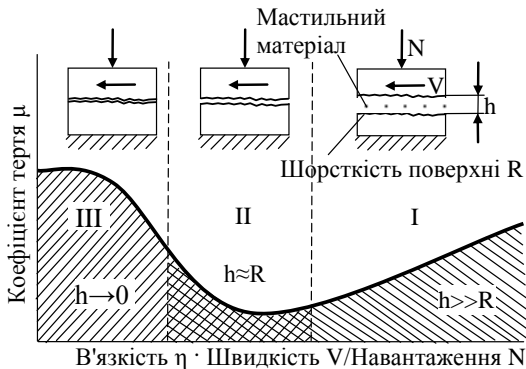


Рис. 3.1 Крива Штрибека і режими мащення

У залежності від форми поверхонь тертя, матеріалів, робочих умов і проміжку h між поверхнями можна виділити три головних режими мащення:

- I. Гідродинамічне мащення (або еласто-гідродинамічне (ЕГД) мащення).
- II. Змішане мащення.
- III. Граничне мащення.

У режимі I тверді поверхні розділені безперервною плівкою рідини, товщина якої набагато більше рівня шорсткості поверхонь R_a . Опір руху обумовлений внутрішнім тертям рідини. У цьому режимі трибологічна поведінка системи визначаються реологією рідини і може бути розрахована або оцінена методами механіки рідин. Якщо розглянута система складається з погано прилягаючих зосереджених контактів, то варто також враховувати пружну деформацію (Герца) поверхонь і залежність в'язкості рідини від тиску. У результаті одержуємо режим пружнодинамічного мащення. Оскільки в режимі I немає прямих фізичних контактних взаємодій між поверхнями, то процеси зношування відсутні (крім поверхневого утомного зношування, кавітаційного зношування, рідинної ерозії або абразивного зношування через наявність в рідині абразивних часток).

Якщо в умовах гідродинамічного або ЕГД – мащення знижується в'язкість рідини або швидкість, чи зростає навантаження, то плівка рідини стає "тоншою" і зазор між поверхнями зменшується. Коли з'являються перші контактні взаємодії нерівностей, виникає режим II – часткове ЕГД–мащення, або змішане мащення. У цьому режимі навантаження сприймається частково плівкою рідини, частково контактуючими нерівностями поверхонь. Отже, у цьому режимі опір тертя складається в основному з опору зсуву плівки мащення і частково з взаємодій нерівностей. У режимі II у принципі можливі всі механізми зношування.

Якщо умови роботи системи в режимі II на рис. 3.1 зрушуються вліво по кривій Штрибека, то кількість взаємодій нерівностей у межах площі контакту зростає, а товщина плівки зменшується до декількох мономолекулярних шарів і менше. У III режимі граничного мащення об'ємні реологічні властивості речовини мащення стають менш важливими, а навантаження майже цілком сприймається деформацією нерівностей. Очевидно, що в режимі III фізико-хімічні взаємодії на поверхнях розподілу тверде тіло – рідина – тверде тіло визначають характер тертя і зношування в системі.

3.2 Гідродинамічний режим мащення

Гідродинамічний режим мащення - це вид змашувальної дії, при якому здійснюється повне розділення поверхонь тертя мастильним матеріалом в результаті тиску, самозбудженого в шарі рідини при відносному русі поверхонь, що обмежують змашувальний шар.

Гідродинамічне мащення має місце в радіальних і упорних підшипниках ковзання різноманітного призначення, в циліндро-поршневій групі двигунів

внутрішнього згоряння в швидкохідних навантажених, гарно припрацьованих зубчатих передачах та інших вузлах тертя.

Трибологічна поведінка гідродинамічної системи в основному визначається двома такими особливостями:

- опір руху задається "внутрішнім тертям" рідини, тобто опором зрушенню або "в'язкістю" рідкої плівки;
- зношування виключається, якщо форма поверхонь така, що приводить до повного поділу поверхонь.

Опір руху при гідродинамічному мащенні системи визначається дотичними напруженнями в рідині, що рухається. Щоб одержати міру опору зрушенню або в'язкості рідини, розглянемо систему з двох плоских і твердих поверхонь, зображену схематично на рис. 3.2. Нижня поверхня нерухома, а верхня рухається паралельно їй зі швидкістю V_0 . Оскільки молекули рідини приліпають до поверхонь при не занадто великих швидкостях, рідина має ламінарний профіль швидкостей $V = V_0$ на верхній площині і $V = 0$ – на нижній. Сила F , необхідна для підтримки руху верхньої поверхні, пропорційна площі поверхонь A і V_0/z , де z – відстань між пластинами. Отже, дотичне напруження F/A пропорційне зміні деформації зрушення V_0/z :

$$F/A = \eta(V_0/z), \quad (3.1)$$

або в більш загальному вигляді:

$$\tau = \eta \left(\frac{dV}{dz} \right). \quad (3.2)$$

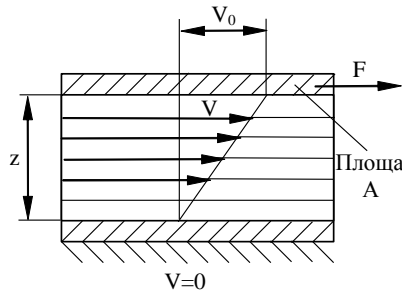


Рис. 3.2 Тертя між двома паралельними пластинами розділеними рідиною

Коефіцієнт пропорційності η називається коефіцієнтом динамічної в'язкості рідини, що підкорюється закону пропорційності між дотичним напруженням і швидкістю зміни деформації зрушення $\frac{dV}{dz}$, відносяться до класу ньютонівських рідин.

Щодо другої особливості, то для утворення несучого тиску необхідна звужуючи клиноподібна плівка, як це показав Рейнольдс у 1886 р. Фізична картина процесів, що приводять до утворення тиску в плівці рідини, що звужується, може бути побудована шляхом аналізу простої опори ковзання, схематично зображеної на рис. 3.3.

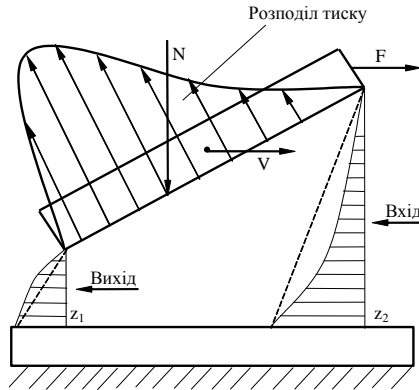


Рис. 3.3 Тертя між двома паралельними пластинами при гідродинамічному режимі мащення

Вхідний зазор z_2 більше вихідного зазору z_1 . Весь зазор заповнений в'язкою нестиисловою рідиною. Припустимо, що первісно розподіл швидкості на вході може бути лінійним (рис. 3.2). Оскільки $z_2 > z_1$, то потік на вході перевищував би потік на виході, що суперечило б умові нерозривності плинності. Це автоматично призводить до розподілу тиску, що протидіє вхідному потоку. У результаті профілі швидкості змінюються: на вході профіль увігнутий; на виході опуклий, як показано схематично на рис. 3.3. Площа під кожною кривою профілю швидкості уздовж залишається та ж сама, і умова нерозривності плинності виконується. Якщо поверхні цілком розділені, відносний рух відбувається усередині плівки рідини.

Розглянемо розв'язання рівняння Рейнольдса для простого випадку мащення системи циліндр – площина (рис. 3.4), щоб показати зміст цього рівняння і одержати вихідні дані для вивчення режиму пружногідродинамічного мащення. Одновимірне рівняння Рейнольдса для стаціонарного руху таке:

$$\frac{dP}{dx} = 6\eta V \frac{h - \bar{h}}{\bar{h}^3}, \quad (3.3)$$

де V – швидкість поверхні;

η – динамічна в'язкість;

h – товщина плівки на вході \bar{h} – товщина плівки на виході, коли $dp/dx = 0$.

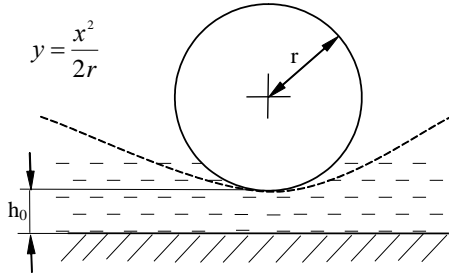


Рис. 3.4 Система "циліндр – площина" в середовищі рідини

В околі мінімального зазору кола радіусом r можна апроксимувати рівнянням параболи $y = x^2/2r$. Використовуючи це рівняння товщини плівки і граничну умову для $p(x)$, інтегруємо рівняння Рейнольдса. У літературі описані різні граничні умови для $p(x)$:

- умова Зомерфельда $p = 0$ при $x = +\infty$;
- умова Зомерфельда $p = 0$ при $x \geq 0$;
- умова Рейнольдса $p = 0$, коли $dp/dx = 0$ при $x > 0$.

Інтегрування рівняння Рейнольдса з застосуванням умови Зомерфельда дає такий розподіл тиску:

$$p = 2hV(x/h^2). \quad (3.4)$$

Тепер, використовуючи умову Зомерфельда, можна легко розрахувати повну несучу здатність N/L на одиниці довжини циліндра L :

$$\frac{N}{L} = \int_0^{\infty} p dx - 2 \left(\frac{pVr}{h_0} \right). \quad (3.5)$$

Застосовуючи умову Рейнольдса, одержуємо:

$$\frac{N}{L} = 2,45 \left(\frac{pVr}{h_0} \right). \quad (3.6)$$

Перетворюючи ці вирази у формули, що пов'язують мінімальну товщину плівки з робочими параметрами: навантаженням N і швидкістю V , в'язкістю η , радіусом циліндра r і довжиною L , одержимо:

$$h_0 r = 2 \left(\frac{pVr}{N} \right), \quad (3.7)$$

для умови Зомерфельда і для умови Рейнольдса:

$$h_0 r = 2,45 \left(\frac{p V r}{N} \right). \quad (3.8)$$

Ці результати показують, що в системі "циліндр – площина" товщина плівки мащення зменшується зі зменшенням в'язкості η , зменшенням швидкості V і збільшенням нормального навантаження N . Після вивчення зв'язку між товщиною плівки мащення і параметрами системи, що впливають на неї, розглянемо питання про тертя. Як зазналося вище, силу тертя можна знайти, інтегруючи діючі на поверхню циліндра дотичні напруження і додаючи до результату всі гідродинамічні сили, що діють у напрямку руху. У результаті розрахунків із застосуванням умови Рейнольдса одержимо формулу для коефіцієнта тертя:

$$\mu = \frac{F}{N} = 0,76 \left(\frac{\eta V L}{N} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.9)$$

Цікаво порівняти результати для системи "циліндр–площина" і для радіального підшипника, практично найбільш важливої механічної системи гідродинамічного мащення. На рис. 3.5 схематично показаний працюючий радіальний підшипник. Оскільки в будь-якому радіальному підшипнику існує природний мастильний клин внаслідок особливостей зазору, то при досить високих швидкостях у мастильній рідині розвивається тиск, що підтримує вал і цілком відокремлює його від втулки підшипника. Тертя зручно описати в залежності від робочих змінних і параметрів підшипника, об'єднаних у "число Зомерфельда" (іноді називане "числом Гюмбеля"). Число Зомерфельда визначається у вигляді:

$$S_0 = \frac{p \psi_r^2}{\eta \omega}, \quad (3.10)$$

де $p = N/2rL$ – навантаження, поділене на площу проекції підшипника;

$\psi_r = C_r/r$ – відношення радіального зазору до радіуса вала;

η – динамічна в'язкість;

$\omega = V/r$ – кутова швидкість.

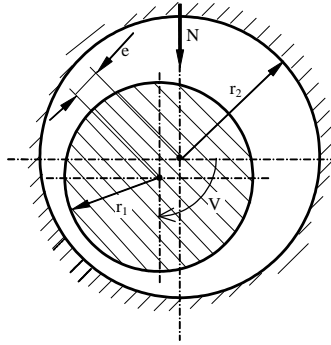


Рис. 3.5 Схематичне зображення геометрії радіального підшипника:
 N – навантаження; V – швидкість ковзання; e – ексцентриситет; r_1 – радіус вала; r_2 – радіус втулки; $C_r = r_1 - r_2$ – радіальний зазор

Згідно з Фогельполем, коефіцієнт тертя можна виразити приблизно у такому вигляді:

$$\mu = \frac{3\psi_r}{S_0} \text{ при } S_0 < 1; \quad (3.11)$$

$$\mu = \frac{3\psi_r}{S_0^{1/2}} \text{ при } S_0 > 1, \quad (3.12)$$

звідки випливає, що:

$$\mu \cong \frac{\eta VL}{N} \text{ при } S_0 < 1; \quad (3.13)$$

$$\mu \cong \left(\frac{\eta VL}{N} \right)^{1/2} \text{ при } S_0 > 1. \quad (3.14)$$

У зв'язку з цим варто нагадати, що параметр $\eta V/N$ використаний як абсциса кривої Штрибека на рис. 3.1.

Параметр $\eta V/N$ є характеристикою режимів тертя тільки при змішаному і гідродинамічному мащеннях, через те що при граничному мащенні в'язкісні властивості мастильного матеріалу не беруть до уваги. При гідродинамічному режимі міцність оливоного шару визначається в'язкістю оливи, яку підбирають залежно від умов роботи тертьових поверхонь (температура, тиск, швидкість взаємного переміщення). Чим більша в'язкість, тим кращі умови

забезпечення гідродинамічного режиму тертя при зміні навантаження. Разом з тим зі збільшенням в'язкості зростає коефіцієнт тертя. Несуча здатність оливи поліпшується також зі збільшенням швидкості взаємного переміщення. Зниження в'язкості, що викликане підвищенням температури або напруженням зсуву, зміщує режим роботи підшипника в зону змішаного, а потім і до граничного мащення. Тому при змащуванні підшипника використовують компромісний варіант у виборі в'язкості оливи між втратами на тертя у гідродинамічному режимі і спрацюванням підшипника під час переходу через режим змішаного мащення.

При цьому, виходячи з гідродинамічної теорії мащення, враховують таке:

- при гідродинамічному режиму втрати на тертя зростають із збільшенням в'язкості оливи, швидкості ковзання деталей та площі поверхонь їх стикання;
- із збільшенням швидкості тертьових деталей доцільні менш в'язкі оливи;
- при більш високих зазорах між деталями необхідно більш в'язке олива.

З метою зниження спрацювання в'язкість оливи для машин і механізмів підбирають, виходячи з умов роботи підшипника, що знаходиться в найбільш жорстких умовах мащення. В інших трібосистемах зниження спрацювання й втрат енергії до прийнятих рівнів повинно досягати відповідною конструкцією цих вузлів.

3.3 Еласто-гідродинамічний режим мащення

Гідродинамічний режим мащення розглядався в основному для систем з високим "геометричним приляганням", наприклад для, опор ковзання зі самовстановлюваними вкладишами. Поверхні цих систем вважаються абсолютно твердими в процесі роботи. При поганому геометричному приляганні, наприклад, у випадках зосереджених контактів Герца, варто враховувати вплив пружної деформації поверхонь. Необхідно також мати на увазі вплив тиску на в'язкість рідини, оскільки в змазаних контактах Герца є високі тиски. Усе це приводить до поняття еласто-гідродинамічного (ЕГД) режиму мащення.

У якості вихідної розглянемо мастильну систему "циліндр–площина", пружнодеформованого під дією навантаження (рис. 3.6).

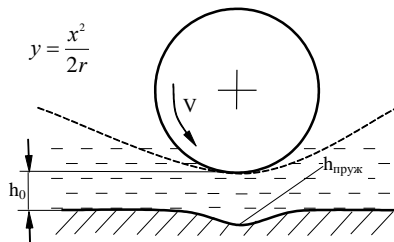


Рис. 3.6 Пружнодинамічний контакт циліндра з площиною

Задачу визначають такі рівняння:

1. Гідродинамічне рівняння.

Як показано вище, одомірне рівняння Рейнольдса в інтегральній формі має вигляд:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta V \frac{h - \bar{h}}{\bar{h}^3}. \quad (3.15)$$

Це рівняння було розв'язане для гідродинамічного режиму мащення. Однак, отриманий розв'язок рішення незастосовний в ЕГД-режимі, оскільки профіль плівки h і в'язкість η залежать від тиску p , тобто:

$$h = h(p) \text{ і } \eta_0 = \eta(p). \quad (3.16)$$

2. Рівняння пружності.

Профіль плівки $h(x)$ задається виразом:

$$h = h_0 + \frac{\zeta^2}{2r} + h_{np}, \quad (3.17)$$

застосувавши рішення задачі Бусинеска для h_{np} , одержимо:

$$h(\zeta) = h_0 + \frac{\zeta^2}{2r} - \frac{2}{\pi E} \int_{S_1}^{S_2} p(\zeta) \ln(\zeta - S)^2 dS + const, \quad (4.18)$$

де

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right); \quad (3.19)$$

де r – приведений радіус кривизни тіл; E_1, E_2 і ν_1, ν_2 – відповідно модулі пружності і коефіцієнти Пуассона тіл тертя.

3. Співвідношення між в'язкістю і тиском.

Вважаючи рідину нестисливою, а процес ізотермічним, доповнимо задачу загальноприйнятими співвідношеннями між в'язкістю і тиском в експонентній формі:

$$\eta(p) = \eta_0 e^{ap}, \quad (3.20)$$

де η_0 – в'язкість при атмосферному тиску і температурі T_0 ;
 a – п'єзокоефіцієнт в'язкості.

Обґрунтованість експонентної залежності підтверджується значним збільшенням в'язкості зі збільшенням тиску. Наприклад, при тиску за Герцу 1 ГН/м^2 в'язкість мінеральної оливи зростає в 10 разів у порівнянні з її значенням при атмосферному тиску.

Розв'язання задачі ЕГД-режиму полягає у відшуванні функцій $p(x)$, $h(x)$ ітераційним методом. У спрощеному описі ітераційний метод полягає в такому. Задаючи початковий розподіл товщини плівки, що підставляється в рівняння Рейнольдса, знаходять розподіл тиску. Він у свою чергу підставляється в рівняння пружності, що дозволяє оцінити пружні переміщення, які порівнюються з початковим розподілом товщини плівки. Ітерації продовжують до досягнення достатнього ступеня збігу двох послідовних розподілів товщини плівки.

Вплив викликаних тертям температур на в'язкість оливи призводить до зниження товщини плівки. Отже, в ЕГД-режимі не можна знехтувати впливом шорсткості поверхні і можливістю контактів нерівностей. Урахування цих явищ призводить до поняття часткового ЕГД-режиму або змішаного режиму мащення.

3.4 Граничний режим мащення

Якщо оливна плівка на тертьових поверхнях достатньо товста, так що розділенні нею поверхні, по суті, не торкаються одна одну, то коефіцієнт тертя відповідає умовам гідродинамічного режиму мащення і залежить в основному від в'язкості. В цих умовах специфічна природа поверхонь твердих тіл не виявляється і закон Амонтона не діє. По мірі збільшення навантаження і зменшення в'язкості або зниження відносної швидкості руху плівка між двома поверхнями стає тоншою і контакт між ними збільшується. При цьому товщина плівки може зменшитись до такої величини, коли закони гідродинаміки не діють і впливом поверхневих або граничних сил вже неможливо зневажати. При подальшому зменшенні товщини плівки настає момент, коли поверхні тертьових деталей приходять до зіткнення.

Між гідродинамічним і граничним режимами мащення нема різкого переходу, але існує проміжний перехід, в якому проявляються обидва види мащення. Цю зону звичайно звать режимом змішаного мащення.

При змінюванні товщини плівки по мірі переходу від одного режиму мащення до другого помітні змінення зазнає коефіцієнт тертя. Він збільшується від дуже низьких значень, відповідних гідродинамічному режиму тертя, до певної величини, звичайно менших ніж коефіцієнт тертя не змащених поверхонь. Такий тип мащення, де важливу роль відіграє природа поверхневого шару, знаходиться в лівій частині діаграми Штрибека і зветься граничним мащенням.

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 4348/3 і ДСТУ 2823-94 під граничним мащенням розуміється такий вид мащення, якому не можуть бути

приписані об'ємні властивості в'язкості мастильного матеріалу і який визначається властивостями граничних шарів, що виникають при взаємодії поверхонь тертя і змащувального матеріалу в результаті фізичної адсорбції або хімічної реакції.

При граничному режимі мащення характеристики тертя і зношування визначаються властивостями матеріалу контактуючих тіл і змащувальними властивостями оливи. Можливість реалізації граничного мащення залежить також від шорсткості тертьових поверхонь і характеризується питомою товщиною λ змащувальної плівки, яка уявляє собою відношення товщини плівки оливи h між тертьовими поверхнями до суми середніх квадратичних значень висот мікрорівнин шорсткості на цих поверхнях σ :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (3.20)$$

При гідродинамічному режимі $\lambda > 4$ при еластогідродинамічному $\lambda = 1 \dots 4$, при граничному $\lambda < 1$ і при $1 < \lambda < 3$ – режим змішаного мащення.

Можливі дві межі граничного мащення: одна з них відповідає переходу від тертя незмащених поверхонь до тертя зі змащуванням; другий – переходу від граничного режиму до еласто-гідродинамічного.

Механізм дії граничних мащень визначається створенням між тертьовими поверхнями плівки, здатної зменшувати число прямих взаємодій твердих тіл з малим опором зсуву. Найкраще ця задача вирішується за допомогою проміжної плівки з довгих молекулярних ланцюгів.

При граничному мащенні поверхні сполучених тіл розділені шаром мастильного матеріалу товщиною до 0,1 мкм. Коефіцієнт тертя при цьому залежить від наявності в оливі поверхнево-активних речовин та їхньої ефективності. За наявності таких плівок сила тертя знижується у порівнянні з тертям без оливи у кілька разів, а зношування тертьових поверхонь зменшується у сотні разів.

Щоб зрозуміти механізми граничного мащення, варто розглянути фізико-хімічні процеси утворення проміжної плівки. Взаємодії тверде тіло-мастильний матеріал, що призводять до появи захисної граничної плівки, можуть бути представлені трьома механізмами. Розрізняють плівки фізичного (адсорбція), хімічного (хемосорбція) походження та граничні плівки, які утворюються в процесі хімічної реакції між твердими поверхнями та молекулами оливи.

Фізична адсорбція. Утворення адсорбційних граничних плівок обумовлено наявністю у мастильних матеріалах полярних атомних груп, які утримуються на поверхні вандерваальсівськими поверхневими силами.

Перш за все, до полярних груп, що входять до складу молекул вуглеводнів та їхніх похідних, які є в оливах, належать: карбоксильна група COOH , гідроксильна група OH та карбонільна група CO . Всі вони разом з атомами C та H містять атоми кисню. До полярних сполук відносять також різноманітні ефіри,

смоли, жирні кислоти. У той же час чисто вуглеводневі групи, у тому числі метиленові CH_2 й метилени CH_3 , полярно інертні.

Полярно-активні вуглеводні мастильного матеріалу розташовані перпендикулярно до твердої поверхні і повернуті до неї полярними групами, маючи зчеплення на одному кінці (рис. 3.7.). Цими кінцями з електричним зарядом може бути активна карбоксильна група (радикал) COOH (рис. 3.7 а) і гідроксильна OH (рис. 3.7. б), які мають сильне притягання до металу.

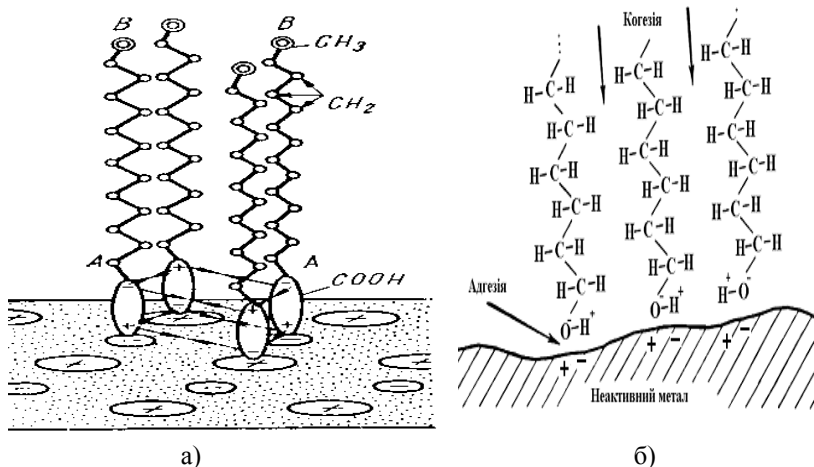


Рис. 3.7 Схеми зображення фізичної адсорбції полярно активними групами: а) – карбоксильною COOH ; б) – гідроксильною OH

В процесі адсорбції довгомірні молекули гранично щільно зближуються, розташовуючись у вигляді частоколу. Така будова забезпечує достатню міцність плівки за рахунок сил молекулярної взаємодії (когезії). Адсорбційні шари, сформовані з вертикально-орієнтованих молекул, маючи високий опір стисненню, здатні витримувати високі навантаження. При збільшенні довжини ланцюга молекули набувають здатності вигинатися у тангенціальному напрямі і ковзати одна по одній, знижуючи тертя.

Ефективність зниження тертя шарами адсорбованих молекул з однаковою довжиною ланцюга зменшуються в ряду: жирні кислоти, ефіри жирних кислот, спирти вуглеводні. Здатність знижувати тертя у ненасичених жирних кислот виражена в меншій мірі, ніж у насичених жирних кислот з такою ж кількістю атомів вуглецю. Це пояснюється їх менш ефективною довжиною ланцюга і просторовим фактором.

Орієнтація одних і тих же молекул змащувального матеріалу на поверхнях різних металів може значно різнитися – в межах від різко вираженої до майже повної відсутності. Це залежить від активності (величини силового поля) поверхні активного металу і покриваючої її плівки окислів. Окисна плі-

вка екранує силове поле металевої поверхні, але може сама мати таке поле, що забезпечує адсорбцію на ній молекул із оточуючого середовища.

Адсорбційні граничні плівки чутливі до температури, оскільки теплота викликає десорбцію, порушення орієнтації та плавлення плівки. Тому такі плівки можуть бути застосовані при низьких температурах і в умовах незначного тепловиділення під час тертя, тобто, при незначних навантаженнях та швидкостях ковзання

Хімічна адсорбція (хемосорбція) у системі з граничним мащенням виникає, коли молекули оливи утримуються на третьових поверхнях хімічними зв'язками, тобто, короткодіючими поверхневими силами. При хімічній адсорбції полярні кінці молекул, зв'язуючись з поверхнею тіла, утворюють на ній моношар, схожий за хімічним з'єднанням (рис. 3.8.).

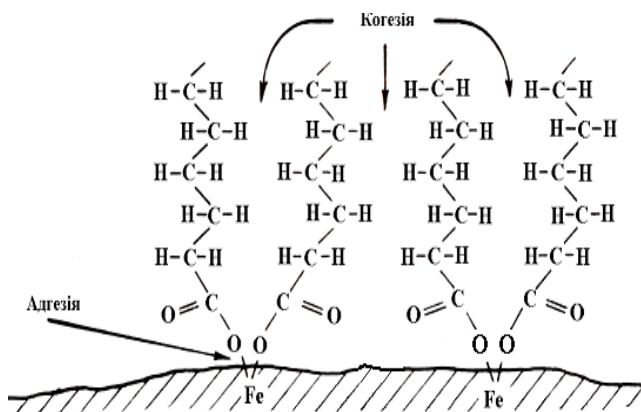


Рис 3.8 Схематичне зображення хімічної адсорбції

Активний зв'язок між кінцями молекул оливи і поверхнею металів призводить до проходження хімічних реакцій з утворенням мильної плівки. При цьому розвивається хімічна реакція без виведення атома металу з решітки його структури. У випадку жирних кислот адсорбована плівка перетворюється в мило метала поверхні. В цьому випадку змащувальна плівка часто характеризується більш високою стійкістю до зсуву, чим адсорбована плівка. Ефект зниження тертя металевими милами зберігається впритул до температури плавлення, але різко знижується після її досягнення.

Так, жирні кислоти, вступаючи в реакцію з оксидом металу, утворюють граничні плівки металевого мила, які здатні витримувати без руйнування значні деформації. Ці металеві мила мають не тільки бажані властивості міцності на зріз, але і значно більш високі температури плавлення, ніж первісна жирна кислота. Наприклад, температура плавлення стеаринової кислоти 69°C, а її сталевих мил 120°C.

Хемосорбція найбільш ефективно проходить на хімічно активних металах (Cd, Zn, Mg, Pb і ін.)

Хімічно адсорбовані плівки мають ефективну змащувальну здатність аж до температури плавлення, незалежно від того, утворені вони в місці реагуючий поверхні або нанесені напилуванням на не реагуючу поверхню. Вони забезпечують змащування при помірних навантаженнях, температурах та швидкостях ковзання і виявляються непридатними у важких робочих умовах із-за порушення орієнтації, розм'якшення або плавлення плівки при спільному впливі робочих перемінних і енергії, що підводиться.

Хімічна реакція. Більш стійкими, ніж будь-яка фізично чи хімічно адсорбована плівка, є граничні плівки, які виникають в результаті хімічних реакцій між твердими поверхнями та молекулами оливи, тобто, коли є обмін валентними електронами, та утворюється нова хімічна речовина (рис. 3.9.).

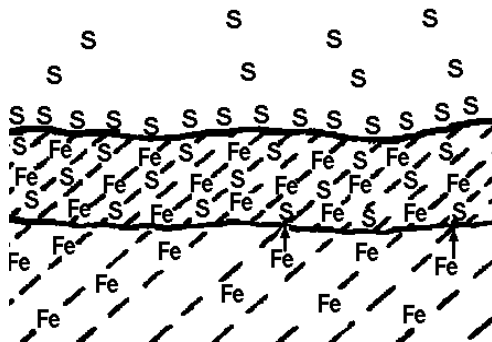


Рис. 3.9 Схема граничної плівки, утвореною хімічною реакцією

Такі граничні плівки не мають межі по товщині (обумовленої дифузійними процесами у кристалічні ґрати), характеризуються високими енергіями активації та зв'язку і незворотні.

Так, присутність у мастильних матеріалах сірки, фосфору і хлору, зумовлюють утворення на поверхні металу нових хімічних речовин – сульфідів, фосфатів та хлоридів цих металів. Вони утворюють на поверхні розділу плівки солей металів з малою міцністю на зріз, але високою температурою плавлення, такі, як сульфіди, хлориди, або фосфіди. Ці плівки більш стійкі, ніж будь-яка фізичне або хімічно адсорбована плівка. Граничні плівки, що залежать від хімічної реакції, придатні для високих навантажень, високих температур і високих швидкостей ковзання і обмежені в застосуванні хімічно активними металами. Такі умови звичайно називають такими, що "призводять до задиру", але найбільшу небезпеку серед них представляють високі температури. Хоча протиадирні присадки функціонують за рахунок реакції з поверхнями, вони не повинні бути занадто активними, оскільки в протилежному випадку механохімічне зношування може досягти досить високих інтенсивностей.

Як уже відзначалося одним з важливих факторів, які здійснюють вплив на весь комплекс службових властивостей трібосистеми, що визначає антифрикційні властивості трібосполучень, є температура, що розвивається при терті, яка викликає нагрівання тонких поверхневих шарів сполучених тіл і поділяючого їхнього мастильного шару. Блоком була запропонована гіпотеза про сталість критичної температури, при якій відбувається руйнування граничного мастильного шару для даної комбінації матеріалів поверхонь тертя і хімічно неактивного мастильного матеріалу. Встановлено, що поділ поверхонь тертя граничними орієнтованими шарами поверхнево-активними речовинами забезпечується в умовах граничного мащення до моменту їхньої дезорієнтації і десорбції при досягненні визначених, для даного сполучення матеріалів і мастильного матеріалу, температур. Найбільше яскраво це показано в роботах Боудена і Тейбора температурним методом оцінки мастильної здатності олій.

Щоб описати походження різних граничних плівок, використовуємо якісну діаграму, представлену на рис. 3.10.

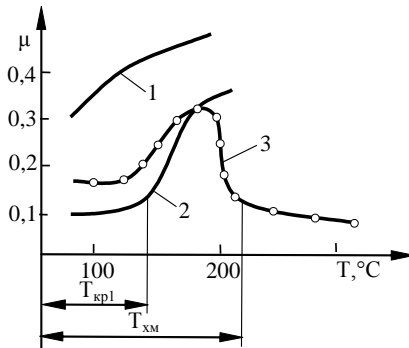


Рис. 3.10 Характерні залежності коефіцієнта тертя μ від температури T :

1 – неполярна базова олива; 2 – олива з поверхнево-активною присадкою; 3 – олива з хімічно-активною присадкою

На цій діаграмі представлені графіки залежності коефіцієнта тертя μ від температури T . Крива 1 побудована для системи де мащення відбувається неполярною базовою олією. Вона показує, що тертя первісне відносно високе і підвищується з ростом температури, оскільки слабкі адсорбційні зв'язки розриваються. Крива 2 відноситься до олив і пластичних мастильних матеріалів із природними або введеними поверхнево-активними присадками. Цей мастильний матеріал реагує з поверхнею металу, утворюючи металеве мило, що легко зрушуються на площі фактичного контакту. Критерієм руйнування мастильного шару є критична температура (перший перехідний процес), $T_{кр1}$ яка характеризує дезорієнтацію, десорбцію адсорбованих молекул поверхнево-активних речовин. $T_{кр1}$ визначається по різкому зростанню тертя і підвищенню зносу адгезійного типу. Крива 3 характерна для олив і пластичних мастиль-

них матеріалів з хімічно активними присадками, для яких виявлені додаткові критерії: температура хімічної модифікації поверхонь тертя (другий перехідний процес), при перевищенні якої встановлюється порівняно низький коефіцієнт тертя і припинюється його стрибкоподібна зміна в результаті утворення на поверхні тертя модифікованого шару, утвореного хімічною реакцією продуктів розкладання присадок з матеріалом поверхні $T_{\text{хм}}$. При цьому знос здобуває корозійно-механічний характер і локалізується в модифікованому шарі. Подальше підвищення температури контакту може призвести до третього перехідного процесу – критичній температурі хімічно модифікованого шару $T_{\text{кр2}}$, при якій буде відбуватися руйнування цього шару в результаті його розкладання. Усі три зазначені температури мають фізичне обґрунтування.

Виходячи з молекулярно-механічної теорії, сила тертя F в граничному режимі при постійному навантаженні трібосистеми може бути виражена трьохчленною залежністю:

$$F = \alpha S \tau_{\alpha} + \beta S \tau_{\beta} + \gamma S \tau_{\gamma}, \quad (3.21)$$

де S – номінальна площа контакту;

α, β, γ – долі реальних площин контакту, на яких реалізується зсув виступів поверхонь;

$\tau_{\alpha}, \tau_{\beta}, \tau_{\gamma}$ – межі міцності при зсуві відповідно твердого тіла, мастила в номолекулярному і в полімолекулярному шарах.

З існуючих режимів мащення граничний режим найбільш жорсткий. Він характеризується високими показниками зносу і коефіцієнтом тертя. Як правило, цей режим реалізується в трібосполученнях важконавантажених зубчатих передач, циліндропоршневої групі двигунів у зоні верхньої мертвої точки, в напрямних металорізних верстатів (відомий ефект ковзання з стрибками), також найбільш виразно цей режим виявляється в період пуску і зупинки трібосистеми.

3.5 Режим змішаного мащення

Якщо режим гідродинамічного мащення стає неможливим, поява граничного мащення часто супроводжується змішаним режимом мащення, коли виникає частковий контакт виступаючих вершин мікронерівностей при наявності відносно великої кількості в западинах. В цих умовах одні ділянки поверхні контактуючих тіл розділені гідродинамічним шаром, а другі граничним. При змішаному мащенні велике значення мають як об'ємна характеристика змащувального матеріалу – його в'язкість, так і здатність змащувального матеріалу утворювати на поверхнях тертя міцні граничні шари. Звичайно, чим вище доля гідродинамічного режиму мащення, тим коефіцієнт тертя при змішаному мащенні нижче.

Просте і витончене пояснення режиму змішаного мащення засноване на припущенні, що повне прикладене навантаження сприймається частково гідродинамічною дією плівки рідини і частково контактами нерівностей. Отже,

повна сила тертя складається з в'язкого тертя рідини і тертя в контактах нерівностей.

Якщо кількість змащувального матеріалу така, що окрім витрати на утворення граничної плівки мається його надмірна кількість, котра у вигляді рідини частково заповнює западини, то вони служать резервуаром для відновлення зношувальної граничної плівки. Зі збільшенням кількості оливи до необхідного для утворення гідродинамічного ефекту на мікроклінах шорсткості сполучених тіл граничне мащення переходить в режим змішаного мащення. Цей режим поза залежністю від швидкості і в'язкості властивий усякій трібосистемі при наявності достатньої кількості змащувального матеріалу.

Процеси, що виникають при змішаному мащенні, дуже складні, так як усі види тертя побічно впливають один на одного, приймаючи участь у створенні підйомної сили, а деякі з них впливають безпосередньо, наприклад, еласто-гідродинамічні плівки.

Змішаний стан гідродинамічного і граничного мащення можливий в двох варіантах:

1. Якщо тертьові поверхні не мають відхилень від заданої геометрії внаслідок перекосів, деформацій, хвилястості і т. п. і контактують по усій номінальній площині. Тоді контакт між поверхнями здійснюється по вершинам нерівностей (звичайно більш-менш рівномірно розподілених по площині), що виступають з оливного шару.

2. Якщо тертьові поверхні мають відхилення від заданої геометричної форми, в результаті чого граничне мащення зосереджене на порівняно великих виступаючих ділянках поверхні. Ці ділянки сприймають основне навантаження і внаслідок цього вони пружно деформовані та термічно напружені. В той же час на іншій частині поверхні може мати місто гідродинамічне мащення.

В обох випадках доля гідродинамічного мащення збільшується в результаті припрацювання, яке відбувається при ковзанні поверхонь.

4 ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

Проковзування – одне з джерел опору кочення. Якби колесо, що кочиться по основі, не здійснювало проковзування, то такий рух був би чистим коченням. При цьому шлях, який проходить будь-яка точка поверхні колеса по основі за один оберт, складав би $2\pi r$. Однак кочення без проковзування не буває. Колесо і основа зазнають пружних деформацій. При цьому колесо в зоні контакту стискується, а основа – розтягується (стрілки на рис. 4.1, а).

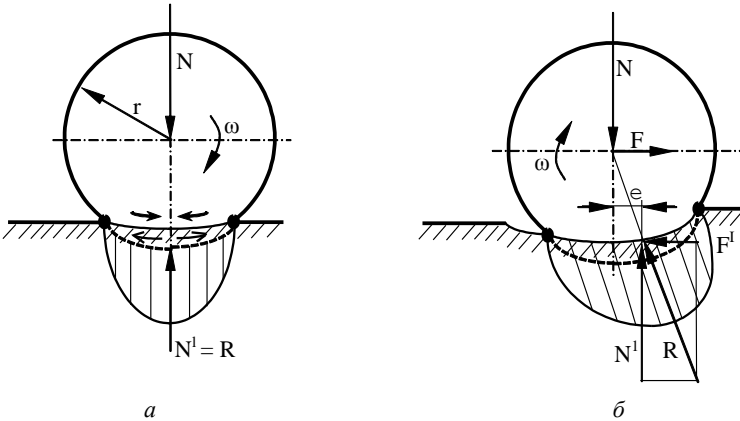


Рис. 4.1 Взаємодії колеса з опорою

Тому на контакті постійно відбувається проковзування колеса щодо основи. Це одне з джерел розсіювання енергії. Іншим джерелом є в'язкопружна поведінка матеріалів основи колеса. Якщо до осі колеса не прикладене стискальне зусилля, то дуга контакту симетрична (рис. 4.1, а) і реакція опори N' співвісна з нормальним навантаженням N . Якщо прикладається стискальне зусилля і колесо починає рухатися, то зона контакту спотворюється (рис. 4.1, б). Матеріал позаду колеса не встигає відновити форму. Епюра тисків зміщається убік руху. Більша частина дуги контакту виявляється у фронтальній частині. Реакція опори розподіляється по 2 складових: вертикальній ($\vec{N}' = -\vec{N}$) і горизонтальній (F'), яка являє собою опір перекочуванню.

Оскільки з умови рівноваги $Ne = Fr = M$, то коефіцієнт тертя кочення:

$$\mu_k = \frac{M}{N} = e, \quad (4.1)$$

де e – ексцентриситет – зсув центра опорної поверхні від вертикалі (рис. 4.1, б).

Поряд з цією характеристикою використовується коефіцієнт опору коченню, який дорівнює відношенню роботи на одиничному шляху до нормального навантаження. Робота при повороті на кут $d\varphi$ дорівнює $Md\varphi$, а пройдений шлях – $\Delta l = rd\varphi$. Тоді коефіцієнт опору:

$$K_c = Md\varphi / Nrd\varphi = e/r. \quad (4.2)$$

Цей вираз був отриманий Кулоном. Подальші дослідження показали, що ексцентриситет не є константою і $K_c \sim 1/r^n$, причому $n < 1$.

Далі було встановлено, що проковзування вносить незначний внесок у втрати енергії, а головне джерело втрат – в'язкопружні деформації колеса і опори. Розсіювання енергії пов'язане в основному з гістерезисом деформації.

4.1 Механіка контактної дії при терті коченні

Існує кілька гіпотез про механізм тертя кочення. Зокрема, опір коченню пояснюють адгезією контактуючих поверхонь, недосконалою пружністю реальних тіл (гістерезисними втратами), проковзуванням у зоні контакту, а також одночасним існуванням названих процесів.

Адгезійна теорія розглядає кочення як процес безперервного відновлення і руйнування містків зварювання, час існування яких навіть при середніх швидкостях складає порядку 10^{-6} с. При повороті тіла, що котиться, молекули поверхні спряжених тіл, розташовані перед контактною площадкою, зближаються настільки, що відбувається утворення адгезійних зв'язків. При цьому руйнуються адгезійні зв'язки на границі виходу тертьових тіл з контакту і піддаються значним деформаціям контактуючих нерівностей, розташованих поблизу цієї границі. Адгезійний зв'язок на інших ділянках контакту (у центрі контактної площадки і в зоні, що прилягає до її передньої границі) істотного впливу на процес кочення не здійснює. Отже, опір коченню обумовлений в основному опором деформуванню і руйнуванням тільки тієї частини містків зварювання, які розташовані в зоні виходу тертьових тіл з контакту. Такий процес послідовного руйнування адгезійних зв'язків обумовлює низьке значення сили тертя кочення.

При ковзанні тіла обертання сила тертя значно вища, ніж при коченні, оскільки практично всі адгезійні зв'язки на контактній площадці здійснюють одночасно спільномірний за величиною опір зрушенню. Очевидно, що кількість зруйнованих молекулярних зв'язків в одиницю часу, а отже, і енергія, затрачувана на подолання сили тертя при ковзанні значно вища, ніж при коченні.

При ковзанні повинні утворюватися більш міцні адгезійні зв'язки, оскільки можливий зріз оксидних і адсорбційних плівок на вершинах контактуючих нерівностей і вступ у контакт ювенільних ділянок поверхонь.

Гістерезисна теорія в своїй основі має явище недосконалої пружності матеріалів тіл кочення. Відповідно до цієї теорії, енергія, затрачувана на подолання опору коченню, витрачається на гістерезисні втрати при деформуванні спряжених тіл. Кожен елемент площини, по якій котиться циліндр, відчуває послідовно цикл "навантаження – розвантаження", що описується петлею гістерезису. Різниця між витраченою і повернутою енергією в цьому циклі дорівнює площі петлі гістерезису і може бути виражена у вигляді $\alpha_g W$, де W – робота з переміщення циліндра на одиницю шляху тертя. Тоді сила тертя кочення твердого циліндра за пружним півпростором описується формулою:

$$F_k = \frac{4\alpha_g}{3\pi} \frac{Nb}{lR}, \quad (4.2)$$

де α_g – коефіцієнт гістерезисних втрат;
 N – нормальне навантаження;
 b – напівширина площадки контакту;
 l – довжина циліндра;
 R – радіус циліндра.

Відзначимо, що напружений стан матеріалу основи при коченні по його поверхні циліндра істотно відрізняється від одноосового розтягування і α_g , обумовлений при одноосовому навантаженні, повинне відрізнитися від значення цього коефіцієнта при коченні.

Гістерезисна теорія задовільно пояснює причину опору коченню жорсткого тіла обертання по поверхні пластини з еластомеру. У значно меншій мірі вона застосовна для кочення металевих тіл. Експерименти з кочення одне по одному сферичних тіл з однойменних металів показали, що для пояснення їхнього опору коченню необхідно використовувати явно завищені значення коефіцієнта гістерезисних втрат. Так, для міді α_g повинна дорівнювати 0,32, для фосфатної бронзи – 0,14, для дюралюмінію – 0,6, в той час як у дійсності для зазначених металів цей показник знаходиться в межах 0,02...0,04. Таку розбіжність можна пояснити тим, що при навантаженні, яке перевищує межу пружності, після декількох проходів тіла кочення контакт зовні здається пружним. У напрямку, нормальному до поверхні тертя, пластична деформація металу відсутня, після проходження тіла кочення поверхня деформованого металу цілком відновлюється. Однак, у підповерхневому шарі спостерігається пластична плинність металу в напрямку, рівнобіжному вектору швидкості тіла кочення. Затрачувана при цьому енергія і є основною складовою енергії, необхідної для подолання опору коченню.

Теорія проковзування. Відповідно до цієї теорії, основною причиною опору коченню вважається проковзування. Воно може бути обумовлене деформацією контактуючих тіл або розходженням у швидкостях різних точок тіла, що котиться.

Проковзування за Рейнольдсом наочно спостерігається при коченні твердого циліндра по гумі. За один оборот циліндр проходить меншу відстань, ніж довжина його окружності. Це пояснюється деформацією контактуючих тіл. Так, під дією нормального навантаження матеріал основи деформується і контакт здійснюється не по лінії, а по смужці. При цьому матеріал циліндра в зоні контакту буде піддаватися деформації стискування, а основи – деформації розтягування. Тому при повороті циліндра вивільнювані від контакту точки його поверхні будуть прагнути віддалитися одна від одного, а точки поверхні основи – зблизитися. Це призводить до проковзування мікроділянок контактуючих поверхонь одного тіла щодо іншого. Існування проковзування при коченні підтверджено експериментом, у якому по гумовій основі перекочували сталевий циліндр, з діаметральним отвором з пофарбованими краями.

На гумі відбиток круглого отвору мав форму еліпса, орієнтованого малою віссю в напрямку кочення. При навантаженні, що забезпечує проникнення циліндра в гуму на величину близьку до його радіуса, мала вісь відбитку виявилася менше великої на 10%. Наявність чітко позначеної границі відбитка свідчить про знехтуваний малий внесок проковзування в опір коченню. Цей висновок підтверджується також результатами теоретичних досліджень, у яких показано, що внесок прослизання за Рейнольдсом в опір коченню стає відчутним тільки при високих навантаженнях.

Проковзування за Пальмгрену – Хізкоуту або диференціальне проковзування спостерігається на прикладі кулі, що котиться по прямолінійному жолобу (рис. 4.2). За один оберт кулі точка A повинна проходити більшу відстань, ніж точка B . У той же час шлях L , пройдений центром кулі за один оберт, відповідає якомусь середньому значенню, тобто $2\pi r < L < 2\pi R$. Ця різниця і обумовлює проковзування поверхонь тертя. Встановлено, що чисте кочення спостерігається для двох перетинів кулі, що знаходяться на відстані $0,176$ від центра зони контакту (b – напівширина контактної площадки). У центральній частині контакту сила проковзування F_1 спрямована протилежно вектору швидкості переміщення центра кулі, а на периферійних ділянках F_2 співпадає з V .

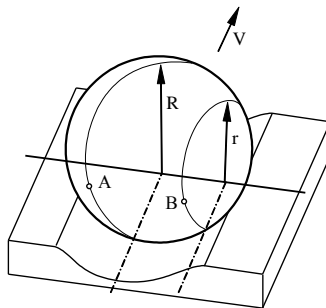


Рис. 4.2 Диференційне проковзування при коченні кулі по жолобу

На основі аналізу моменту цих сил щодо точки, у якій проковзування відсутнє, формула для розрахунку сили тертя F , обумовленої проковзуванням:

$$F = \frac{f_n N}{12} \left(\frac{b}{R} \right)^2, \quad (4.3)$$

де f_n – коефіцієнт тертя, обумовлений проковзуванням;

R – радіус кулі;

b – напівширина контактної площадки.

Сучасні уявлення про природу тертя кочення. Зміни коефіцієнта тертя кочення при зміні радіуса кривизни тіла, що котиться, показали, що отримані залежності не можуть бути пояснені ні однією з вищеописаних теорій.

Теорія проковзування дає занижені величини опору коченню. Крім того, відповідно до цієї теорії, два циліндри однакових розмірів, виконані з одного матеріалу, при коченні один по одному не повинні відчувати опору коченню, що не відповідає дійсності.

Відповідно до молекулярної (адгезійної) теорії сила тертя кочення твердого тіла F_K повинна збільшуватися зі зростанням радіуса кривизни тіла, що котиться, тому що росте фактична площа контакту. Однак при коченні реальних тіл можлива зворотна залежність.

Гістерезисна теорія приводить до висновку, що опір коченню повинен наближатися до нуля при великих радіусах кривизни, що суперечить молекулярній теорії. Згідно з експериментальними даними залежність $F_K(R)$ має мінімум. Отже, кожна з названих теорій описує окремий випадок досить складного процесу, що протікає в зоні контакту тіл кочення.

Відповідно до сучасних уявлень опір коченню твердого тіла по пружній основі обумовлений трьома причинами: адгезією, гістерезисними втратами і проковзуванням у зоні контакту. Опір, обумовлений адгезійною взаємодією, локалізується переважно поблизу задньої границі контактної площадки. Тут поверхні тертя тіл кочення будуть розділятися з розривом адгезійних зв'язків. Гістерезисні втрати спостерігаються в основному на периферійних ділянках контакту, тобто в зонах максимальних деформацій зрушення і нормальних деформацій матеріалів контактуючих тіл у напрямку вектора швидкості. Проковзування має місце по всій контактній площадці.

Слід зазначити, що в реальних трібосистемах кочення реалізується, як правило, у присутності мастильного матеріалу, тому четвертою складовою F_K є механічні втрати в мастильному матеріалі. Ці втрати складаються з зусиль, затрачуваних на перемішування мастильного матеріалу, і утворення гідродинамічного мастильного клина.

Опір коченню залежить від умов навантаження, механічних властивостей тіл, що спряжуються, геометричних характеристик і параметрів шорсткості поверхонь тертя. Наведемо деякі з них.

Нормальне навантаження. При коченні кулі або циліндра по площині збільшення нормального навантаження викликає монотонне підвищення коефіцієнта опору коченню, причому залежність $f_c(N)$ близька до лінійної. Це обумовлено одночасним ростом усіх складових опору коченню: адгезійної, тому що збільшується площа фактичного контакту і кількість адгезійних зв'язків; проковзування внаслідок росту деформацій поверхневих шарів тіл, що спряжуються; гістерезисних втрат, пов'язаних з підвищенням частки пластичної деформації матеріалів третьових тіл. Описаний вид залежності $f_c(N)$ експериментально підтверджений для кочення металу по металу і гумі.

Мащення. Чисельне значення коефіцієнта опору коченню значною мірою визначається наявністю в зоні контакту оксидних або мастильних плівок, що розділяють поверхні, які спряжуються. При густому мащенні f_c приймає за інших однакових умов набуває менші значення, ніж при збідненій подачі мастильних речовин у зону тертя. Хімічне очищення поверхні сприяє підвищенню адгезійної складової, що є причиною більш високого опору коченню. Сказане стосується високих нормальних навантажень. При малих значеннях N застосування мастильного матеріалу викликає зниження опору коченню орієнтовно на 10%. Такий ледь помітний вплив мастильних речовин обумовлений тим, що зниження витрат на проковзування і адгезію на контактні компенсується витратами на подолання внутрішнього тертя в шарі мастильного матеріалу.

Розміри тіла кочення. Залежність коефіцієнта опору коченню від радіуса R тіла графічно зображується кривою з мінімумом (рис. 4.3). Зі збільшенням радіусу тіла R в зоні малих його значень опір коченню стає нижчим. Це пояснюється інтенсивним зниженням гістерезисних втрат, котрі відіграють визначну роль при малих радіусах, що забезпечують при постійному навантаженні великі контактні тиски. Зі збільшенням радіуса тіла кочення в зоні великих значень R недосконалість пружних властивостей матеріалів третьових тіл менш відчутна. Переважним стає вплив адгезійної складової, яка росте зі збільшенням радіуса, тому що збільшується площа контакту і кількість адгезійних зв'язків.

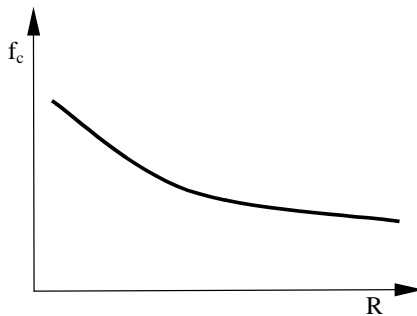


Рис. 4.3 Залежність коефіцієнта опору коченню від радіуса тіла, що котиться

4.2 Класифікація підшипників кочення

Підшипники кочення класифікуються за такими ознаками (табл. 4.1): за напрямком сприйманого навантаження щодо осі вала (радіальні, радіально-упорні, упорні); за формою тіл кочення (кулькові, роликові); за кількістю рядів тіл кочення (однорядні, дворядні, чотирирядні, багаторядні); за здатністю самовстановлюватися (самовстановлювальні і несамовстановлювальні).

Співвідношення габаритних розмірів підшипників визначає їх серію: надлегку, особливо легку, легку, легку широку, середню, середню широку і важку. Випускають переважно підшипники легкої та середньої серії.

Поряд зі стандартними виготовляють особливі конструкції, використання яких у кожному конкретному випадку вимагає спеціального обґрунтування.

Експлуатаційні характеристики, система умовних позначок, основні типорозміри, посадки, ущільнення, мащення, монтаж, догляд за підшипниками кочення суворо регламентовані стандартами і знаходяться в довідковій літературі.

Таблиця 4.1 -Класифікація підшипників кочення за ГОСТ 3395–89

Радіальні		Радіально-упорні		Упорні і упорно-радіальні	
Шарикові	Роликові	Шарикові	Роликові	Шарикові	Роликові
Однорядні: основної конструкції; зі стопорною канавкою на зовнішнім кільці; з упорним бортом; з фланцем на зовнішньому кільці; з захисними шайбами; з ущільненнями; сферичні. Дворядні сферичні.	З короткими циліндричними роликками: однорядні; Дворядні сферичні: основної конструкції; з захисними шайбами; з голчастими роликками: од-	Однорядні: основної конструкції; з різними кільцями з трьох-чотирихточковим контактом; здвоєні. Дворядні.	З конічними роликками: однорядні основної конструкції; з упорним бортом на зовнішньому кільці. З конічними роликками: дворядні; Чотирирядні.	Упорні: одинарні; подвійні. Упорно-радіальні з кутом контакту 60°.	Упорні: з циліндричними роликками; з конічними роликками. Упорно-радіальні сферичні.

При обертанні деталей підшипників кочення в місцях контактів завжди виникають тертя кочення і тертя ковзання. Кожна складова втрат на тертя залежить від умов експлуатації (частоти обертання, навантаження, температурного режиму і мащення) та конструктивного виконання, що визначає контактні взаємодії. Тому точний розрахунок складових можна виконати за умови накопичення достатнього експериментального матеріалу.

На основі експериментальних даних для наближених розрахунків можна прийняти такі середні величини приведенного коефіцієнта тертя для підшипників, що експлуатуються при нормальних режимах роботи і пластичному

мастильному матеріалі:

Шарикопідшипники:

- радіальні однорядні – 0,002;
- сферичні дворядні – 0,0015;
- радіально-упорні – 0,003;
- упорні – 0,003.

Роликотидшипники:

- с короткими циліндричними роликами – 0,002;
- з довгими циліндричними роликами – 0,004;
- дворядні сферичні з бочкоподібними роликами – 0,004;
- голчасті – 0,008;
- конічні – 0,008.

Слід зазначити, що тертя, викликане наявністю контактів ковзання ущільнень, може перевищити величину тертя в самому підшипнику без ущільнень при однакових умовах експлуатації.

4.3 Механізм зношування підшипників кочення

Ознаками відмов підшипника, що перешкоджають його подальшій експлуатації, є підвищена вібрація, шум, неприпустиме збільшення зазорів, підвищене нагрівання деталей, неприпустимо високий момент тертя (як окремий випадок – заклинювання). Причини виникнення цих явищ – процеси, що протікають при експлуатації підшипника.

Контактна втома деталей являє собою розвиток мікродфектів у зонах найбільших контактних напруг, що відбувається внаслідок їхнього циклічного характеру. При напругах, що не перевищують умовної границі текучості, поступовий ріст мікродфектів призводить до їхніх переміщень, злиття і утворення на кінцевому етапі макродфектів у вигляді тріщин, викришування контактних поверхонь тощо. У випадках коли напруга перевищує умовну границю текучості, цей процес супроводжується утворенням зон пластичних деформацій і в ряді випадків їх зростанням.

Знос контактуючих деталей, що призводить до зміни їх розмірів і форми. У підшипниках кочення зустрічаються різні види зношування: утомне, механохімічне, абразивне, адгезійне та ін. Знос призводить до зміни напруженого стану і деформування в підшипнику, підвищує частку динамічних складових навантаження, вібрацію, шум, стимулює контактну утому, термонапруженість.

Втрата працездатності мастильного матеріалу. У підшипниках з одноразовою закладкою пластичного мастильного матеріалу в процесі роботи відбувається поступове погіршення мастильних властивостей. У мастильному матеріалі під час експлуатації підшипникового вузла відбуваються складні фізико-хімічні процеси (трібохімічні перетворення, терморозпад, випаровування оливи, насичення продуктами зносу тощо). Накопичуються продукти зносу в робочому об'ємі мастильного матеріалу і спрацьовується дисперсійне середовище (активна складового мастильного матеріалу), відбуваю-

ється згущення, зміна хімічного складу, коксування. Особливо активно цей процес протікає при підвищених температурах експлуатації.

Знос і руйнування сепаратора. У багатьох випадках ці явища викликані порушенням кінематики роботи вузла, що є наслідком перерахованих факторів.

Знос ущільнень є наслідком тертя елементів, що ущільнюють, об поверхні елементів трібосистем. Він призводить до витoku мастильного матеріалу, потрапляння в зони контакту вологи і абразивних часток.

Пластичне деформування і крижке руйнування деталей. Гранична швидкохідність підшипників залежить від діючого навантаження, конструкції, матеріалу сепаратора, сорту і способу мащення, умов охолодження і інших факторів. При високих частотах обертання підшипники кочення виходять з ладу звичайно в результаті розриву сепаратора, підвищеного зносу робочих тіл, теплового заклинювання. Для приблизного оцінювання припустимої межі частоти обертання застосовується фактор $d_m n$:

$$d_m = \frac{D+d}{2}, \quad (4.4)$$

де d_m – середній діаметр;

D – зовнішній діаметр підшипника, мм;

d – діаметр отвору, мм;

n – максимальна для даного підшипника робоча частота обертання, об/хв.

Величина фактора $d_m n$ наближається до $3,5 \cdot 10^6$. Швидкісний фактор знижується в кілька разів при переході від надлегкої до важкої серії. Для високошвидкісних підшипників замість штампованих тонких сепараторів використовують масивні сепаратори з бронзи, латуні, пластмаси, текстоліта, композиційних матеріалів. При високих швидкостях використовують підшипники підвищеної точності, циркуляційну систему мащення, методи, що поліпшують теплообмін підшипникового вузла. При підвищенні гарантії ресурсу підшипників з 90% до більш високої (99%) використовують підшипники підвищеного класу точності, сталі електрошлакового переплаву і вакуумної виплавки, раціональну систему і оптимальний сорт мастильного матеріалу, строго регламентовані режими навантаження та частота обертання.

Оцінювання довговічності підшипника кочення за критерієм контактної втоми. Розрахунок підшипника здійснюють звичайно за критерієм контактної втоми. Для цього використовують емпіричний вираз, який апроксимує результати стендових випробувань:

$$T_\gamma = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P_e} \right)^m \frac{60 \cdot 10^6}{n}, \quad (4.5)$$

де a_1 – коефіцієнт, що змінюється в залежності від зміни γ (при $\gamma = 90\%$ $a_1 = 1$);

a_2 і a_3 – коефіцієнти, що враховують матеріал, мастила і стан поверхонь тіл кочення відповідно;

C – динамічна вантажопідйомність підшипника – постійне радіальне навантаження, яке підшипник кочення може відчувати при базовій довговічності, яка складає 1 млн. обертів;

P_e – еквівалентне навантаження на підшипник;

m – емпірична стала ($m = 3$ для кулькових підшипників, $m = 10/3$ для роликових підшипників).

Оцінювання довговічності підшипника кочення за критерієм зносу. Математична модель процесу зношування підшипників кочення з припущенням про те, що знос пропорційний питомій роботі сил тертя ковзання, розроблена для випадку стирання тіл підшипника у водному середовищі. Розглядається диференціальне проковзування при перекочуванні кульки по жолобу. Профіль жолоба після зносу складався з трьох западин: однієї у центрі контакту і двох – ближче до кінців великої осі еліпса контакту. Утомне пошкодження на внутрішніх кільцях розташовувалося тільки по двох кільцевих зонах, симетричних осі жолоба, знос же металу відбувався по всій іншій площадці контакту.

Опори кочення часто експлуатуються в хімічно активних малов'язких робочих середовищах – у воді, газі, криогенних рідинах тощо. Внаслідок малої в'язкості і поганої змочувальної здатності зазначені рідини при роботі підшипників витісняються з зони контакту тіл кочення з кільцями. Експериментальні дослідження шарикопідшипників, виготовлених з нержавіючої сталі, після випробувань у воді і в середовищі рідкого кисню показали, що при роботі в таких умовах характерні процеси зношування, які мають механохімічну і корозійну природу. Існування при терті одночасно механічних ефектів, теплофізичних, хімічних і деяких інших дозволило розглядати сукупність тіл підшипника і мастильно-охолоджувальну малов'язку рідину як термодинамічну систему.

Розрахунок може базуватися на використанні фізично інформативних критеріальних залежностей. Наприклад, у випадку механічного руйнування поверхонь (без урахування сорбційних, теплових процесів і хімічного модифікування) вираз для інтенсивності зношування має такий вигляд:

$$I_h = k\Phi_a^m\Phi_{cm}^n\Phi_y^p\Phi_{ш}^q, \quad (4.6)$$

де Φ_a , Φ_{cm} , Φ_y , $\Phi_{ш}$ – безрозмірні комплекси, що враховують відповідно напружений стан контакту, відносну товщину мастильного шару, утомну міцність до контактуючих поверхонь та їхню шорсткість;

k , m , n , p і q – емпіричні параметри, визначені експериментально.

4.4 Особливості взаємодії колеса з покриттям

Пневматичні шини з погляду трібології є надзвичайно змістовним бага-

тогранним об'єктом.

При роботі шини в режимі кочення і ковзання реалізуються закономірності тертя еластомерів. Як технічний об'єкт шини виконують шість основних функцій:

- функцію кочення з малим опором;
- функцію зниження контактних навантажень у зоні контакту з дорожнім полотном;
- функцію демпфера, захисту транспортних засобів від поштовхів, зниження рівня шуму;
- передає крутний момент як джерело руху транспортного засобу;
- забезпечує гальмування;
- комплект шин створює поперечну стійкість і стійкість у напрямку руху.

Щоб ефективно виконати ці функції, шина повинна являти собою складну конструкцію.

Схема контакту між твердою шорсткуватою поверхнею й еластичною шиною зображена на рис. 4.4.

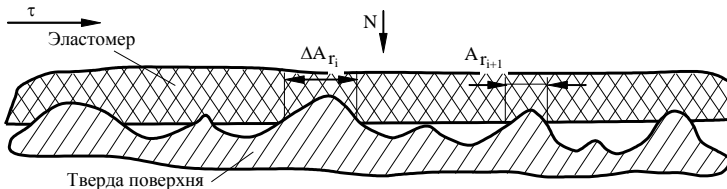


Рис. 4.4 Схема утворення сили тертя в контакті еластомеру з твердою шорсткою поверхнею

Якщо на схемі, рис. 4.4, до еластомеру послідовно прикласти нормальне і дотичне навантаження, то на ділянках дотику ΔA_{r_i} виникнуть пружні нормальні реакції W :

$$W = \sum_{i=1}^M \Delta A_i \cdot P_{r_i} , \quad (4.7)$$

де P_{r_i} – тиск на площадці фактичного контакту;

M – кількість ділянок дотику.

Прикладення тангенціальної сили τ викликає опір адгезійних сил:

$$T = \sum_{i=1}^M T_{r_i} , \quad (4.8)$$

де T_{r_i} – адгезійні сили на кожній плямі контакту; $T_{r_i} = \tau \Delta A_{r_i}$ (τ – питома адгезійна сила тертя).

Після початку руху крім адгезійного опору руху починається ще і дефор-

маційний опір, оскільки відновлення деформації еластомеру запізнюється (в'язкопружність). Цю складову ще називають гістерезисною складовою тертя.

Таким чином, сумарна сила тертя еластомеру:

$$T = T_{адгез} + T_{гістер} \quad (4.9)$$

де $T_{адгез}$ – адгезійна складова;

$T_{гістер}$ – гістерезисна складова.

З урахуванням зазначеного формують рисунок протектора. Головне призначення рисунка протектора забезпечити відведення води з плями дотику шини з дорогою, хоча це неминуче зменшує площу контакту і знижує ефективне значення коефіцієнта тертя ($\sim 0,5...0,4$).

Найбільш поширені 3 види протектора, показані на рис. 4.5.

Характерні розміри каналів і жолобків наведені на рис. 4.6

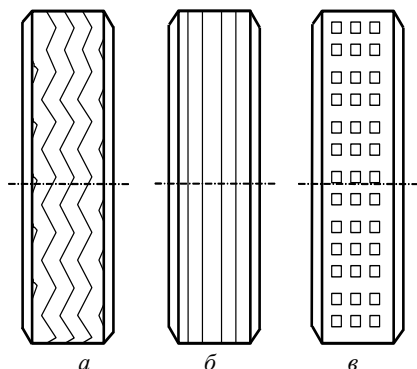


Рис. 4.5 Три основних типи рисунка протектора: *a* – зигзагоподібний; *б* – ребристий; *в* – блоковий

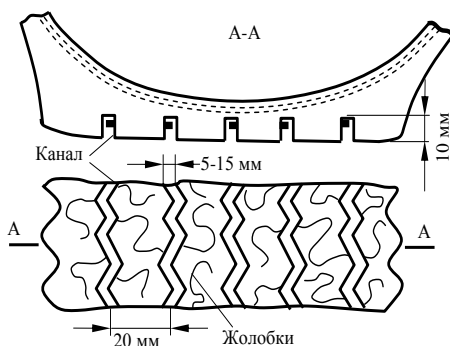


Рис. 4.6 Канали і жолобки в типовому зигзагоподібному рисунку протектора

Зона зчеплення шини з поверхнею, форма плями контакту, розподіл тиску по плямі контакту показані на рис. 4.7. Як видно з рисунка, при гальмуванні або розгоні в передній частині плями контакту проковзування відсутнє, але виникає ковзання в його задній частині. Ця обставина визначає нестійкість сил гальмування або розгону. Вони, у цілому, міняються в залежності від режиму вільного кочення до режиму ковзання заблокованого колеса або роботи колеса в режимі тягового ковзання.

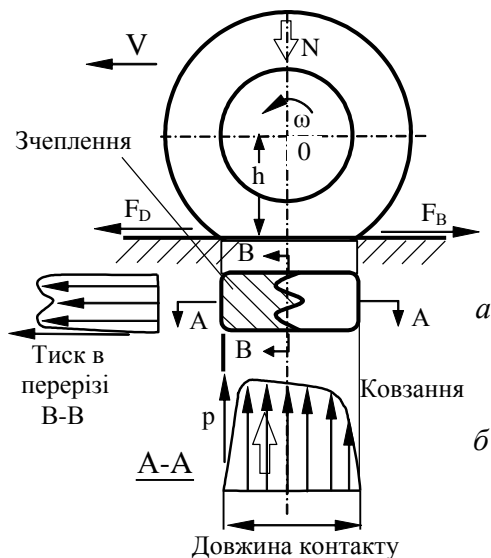


Рис. 4.7 Пляма дотику і розподілу тиску при коченні шини:
a – пляма дотику; *б* – розподіл тиску у вертикальній площині (перетин А-А)

Загальна характеристика гальмової сили і відносної сили тяги при постійній швидкості руху екіпажа наведені на рис. 4.8.

Обидві криві на рис. 4.8 мають екстремальні значення, що є оптимальним режимом роботи шини.

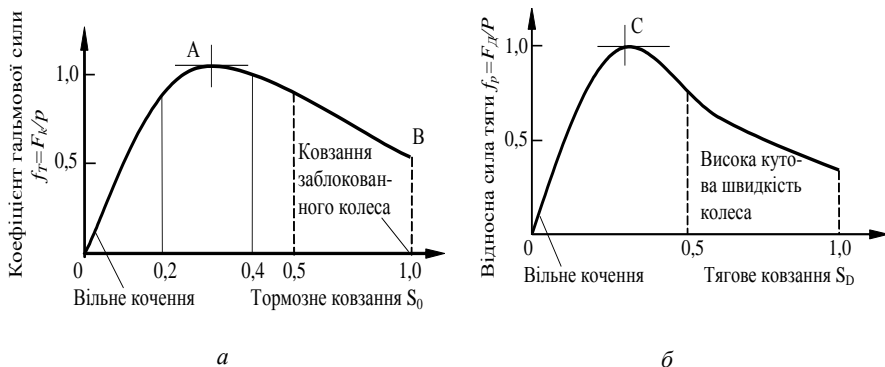


Рис. 4.8 Характеристики гальмової сили і відносної сили тяги при коченні:
a – гальмування; *б* – розгін

4.5 Механізм зношування протектора шини об покриття

Аналітично силу гальмування F_T і силу розгону F_P за Д. Муром (Англія) визначають з таких співвідношень:

$$F_T = \frac{M_T}{h} + N \frac{a}{h} \left[1 + 4 \frac{\ddot{x}}{q} \left(\frac{h_\infty}{L} \right) \right];$$

$$F_P = \frac{M_P}{h} + N \frac{a}{h} \left[1 + 4 \frac{\ddot{x}}{q} \left(\frac{h_\infty}{L} \right) \right], \quad (4.10)$$

де M_T і M_P – моменти гальмування або розгону; h_c – висота центра ваги транспортного засобу над рівнем дорожнього полотна; L – колісна база; N – навантаження в розрахунку на одне колесо, прикладене посередині між передніми і задніми колесами; a – ексцентриситет опорної реакції при коченні; h – відстань від осі шини до поверхні.

Однак рівняння 4.10 дає "ідеальні" розрахункові результати, що підлягають корекції у випадку наявності вологи на поверхні дороги.

Якісну картину роботи колеса в ускладнених умовах ілюструє рис. 4.9.

Перед шиною, що набігає, утвориться заповнений водою клин (рис. 4.9а), яка створить гідродинамічну силу P_n . У зоні AB протектор видавлює вологу, а потім усе більш облягає рельєф дорожнього полотна і досягає зчеплення в зоні CD .

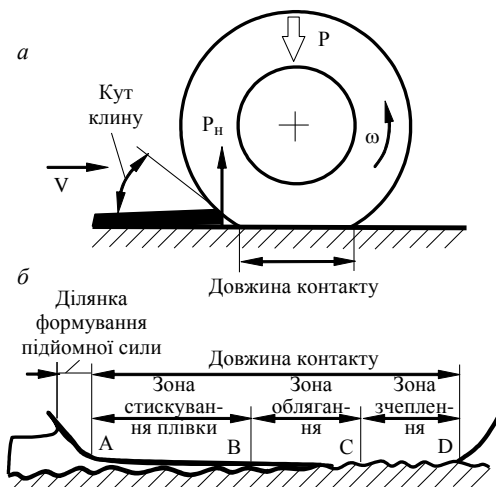


Рис. 4.9 Три зони на довжині контакту при коченні по мокрій дорозі:
а – загальна конфігурація; б – зони в ділянці контакту

Реалізація зчеплення залежить від швидкості, збільшення якої може цілком виключити зчеплення і викликати режим гідропланування (глісирування). Якщо при цьому швидкість обертання колеса буде зростати, то настає ще один якісний режим, називаний динамічним гідроплануванням.

Зношування шин як представника еластомерів має три основні механізми:

- абразивний знос, при якому гострі грані нерівностей дряпають і виривають частки матеріалу протектора;
- утомний знос, при якому спостерігається крихкість і руйнування матеріалу протектора через утому;
- утворення роликподібних часток (окатишів) та їх відривання від поверхонь протектора.

Співвідношення зазначених видів зносу наведено на рис. 4.10.

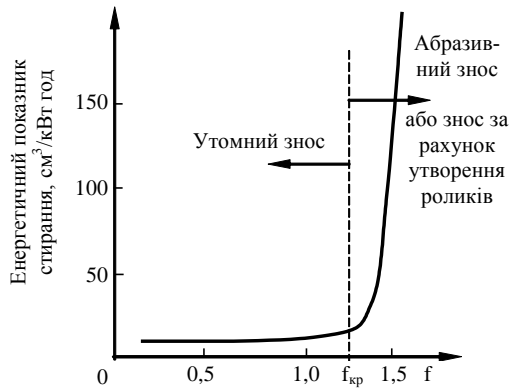


Рис. 4.10 Знос протектора і коефіцієнт тертя для різних гум

Вважається, що стирання виникає внаслідок проковзування в задній частині плями контакту, але, як показує досвід, шини поворотної дії зношуються більше, ніж на задніх мостах, де реалізуються режими розгону і гальмування. Таким чином "поперечні" проковзування мають більш шкідливу дію.

З метою забезпечення безпеки руху і ресурсозбереження розвиваються засоби підвищення якості бутадієн-стирольного каучуку, методи підвищення міцності і довговічності металевого і тихорецького корду і, особливо, методи створення оптимального рельєфу протекторів.

Іншим напрямком є удосконалення системи коліс, гальмових пристроїв, підвищення носистійкості гальмових дисків, застосування протизаносних пристроїв тощо.

5 КОНСТРУКТИВНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРІБОСИСТЕМ

5.1 Кінематичні схеми контакту трібосистем

До конструкторських засобів підвищення зносостійкості можна віднести: оптимальний вибір кінематичної схеми спряження; масштабний фактор трібосистем, тобто оптимальне співвідношення площ тертя й об'ємів тертя; вибір сумісних матеріалів; розташування їх по твердості для рухомих і нерухомих деталей.

Це далеко не повний перелік конструкторських засобів підвищення зносостійкості трібосистем машин на етапі їхнього проектування, однак найбільш ефективний.

Можливі кінематичні схеми контакту трібосистем наведені на рис. 5.1. Розподіл спряжень за такою класифікацією широко використовується в теорії машин, механізмів і деталей машин. Така класифікація важлива також для досліджень тріботехнічних характеристик, оскільки від схеми сполучення деталей залежить питомий тиск у місцях дотику матеріалів і частота їх контакту між собою при обертанні, яка визначається коефіцієнтом взаємного перекриття.

З приведених схем конструктивного оформлення трібосистем на рис. 5.1 в лабораторних випробуваннях на серійних машинах тертя частіше за все використовують чотири нижчі (рис. 5.2, а,б,в,г) і три вищі (рис. 5.2, д,е,ж) схеми.

Поділ на вищі і нижчі схеми контакту трібосистеми залежать від відношення площини тертя рухомого і нерухомого трібоелементів, яке зветься коефіцієнтом взаємного перекриття ($K_{вз}$). Фізичний зміст цього коефіцієнту зрозумілий з рис 5.3 і визначення його за формулою:

$$K_{вз} = A_{a1} / A_{a2} , \quad (5.1)$$

де A_{a1} , A_{a2} – номінальні площі тертя відповідно нерухомого і рухомого елементів трібосистем.

Необхідно відзначити, що при розрахунку $K_{вз}$ у чисельник варто підставляти меншу площу тертя одного з елементів, незалежно від того, рухомий це елемент трібосистеми або нерухомий. Звідси випливає, що для нижчих кінематичних трібосистем $K_{вз}$ наближається до одиниці ($K_{вз} \rightarrow 1$), а для вищих кінематичних трібосистем – наближається до нуля ($K_{вз} \rightarrow 0$).

Важливість урахування $K_{вз}$ обумовлена тим, що зміна цього коефіцієнта призводить до зміни часу контактування між собою тертьових поверхонь і з активними компонентами середовища, що у свою чергу призводить до зміни швидкості і глибини фізико-хімічних процесів, що протікають. Крім цього, при постійному нормальному навантаженні в трібосистемі при зменшенні $K_{вз}$ спостерігається підвищення питомого навантаження, оскільки йде зменшення площі, що сприймає це навантаження і навпаки. Це необхідно враховувати при виборі матеріалів для трібосистеми.

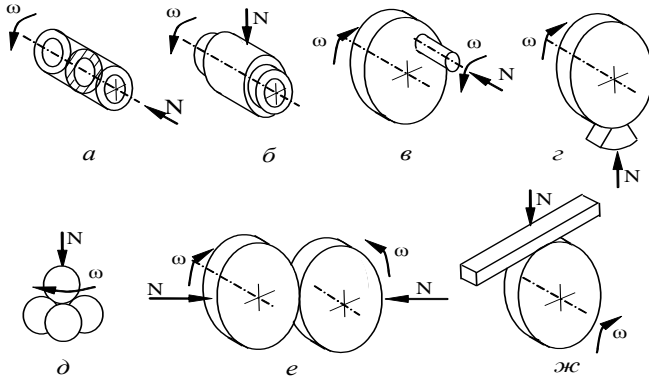


Рис. 5.2 Кінематичні схеми спряжень для лабораторних випробувань на с-рійних машинах тертя:

a, б, в, г – нижчі пари; *д, e, жс* – вищі пари

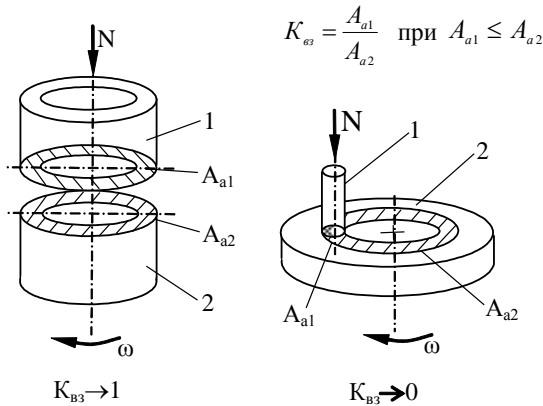


Рис. 5.3 Коефіцієнт взаємного перекриття і його визначення:

1 – нерухомий елемент; 2 – рухомий елемент

Крім того K_{B3} впливає на процес відведення теплоти. Наприклад, при терті пальця по диску (рис. 5.3), коли коефіцієнт взаємного перекриття дуже малий, велика частина теплоти, що виділяється при терті, поглинається диском і передається з його поверхні атмосфері або мастильному матеріалу. Температура всього диска при цьому змінюється мало, а температура пальця може бути значною. При терті кільцеподібних зразків, коли K_{B3} наближається до одиниці, уся теплота, що виділяється при терті, спрямовується всередину матеріалу, а потім уже від бічних стінок у навколишнє середовище (рис. 5.3). У цьому випадку робоча температура обох зразків буде вища при тих самих умовах роботи порівняно з першим випадком. Слід зауважити, що два цих

граничних випадки, коли $K_{\text{вз}} \rightarrow 1$ та $K_{\text{вз}} \rightarrow 0$, повинні розглядатися при проектуванні, у дослідженнях зношування і особливо для оцінювання нових матеріалів для трібосистем машин і механізмів.

Розглянемо питання впливу $K_{\text{вз}}$ на такі тріботехнічні характеристики, як інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя. На прикладі трібосистеми в якості матеріалу нерухомого елемента застосовувалася сталь 20Х (HRC 30), а для рухомого елемента бронза – Бр.АЖ 9-4 (НВ 95), мастильного матеріалу – гідравлічна рідина ВНИИ НП-403. Ці матеріали найбільше застосовуються в гідромашинах.

Результати дослідження основних тріботехнічних характеристик подані на рис. 5.4.

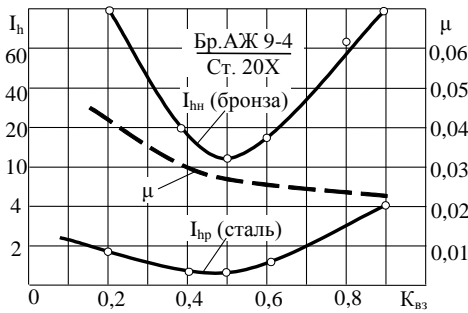


Рис. 5.4 Залежність інтенсивності зношування рухомого I_{hp} і нерухомого I_{hn} елементів і коефіцієнта тертя μ від коефіцієнта взаємного перекриття $K_{\text{вз}}$ для матеріалів ст. 20X + Бр.АЖ 9-4

З аналізу залежностей випливає, що коефіцієнт взаємного перекриття має явно виражений оптимум. При $K_{\text{вз}} = 0,5$ лінійна інтенсивність зношування нерухомого і рухомого елементів мінімальна. При збільшенні $K_{\text{вз}}$ або зменшенні від 0,5 інтенсивність зношування різко зростає, особливо для нерухомого м'якого зразка.

Збільшення сумарної інтенсивності зношування при збільшенні $K_{\text{вз}}$ пояснюється зменшенням часу контактування робочої поверхні рухомого зразка з робочим середовищем, активними компонентами робочого середовища і збільшенням часу контактування матеріалів між собою. Для збільшення $K_{\text{вз}}$ характерне зниження коефіцієнта тертя і збільшення часу припрацювання. Збільшення I_{hs} відбувається в основному за рахунок зносу нерухомого – м'якого зразка.

При зменшенні $K_{\text{вз}}$ від 0,5 також спостерігається зростання інтенсивності зношування за рахунок нерухомого м'якого зразка.

Порівняно мала робоча площа нерухомого елемента дуже швидко наклепується, набуваючи високої мікротвердості при малій глибині наклепаного шару. Очевидно, подальше збільшення інтенсивності зношування йде за рахунок

перенаклепу. Для зменшення $K_{\text{вз}}$ характерне збільшення коефіцієнта тертя і зменшення часу припрацювання трібосистеми.

Експериментальним шляхом була також отримана залежність зміни інтенсивності зношування від $K_{\text{вз}}$ для однойменних матеріалів сталь 20X (HRC 30) по сталі 20X (HRC 30), за тих самих умов експерименту, що наведені на рис. 5.5. У цьому випадку точка $K_{\text{вз}} = 0,5$ є точкою вирівнювання інтенсивностей зношування рухомого і нерухомого елементів. Характерним для цієї трібосистеми є те, що в зоні $K_{\text{вз}} = 0,5 \dots 0,9$ трібосистеми дуже довго припрацьовуються і схильні до задирання при коливаннях навантаження. При $K_{\text{вз}} < 0,2$ час припрацювання зменшується, трібосистема працює стійко, однак спостерігається підвищення коефіцієнта тертя. Отримані результати можуть бути використані для конкретних рекомендацій конструктору на етапі проектування при виборі робочих площ тертя трібосистем. Отже:

1. При виборі співвідношення площ тертя необхідно прагнути до $K_{\text{вз}} = 0,5$, тобто до нижчої кінематичної пари, де контакт здійснюється по площі. У цьому випадку спряження матеріалів повинне бути "твердий – м'який", що забезпечить швидке припрацювання і стійкість у роботі.

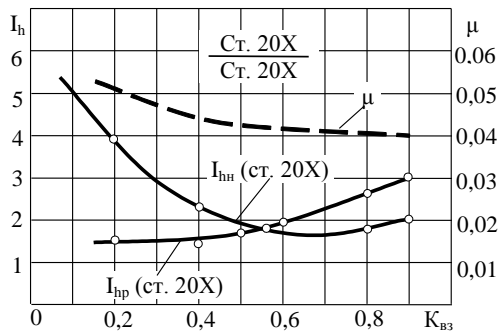


Рис. 5.5 Залежність інтенсивності зношування рухомого $I_{\text{рп}}$ і нерухомого $I_{\text{нн}}$ елементів і коефіцієнта тертя μ від коефіцієнта взаємного перекриття $K_{\text{вз}}$ для матеріалів ст. 20X+ст. 20X

Спряження матеріалів "твердий – твердий" застосовується лише для вищих кінематичних трібосистем (контакт по лінії або точці), що також забезпечує швидке припрацювання і стійкість у роботі.

Цей висновок можна проілюструвати спряженням рис. 5.4 і 5.5, що відбито на рис. 5.6. При $K_{\text{вз}} < 0,2$ вигреш у ресурсі буде мати трібосистема "сталь 20X по сталі 20X", однак при цьому значно зростає коефіцієнт тертя. Нижчі кінематичні трібосистеми (торцеве тертя або тертя по площі) і вищі кінематичні трібосистеми (тертя по лінії або в точці) дають різний ефект в умовах утворення і руйнування плівок мащення, що призводить до зміни зносу на кілька порядків.

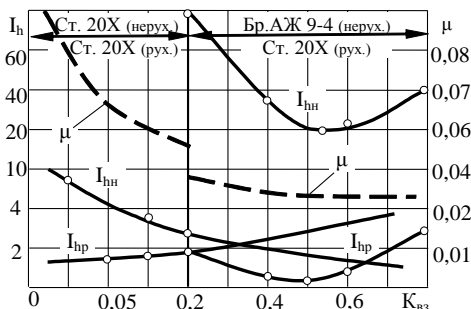


Рис. 5.6 Залежність інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя від коефіцієнта взаємного перекриття для різного спряження матеріалів

2. В основу вибору кінематичної схеми спряження переважно закладають тип переданого руху, тобто конструктивну схему усього виробу. І все-таки при проектуванні трібосистем необхідно прагнути до нижчих кінематичних трібосистем з односпрямованим переміщенням.

В односпрямованому і знакозмінному рухах різко відрізняються характери руйнування поверхонь тертя. Так, зворотно-поступальний рух призводить до значного зносу (наприклад, у результаті фретинг-корозії при малих амплітудах переміщення або в результаті утомного зносу, при великих амплітудах переміщення). Порядок зростання зносу при знакозмінних рухах щодо односпрямованого не встановлений.

5.2 Прямі і зворотні трібосистеми

З аналізу безлічі існуючих конструкцій трібосистем, застосовуваних у машинобудуванні, можна виділити чотири умови існування таких конструкцій.

Перша умова – це широко розповсюджена конструкція трібосистем, рухомий елемент якої має високу твердість і велику площу тертя, а нерухомий – меншу твердість і меншу площу тертя, тобто:

$$H_p > H_n, A_{ap} > A_{an}, \quad (5.2)$$

де H_p, H_n – твердості рухомого і нерухомого елементів;
 A_p, A_n – площі тертя рухомого і нерухомого елементів відповідно.

Через масовість застосування такого сполучення матеріалів і площ тертя, назовемо таку трібосистему прямою.

В основу визначення понять прямої і зворотної трібосистем було покладене функціональне призначення елементів. Необхідно розрізняти елемент, через який потужність підводиться до трібосистеми, і елемент, через який вона перетворюється в роботу.

В усіх трібосистемах потужність підводиться через рухомий елемент, з'єднаний із приводом, а перетворюється в роботу на нерухомому елементі. Якщо рухомий елемент трібосистеми буде мати високу твердість і велику робочу площу тертя, то це забезпечить гарні умови передачі через нього потужності або крутного моменту, а також можливість тривалого контакту робочої поверхні тертя із середовищем, що поліпшить умови роботи цього елемента. Отже, нерухомий елемент повинен мати меншу твердість і меншу робочу площу тертя, що забезпечить його швидке припрацювання до рухомого елемента. Трібосистема, яка відповідає названим умовам, називається прямою трібосистемою. Широко розповсюджений приклад такої трібосистеми – обертовий сталевий вал у sprzęженні з нерухогим антифрикційним вкладишем або підшипником (рис. 5.7).

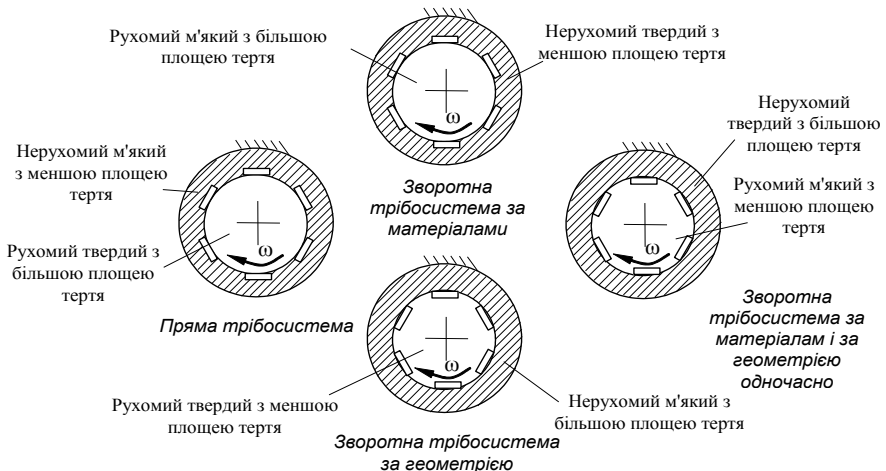


Рис. 5.7 Схеми прямих і зворотних трібосистем для sprzęження "вал – підшипник"

Друга умова – це трібосистема, яка має змінене співвідношення твердостей матеріалів, а співвідношення площ тертя залишається колишнім, як і у прямій трібосистемі:

$$H_p < H_n, A_{ap} > A_{an}, \quad (5.3)$$

тобто рухомий елемент трібосистеми має меншу твердість і більшу площу тертя, а нерухомий – твердіший і з меншою площею тертя. Оскільки у такій трібосистемі змінене тільки взаємне розташування матеріалів, назвемо її зворотною трібосистемою за матеріалами. Приклад такої трібосистеми показаний на рис. 5.7.

Третя умова – це трібосистема, у якої змінене співвідношення площ тертя, а співвідношення твердостей матеріалів залишається колишнім порівняно з прямою трібосистемою:

$$H_p > H_n, A_{ap} < A_{an}. \quad (5.4)$$

Оскільки в цієї пари змінене лише взаємне розташування площ тертя, назовемо таку трібосистему зворотною трібосистемою за геометрією.

Четверта умова – це трібосистема, у якої змінено стосовно прямої трібосистеми співвідношення твердостей матеріалів і співвідношення площ тертя:

$$H_p < H_n, A_{ap} < A_{an} \quad (5.5)$$

Оскільки в цієї трібосистеми змінене взаємне розташування матеріалів і площ тертя стосовно прямої трібосистеми, назовемо таку трібосистему зворотною трібосистемою за матеріалами і за геометрією одночасно.

Усі перераховані умови існування трібосистеми досить часто зустрічаються в реальних конструкціях машин та механізмів.

Зносостійкість прямих та зворотних трібосистем. Схеми конструктивного оформлення прямих і зворотних трібосистем за схемою "кільце – кільце" з коефіцієнтом взаємного перекриття 0,2, для лабораторних випробувань показані на рис. 5.8.

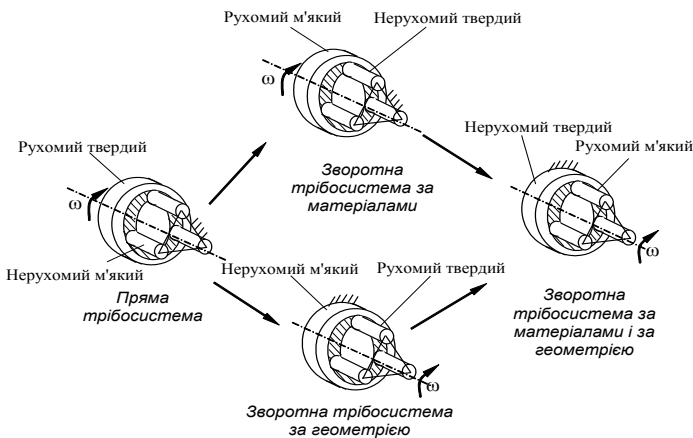


Рис. 5.8 Схеми прямих і зворотних трібосистем для лабораторних випробувань

Швидкість ковзання і навантаження для всього циклу випробувань складають: $V = 0,5$ м/с, $N = 800$ Н. Мазильним матеріалом є гідравлічна рідина ВНИИ НП 403, що подається в зону тертя з постійною витратою в часі. Як

матеріал для твердих зразків застосовується сталь 20X (HRC 30), для м'яких зразків – бронза Бр.АЖ 9-4 (НВ 95).

Реєструють лінійну інтенсивність зношування рухомого I_{hp} і нерухомого I_{hn} зразків, шорсткість R_a , мікротвердість поверхонь тертя H_m , глибину наклепаного шару h_m , коефіцієнт тертя μ , робочу температуру в зоні тертя T , час припрацювання t_{np} і навантаження задирання N_3 . Результати зведені у табл. 5.1. Крім цього, на всіх зразках проводиться металографічний аналіз з метою вивчення будови деформованого поверхневого шару, який здійснюється на шліфах, виготовлених перпендикулярно поверхні тертя.

З аналізу отриманих результатів випливає, що мінімальна інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, час припрацювання характерні для прямої трібосистеми. Нерухомий бронзовий (м'який) елемент з меншою площею тертя при терті по сталевому (твердому) елементу у процесі припрацювання швидко набуває високої мікротвердості, $H_{mi} = 2428$ МПа (вихідна мікротвердість бронзи $H_{mi} = 1847$ Мпа), що наближається до мікротвердості вихідної сталевий поверхні ($H_{mi} = 3545$ МПа). Усі процеси, що відбуваються при терті, локалізуються в тонкому поверхневому шарі, глибина залягання максимальних напруг у підповерхневому шарі бронзи $h_{mi} = 3,6$ мкм. При цьому реалізується мінімальна інтенсивність зношування рухомого і нерухомого елементів, однак знос трібосистеми відбувається в основному за рахунок нерухомого елемента (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Тріботехнічні характеристики різних умов існування трібосистем

Тріботехнічна характеристика і її одиниця	Трібосистема			
	Пряма трібосистема $H_p > H_n$ $A_{ap} > A_{an}$	Зворотна трібосистема за матеріалами $H_p < H_n$ $A_{ap} > A_{an}$	Зворотна трібосистема за геометрією $H_p > H_n$ $A_{ap} < A_{an}$	Зворотна трібосистема за матеріалами і геометрією $H_p < H_n$ $A_{ap} < A_{an}$
$I_{hn} \cdot 10^{-10}$, м/м	78	10	140	1,7
$I_{hp} \cdot 10^{-10}$, м/м	0,8	147	13	259
$I_{hs} \cdot 10^{-10}$, м/м	78,8	157	153	260,7
μ	0,041	0,048	0,042	0,045
T , °C	85	80	75	90
t_{np} , хв.	93	185	205	96
N_3 , Н	3750	5100	4500	3400

При терті прямої трібосистеми структура сталевий елемента близька до вихідної (для даного рівня навантаження і швидкості ковзання). Структура бронзовий елемента зазнає пластичної деформації. При цьому на окремих найбільш навантажених ділянках поверхні тиск може досягати значень, необхідних для пластичної плинності бронзи, що призводить до утворення фрагментованої стру-

ктури, що має переривчасту будову за глибиною деформованого шару.

Найбільш імовірним поясненням східчастої будови деформованого тертя шару металу є процеси пластичної плинності поверхневих шарів при зносі течією. Відповідно до такого механізму, у результаті контакту мікронерівностей відбувається їхня течія і нагромадження пластичної деформації, що призводить до утворення максимально деформованого поверхневого шару у вигляді "кірки", що і формує надалі пластинчасті частки зносу.

Утворення такого шару може супроводжуватися перенасиченням активованого при терті металу киснем, елементами контртіла або мащенням завдяки їхній дифузії в процесі тертя.

У цьому випадку, мабуть, буде спостерігатися переважно окиснювальне зношування сталевому зразку і переважно утомне зношування бронзового зразка.

Ідентичними виявилися в роботі зворотна трібосистема за матеріалами і зворотна трібосистема за геометрією. Інтенсивність зношування твердих і м'яких зразків в обох трібосистемах виявилися майже однакові (табл. 5.1). Як для зворотної трібосистеми за матеріалами, так і для зворотної трібосистеми за геометрією характерний ефект "різця", тобто процес проникнення твердого елемента з меншою площею тертя (рис. 5.9, *а*). У першому випадку рухомих є м'який зразок, а в другому – твердий, що схематично показано на рис. 5.9, *б*. Для цих трібосистем спостерігається груба шорсткість, що формується в процесі припрацювання, сам процес припрацювання стає розтягнутим у часі і не яскраво вираженим, у всіх випадках стійко спостерігається перенос бронзи на сталеві поверхні, мікротвердість сталеві поверхні майже не збільшувалася в порівнянні з вихідною.

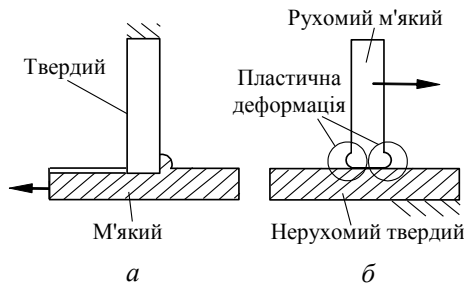


Рис. 5.9 Схеми взаємодії елементів трібосистеми:

а – для зворотної трібосистеми за матеріалами або для зворотної трібосистеми за геометрією; *б* – для зворотної трібосистеми за матеріалами і за геометрією одночасно

Сумарна інтенсивність зношування збільшилася більше, ніж вдвічі порівняно з прямою трібосистемою, за рахунок одночасного збільшення зносу твердих і м'яких елементів, однак у більшій мірі твердих, які в зворотних трібосистемах за матеріалами нерухомі, а в зворотних трібосистемах за геометрією рухомі (рис. 5.8).

Під час роботи цих трібосистем взаємодія поверхонь головним чином складається з адгезійної взаємодії і відповідного їй механізму зношування, що полягає в утворенні часток переносу бронзи на сталь, а потім утворення часток зносу. У цьому випадку будова деформованого тертям поверхневого шару бронзи має східчасту фрагментацію.

Максимальна сумарна інтенсивність зношування характерна для зворотної трібосистеми за матеріалами і за геометрією одночасно, що більше ніж втричі порівняно з прямою трібосистемою (табл. 5.1). При цьому сильно зношується рухомий м'який елемент, який має меншу площу тертя. Велика інтенсивність зношування цього елемента пов'язана з великою пластичною деформацією. Елемент стає схожим на "грибок" (рис. 5.9, б). При передачі крутного моменту через м'який (податливий) елемент наслідок його пластичності відбувається більша деформація, ніж у прямій трібосистемі, де він нерухомий. Отже, бронзовий елемент може пластично деформуватися настільки, наскільки руйнування даного матеріалу за даних умов навантаження супроводжується пластичною деформацією. Будова поверхневого шару бронзи має монотонно зменшуватися з віддаленням від поверхні фрагментацію, оскільки швидкість зношування вища за швидкість утворення поверхневої "кірки" у результаті процесу пластичної плинності.

Характер зношування в даному випадку такий: зношування бронзи абразивне, зношування сталі переважно утомне.

Цікавим і одночасно складним є питання розподілу зносу між елементами трібосистеми.

Для наочності зобразимо результати у виді гістограми (рис. 5.10), з аналізу якої можна зробити такі висновки:

1. Гіпотеза про збільшення зносу на елементах з перемінним контактом, у порівнянні з елементами, що мають постійний контакт, не підтверджується, оскільки у прямій трібосистемі (ПТ) та зворотній за матеріалами і за геометрією одночасно (ЗТМ + ЗТГ) більший знос мають елементи з постійним контактом. Для зворотної трібосистеми за матеріалами (ЗТМ) та за геометрією (ЗТГ) ця гіпотеза справедлива.

Гіпотеза про збільшення зносу на елементах, що мають більшу поверхню тертя, у порівнянні з елементами, що мають меншу поверхню, не підтверджується, тому що на ПТ і ЗТМ + ЗТГ більший знос мають елементи з меншою площею тертя. Для ЗТМ і ЗТГ ця гіпотеза справедлива.

Гіпотеза про збільшення зносу на зразках, що обертаються, а отже, більш інтенсивно охолоджуються, не підтверджується, тому що на ПТ і ЗТГ рухомі елементи зношуються менше. Для ЗТМ і ЗТМ + ОТГ ця гіпотеза справедлива. Сюди можна додати і зв'язок величини зносу з величиною робочої температури елементів. У ПТ і ЗТМ + ЗТГ у більшій мірі зношуються елементи, що мають більш високу температуру, оскільки знаходяться увесь час у контакті, а в ЗТМ і ЗТГ елементи з більш високою робочою температурою зношуються менше.

Цей аналіз свідчить про складність процесів, що протікають. Зараз можна констатувати лише той факт, що розподіл зносу між елементами трібосистеми залежить від розташування матеріалів. В усіх чотирьох конструктивних варіантах трібосистем більший знос завжди присутній у елемента трібосистеми, яка має меншу твердість (рис. 5.10).

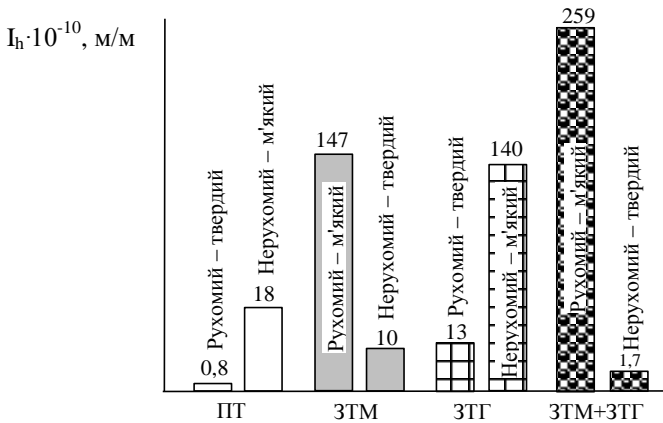


Рис. 5.10 Гістограма розподілення зносу між елементами трібосистеми: ПТ – прямі трібосистеми; ЗТМ – зворотні трібосистеми за матеріалами; ЗТГ – зворотні трібосистеми за геометрією; ЗТМ+ЗТГ – зворотні трібосистеми за матеріалами і за геометрією

Слід зазначити, що наведений аналіз розподілу зносу між елементами трібосистеми справедливий лише при терті в умовах граничного мащення, де в мастильному середовищі відсутні абразивні частки.

При наявності в мастильному середовищі абразивних часток характер розподілу зносу між елементами трібосистеми зміниться. Нерухомий м'який елемент за рахунок шаржування абразивними частками буде захищений від зносу, а зношуватися буде рухомий – твердий елемент трібосистеми. Отже в ПТ і ЗТГ більше буде зношуватися твердий рухомий елемент. В ЗТМ і ЗТМ + ЗТГ рухомих елементом виступає м'який матеріал. У такому випадку шаржування абразивних часток у м'який матеріал ускладнене. Абразивні частки будуть перекочуватися між поверхнями тертя, гострими краями дряпаючи і "проорюючи" їх. У цьому випадку знос елементів трібосистеми буде майже однаковим, однак у більшій мірі буде зношуватися м'який матеріал.

Коефіцієнт тертя для всіх чотирьох трібосистем можна вважати постійним (табл. 5.1), тобто незалежним від розташування матеріалів і площ тертя.

Визначення стійкості при заїданні прямих і зворотних трібосистем дає протилежні результати.

Під стійкістю при заїданні трібосистеми тертя розуміють її здатність виконувати задані функції при перевантаженнях без заїдання матеріалів.

Стійкість при заїданні можна характеризувати навантаженням задирання N_3 , при якій відбувається заїдання або схоплювання матеріалів.

Навантаження задирання залежить від режиму навантаження при випробуваннях. Численні дані про ці навантаження, які надані в довідниках з розрахунків деталей машин, неоднозначні і найчастіше суперечливі. При довільно призначеному режимі підвищення навантаження результати випробувань характеризують режим навантаження і мають порівняльну цінність тільки щодо задалегідь обговореного режиму. Практично необмежена кількість таких режимів на практиці при застосуванні нестационарних методів випробувань різко знижує цінність таких результатів. Навантаження задирання визначають східчастим навантаженням, величина ступеня навантаження 200 Н, час роботи на кожній ступіні – 10 хв. Навантаженням задирання вважається таке навантаження, при якому поведінка моменту тертя стає хитливою і досягає величини 7 Н·м. При такій величині відбувається самовимикання машини тертя.

Отримані результати наведені в табл. 5.1. Як впливає з наведених результатів, максимальне навантаження задирання має зворотна трібосистема за матеріалами (5100 Н), що на 35% перевищує навантаження задирання прямої трібосистеми (3750 Н). Друге місце щодо стійкості при заїданні займає зворотна трібосистема за геометрією (4500 Н), що на 20% перевищує стійкість при заїданні прямої трібосистеми. І найгіршу стійкість при заїданні має зворотна трібосистема за матеріалами і за геометрією одночасно ($N_3 = 3400$ Н), що на 10% нижче, ніж у прямої трібосистеми.

З цього погляду найслабкішою ланкою, наприклад, в конструкції машин будуть зворотні трібосистеми за матеріалами і за геометрією одночасно. Ці трібосистеми мають найбільшу інтенсивність зношування і низку стійкість при заїданні. Щодо зворотних трібосистем за матеріалами або за геометрією, то, програвши прямій трібосистемі в зносостійкості в два і більше разів, такі трібосистеми володіють кращою стійкістю при заїданні, що на 20...35% вище, ніж у прямої.

Згідно з отриманими експериментальними даними можна зробити висновок, про те, що реалізація різних механізмів зношування на прямих і зворотних трібосистемах тертя визначається твердістю спряжених матеріалів, їх розташуванням і величиною діючих напруг, що можуть значно збільшуватися за рахунок способу передачі крутного моменту, при зміні відносності руху елементів трібосистеми. Слід зазначити, що при тому самому рівні навантаження і швидкості ковзання спостерігаються чотири види зношування, які відрізняються механізмом утворення і відділення часток зносу. Це абразивне, адгезійне, утомне і окиснювальне зношування.

Масштабний фактор трібосистеми. З точки зору зниження матеріалоспоживності доцільно виготовляти спряження, за розмірами, що близькі до межі забезпечення міцності, тобто з мінімальними геометричними розмірами. У більшості

випадків на етапі проектування при виборі геометричних розмірів трібосистем виходять лише з умов забезпечення міцності спряження на основі емпіричних даних роботи прототипу або даних лабораторних, стендових випробувань.

Добра працездатність, високі параметри стійкості до заїдання характерні для трібосистем з мінімальними розмірами вала. Краща працездатність спостерігається у зразків з меншими геометричними розмірами. Вплив масштабного фактора на фрикційну теплостійкість при лінійному підвищенні тисків відзначається також розходження в поведінки "великих" і "малих" зразків і робиться висновок, що режими навантаження, які рекомендуються для великогабаритних спряжень з більшою площею тертя, неприйнятні для малогабаритних. При цьому більш сприятливі характеристики мають спряження з великими габаритами.

У зв'язку з цим, а також виходячи із завдань дослідження в даному розділі розглядаються закономірності зміни тріботехнічних характеристик "малих" і "великих" трібосистем для одержання загальної закономірності на вибір оптимальних геометричних розмірів трібоспрямижень, використання якої обумовить на етапі проектування вибір оптимального інженерного рішення і створення надійної та економічної конструкції.

Масштабний фактор елементів трібосистем буде значно впливати на процеси тертя і зношування.

В основу коефіцієнта форми трібосистеми K_f були покладені такі припущення:

1. Необхідно враховувати робочу площу тертя елемента, яка бере участь у роботі, "генеруючи" і розсіюючи тепло, A_a .

2. Варто враховувати об'єм елемента, що лежить під робочою площею, поглинає і розсіює теплову енергію V . Там, де лінійні розміри елемента більші за розміри робочої площі, необхідно враховувати ефективний об'єм.

3. Варто враховувати відношення площ тертя нерухомого A_{an} і рухомого A_{ap} елементів, тобто коефіцієнт взаємного перекриття K_{ez} . Важливість врахування K_{ez} обумовлена, як уже відзначалося, тим, що зміна цього коефіцієнта призводить до зміни часу контактування третьових поверхонь між собою і з активними компонентами середовища, що, у свою чергу, приводить до зміни швидкості і глибини фізико-хімічних процесів, що протікають.

Відношення площі, що "генерує" теплову енергію, до об'єму, що поглинає це тепло, для нерухомого A_{an}/V_n і рухомого A_{ap}/V_p елементів дасть уявлення про коефіцієнт форми для цих зразків відповідно.

Очевидно, що при нестационарних процесах за короткі проміжки часу не весь об'єм елементів устигає взяти безпосередню участь у контактній взаємодії. Мова йде "про деформування і поширення теплоти в об'ємі матеріалу елементів трібосистеми. Процеси пластичного деформування матеріалу залежать від його конструктивного оформлення, яке характеризується параметром $S = A/V$, тобто відношенням загальної площі тіла до його об'єму. Відзначимо, що при статичних випробуваннях на розрив пластично деформується майже

весь об'єм зразка, а в процесі тертя пластично деформується тільки та частина об'єму, що лежить під площею тертя. Відношення у вигляді комплексу A_a/V дає можливість врахувати просторовий (номінальна площа тертя A_a і об'єм V) розвиток конструктивного елемента.

Критеріальне оцінювання оптимальності конструктивного виконання трібосистеми. Коефіцієнт форми трібосистем. Виходячи з того, що в трібосистемі одночасно взаємодіють два елементи – рухомий і нерухомий, можна одержати наведений коефіцієнт форми трібосистеми за аналогією з приведеним радіусом кривизни при контакті двох тіл різного діаметра, 1/м:

$$K_{\phi.np} = \frac{\frac{A_{an}}{V_n} \cdot \frac{A_{ap}}{V_p}}{\frac{A_{an}}{V_n} + \frac{A_{ap}}{V_p}}. \quad (5.6)$$

Помноживши $K_{\phi.np}$ на коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\epsilonз}$, одержимо коефіцієнт форми трібосистеми, 1/м:

$$K_{\phi} = K_{\phi.np} \cdot K_{\epsilonз} = \frac{A_{an}}{V_p + V_n \frac{A_{ap}}{A_{an}}}. \quad (5.7)$$

З аналізу формули випливає, що при збільшенні площі нерухомого елемента з одночасним зменшенням площі рухомого і об'ємів рухомого і нерухомого елементів K_{ϕ} наближається до максимуму. Коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\epsilonз}$ прагне до одиниці. Така трібосистема графічно показана на рис. 5.11, а, трібосистема, у якій діаметр вала наближається до мінімуму.

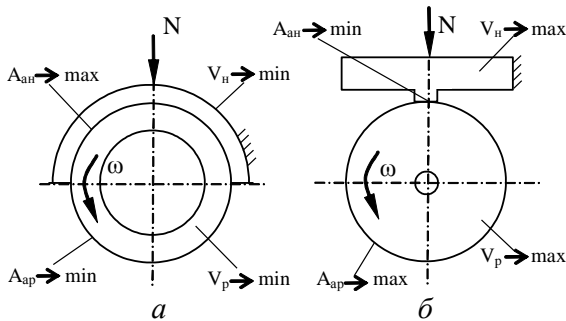


Рис. 5.11 Графічні зображення трібосистем з різними коефіцієнтом форми K_{ϕ} : а – K_{ϕ} прагне до максимуму; б – K_{ϕ} прагне до мінімуму

При зменшенні A_{an} , з одночасним збільшенням A_{ap} , V_p , V_n , K_ϕ наближається до мінімуму. Коефіцієнт взаємного перекриття K_{e3} наближається до нуля. Така трібосистема графічно показана на рис. 5.11, б, трібосистема, у якій діаметр вала наближається до максимуму.

Вплив масштабного фактору на тріботехнічні характеристики трібосистем. Для оцінювання працездатності наведених трібосистем і виявлення глибини протікання процесів у поверхневих шарах здійснюють модельні випробування на трібосистемах з такими коефіцієнтами форми: для трібосистеми на рис. 5.11, а – $K_\phi = 26,8$ 1/м, діаметр рухомого диска $d = 23$ мм, ширина $l = 16$ мм, $K_{e3} = 0,5$; ескіз диска такої трібосистеми поданий на рис. 5.12, а; для трібосистеми на рис. 5.11, б – $K_\phi = 0,09$ 1/м, діаметр диска $d = 120$ мм, $l = 25$ мм, $K_{e3} = 0,013$; ескіз диска наведений на рис. 5.12, б.

Для порівняння візьмемо стандартну трібосистему для машини СМТ-1 "диск – колодка", у якій $K_\phi = 4,9$ 1/м, $d = 50$ мм, $l = 12$ мм, $K_{e3} = 0,12$.

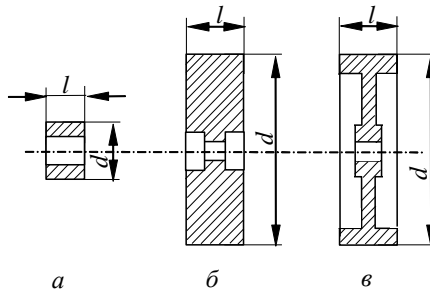


Рис. 5.12 Диски для лабораторних випробувань

Характер зміни перерахованих залежностей зображений на рис. 5.13 і 5.14, з яких випливає, що мінімальна сумарна інтенсивність зношування і мінімальний коефіцієнт тертя в трібосистемі з $K_\phi = 26,8$ 1/м і максимальна інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя в трібосистемі з мінімальним коефіцієнтом форми, $K_\phi = 0,09$ 1/м, причому інтенсивність зношування відрізняється на порядок, а коефіцієнт тертя – майже втричі.

При цьому для трібосистеми з великим коефіцієнтом форми характерна відносно низька мікротвердість поверхонь при більшій глибині наклепаного шару – у порівнянні з трібосистемою з меншим коефіцієнтом форми.

Наведені дані про мікротвердість поверхонь і глибину наклепаного шару свідчать про те, що трібосистема з великим K_ϕ працює в більш "м'яких" умовах тертя, ніж трібосистеми з меншим K_ϕ .

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 5.14, можна зробити висновок: при даному рівні навантажень і швидкості ковзання трібосистеми з великим K_ϕ мають монотонну структуру поверхневого шару, що змінюється, а трібосистеми з меншим K_ϕ – структуру, яка східчасто змінюється.

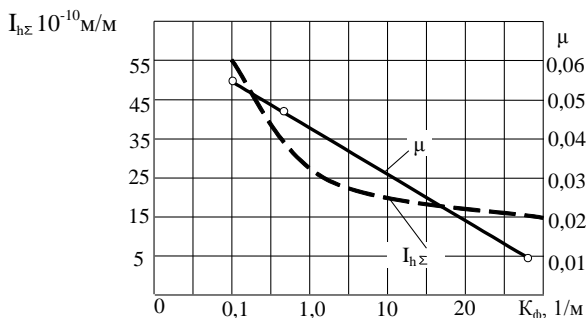


Рис. 5.13 Залежність сумарної інтенсивності зношування $I_{h\Sigma}$ від коефіцієнта форми K_{ϕ} трібосистеми

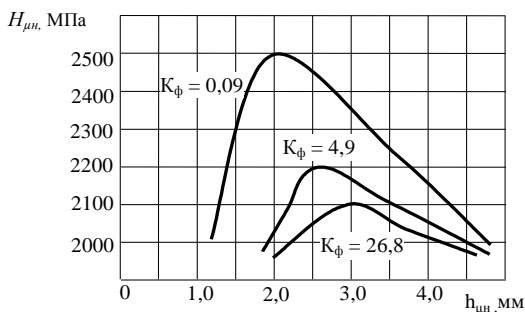


Рис. 5.14 Залежність мікротвердості поверхні тертя нерухомого елемента H_{μ} від глибини наклепаного шару h_{μ} для трібосистем з різними коефіцієнтами форми

Структура, що змінюється монотонно підповерхневого шару, формується в двох протилежних випадках: при незначних напругах, які призводять до окиснювального і одночасно утомного зношування, і при максимальних напругах, що призводять до абразивного зношування. При такому рівні навантаження і швидкості ковзання для трібосистеми тертя з $K_{\phi} = 26,8$ 1/м характерний перший випадок. Це можна підтвердити, по-перше, значенням мікротвердості бронзи, що дорівнює 2100 МПа (вихідне значення 1847 МПа), тобто бронза не вичерпала свого запасу пластичності. І по-друге, цей висновок підтверджується також значеннями робочих температур. У трібосистемі з $K_{\phi} = 26,8$ 1/м робоча температура перебувала в межах 80...85 °С, у той час як у трібосистемі з $K_{\phi} = 0,09$ 1/м вона знаходилася в області 100...110 °С. Однак у трібосистемі з великим коефіцієнтом форми спостерігається досить тривале припрацювання – 2...3 год, у той час як трібосистеми з малим K_{ϕ} припрацьовувалися протягом 15...25 хв.

Можна припустити, що зміни інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя і процесів, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів є функцією коефіцієнта форми. Щоб підтвердити висунуте припущення, проводився експеримент, метою якого було визначення характеру зміни перерахованих залежностей на різних трібосистемах з тим самим коефіцієнтом форми $K_\phi = 4,9$ 1/м, але який має різний діаметр диска. Умови експерименту ідентичні описаними, тобто матеріали, їхня твердість, мастильне середовище, навантаження, швидкість ковзання відповідають описаному нами експерименту.

Проводиться три серії випробувань.

У першій серії випробувань діаметр диска $d = 50$ мм, $K_\phi = 4,9$ 1/м, $K_{вз} = 0,12$.

В другій серії випробувань діаметр диска $d = 120$ мм, $K_\phi = 4,9$ 1/м, $K_{вз} = 0,12$. Площі тертя диска і колодки, а також їхні об'єми збільшені в шість разів відносно стандартної трібосистеми для машини тертя 2070 СМТ-1 (діаметр диска 50 мм). Оскільки при зміні лінійних розмірів елементів їхні площі змінюються в другому ступені, а об'єми – у третьому, диск діаметром 120 мм виконаний у вигляді маточини, при цьому була дотримана рівність коефіцієнтів форми і коефіцієнтів взаємного перекриття. Ескіз диска зображений на рис. 5.12, в.

В цих трібосистемах інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, мікротвердість і глибина наклепаного шару в рухомих і нерухомих елементів однакові. Числові значення цих параметрів наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 - Результати дослідження тріботехнічних характеристик трібосистем з різними діаметрами елементів при $K_\phi = 4,9$ 1/м

Тріботехнічна характеристика і її одиниця	Схема випробувань		
	Диск – колодка		Кільце – кільце
	$K_\phi = 4,9$ 1/м $d = 50$ мм	$K_\phi = 4,9$ 1/м $d = 50$ мм	$K_\phi = 4,9$ 1/м $d = 28$ мм
$I_{\text{вз}} \cdot 10^{-10}$, м/м	34	36,5	34,5
μ	0,027	0,021	0,025
$H_{\text{цн}}$, МПа	3590	3530	3676
$h_{\text{цн}}$, МКМ	2,75	2,65	2,47
$H_{\text{цн}}$, МПа	2080	2190	2373
$h_{\text{цн}}$, МКМ	2,6	2,59	2,75

У третій серії випробувань змінена схема їхнього проведення. Випробування проводилися за схемою "кільце – кільце". Елементи трібосистеми мають зовнішній діаметр 28 мм (відповідно до технічного опису для машини тертя УМТ-1). Коефіцієнт форми був досягнутий 4,91/м за рахунок зміни коефіцієнта взаємного перекриття, що склав 0,39. Результати випробувань наведені в табл. 5.2, з якої випливає, що при однаковому коефіцієнті форми, незалежно від діаметра елементів і схеми випробувань, інтенсивність зношу-

вання, коефіцієнт тертя, мікротвердість поверхні тертя і глибина наклепаного шару ідентичні. Ці результати дозволяють зробити висновок, що коефіцієнт форми може служити для оцінювання зносостійкості трібосистеми у функції геометричних розмірів.

Як впливає з рис. 5.11, розподіл трібосистем на вищі і нижчі можна здійснювати не тільки за коефіцієнтом взаємного перекриття, але і за коефіцієнтом форми.

Можна вважати: якщо $K_\phi < 1$, то трібосистеми переходить від контактів по площі до контакту по лінії, тобто у вищу кінематичну трібосистему. Трібосистему з $K_\phi = 1$ можна вважати перехідною трібосистемою. Трібосистеми з $K_\phi > 1$ мають контакт по площі, тобто є нижчими трібосистемами.

На основі викладеного можна зробити висновок, що ці положення необхідно враховувати при проектуванні трібосистем машин. Варто прагнути до збільшення коефіцієнта форми трібосистеми. З аналізу формули K_ϕ впливає, що для цього необхідно або збільшити робочу площу нерухомого елемента трібосистеми (дотримуючи співвідношення $A_{an}/A_{ap} = 0,5$), або зменшити об'єми обох елементів трібосистеми. Зменшення об'ємів позначається позитивно на роботі трібосистеми, оскільки елементи великих розмірів при тих самих умовах тертя нагріваються до значно більш високих температур, ніж елементи малих розмірів.

5.3 Оптимізація конструктивного виконання трібосистеми

Запропонована методика розрахунку K_ϕ може служити експертною оцінкою працездатності спроектованих трібосистем, виявлення "вузьких місць" у конструкціях.

Корисно відзначити, що зворотні трібосистеми при наявності в них великих коефіцієнтів форми можуть виявитися більш зносостійкими, ніж прямі трібосистеми з низьким коефіцієнтом форми. Такий висновок графічно зображений на рис. 5.15, що складений за результатами лабораторних випробувань. Це можна побачити, аналізуючи наведені криві. Прямі трібосистеми з коефіцієнтом форми менш 0,11/м будуть мати більшу інтенсивність зношування, ніж ЗТГ або ЗТМ, що мають значення K_ϕ понад 5 1/м.

Як уже відзначалося, криві на рис. 5.15 побудовані за результатами лабораторних зразків, коефіцієнт форми в яких не перевищує 5 1/м. Однак у трібосистемах реальних машин K_ϕ знаходиться в межах 0,68...102 1/м. У зв'язку з цим при великих K_ϕ розглянута залежність не так явно виражена.

Виходячи з того, що в реальних конструкціях існують зворотні трібосистеми за геометрією, де площа тертя в нерухомого елемента більше, ніж у рухомого, необхідно внести зміну у формулу K_ϕ , яка отримана для прямих трібосистем. На зворотних трібосистемах за геометрією K_{es} буде перевищувати 1, що суперечить фізичному змісту цього коефіцієнта, наведеного на рис. 5.3.

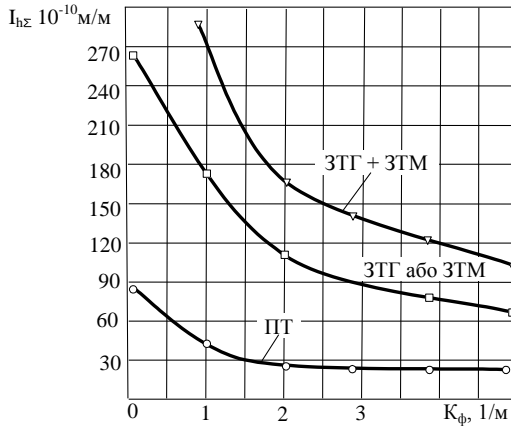


Рис. 5.15 Залежність сумарної інтенсивності зношування $I_{h\Sigma}$ від коефіцієнта форми K_ϕ для різних трібосистем:

ПТ – пряма трібосистема; ЗТГ або ЗТМ – зворотна трібосистема за геометрією або зворотна трібосистема за матеріалами; ЗТГ + ОТМ – зворотна трібосистема за геометрією і матеріалами одночасно

З урахуванням викладених розрахунків коефіцієнта форми здійснюють за формулою:

$$K_\phi = \frac{A_{a \min}}{V_{Aa \max} + V_{Aa \min} \cdot \frac{A_{a \max}}{A_{a \min}}}, \quad (5.9)$$

де $A_{a \min}$, $A_{a \max}$ – відповідно менша і більша робоча площа тертя одного з елементів;

$V_{Aa \max}$, $V_{Aa \min}$ – об'єм елемента, що містить відповідно більшу і меншу робочу площу тертя.

За допомогою коефіцієнта форми можна пояснити велику різницю в зносі за той самий час випробувань між лабораторними і натуральними (стендовими або експлуатаційними) випробуваннями.

Мається на увазі, що при випробуваннях трібосистем, виготовлених з тих самих матеріалів і в одному і тому ж мастильному середовищі, але які відрізняються лише геометричними розмірами. Лабораторні зразки на машинах тертя зношуються значно швидше, ніж натурні в реальних умовах експлуатації (зразки для лабораторних випробувань у кілька разів менші в порівнянні з натурними). Пояснюється це тим, що стандартні зразки для машин тертя мають значення $K_\phi = 0,05 \dots 15$ 1/м, а значення K_ϕ для реальних трібосистем знаходяться в межах 30...100 1/м.

Залежність, показана на рис. 5.13, дозволяє оцінити, у скільки разів знос лабораторних зразків буде більше зносу натурних трібосистем. А якщо в лабораторних випробуваннях використовуються зворотні трібосистеми, то різниця в зносі досить чітко ілюструється на рис. 5.15.

Відзначимо також, що нанесення будь-яких зносостійких покриттів на поверхні тертя елементів призводить до зменшення ефективного об'єму. При цьому за об'єм елемента, що лежить під площею тертя, необхідно приймати об'єм покриття. І чим менша товщина покриття, тим менший об'єм. У результаті коефіцієнт форми в таких трібосистемах буде набувати досить великих значень. Тому трібосистеми, що мають зносостійкі покриття, будуть дуже зносостійкими не тільки в зв'язку з матеріалами покриття, але і завдяки певному конструктивному оформленню трібосистеми.

У результаті детального вивчення впливу масштабного фактора на триботехнічні характеристики трібосистеми – як у лабораторних умовах, так і в реальних конструкціях – стало очевидним, що при проектуванні трібосистем необхідно обирати оптимальні співвідношення робочих площ і об'ємів рухомого і нерухомого елементів трібосистеми.

Висновки впливу масштабного фактора на знос трібосистеми такі:

1. При виборі співвідношення робочих площ тертя необхідно прагнути до $K_{e3} = 0,5$, тобто до нижчої кінематичної пари, де контакт здійснюється по площі. У цьому випадку сполучення матеріалів повинно бути "твердий + м'який", що забезпечує швидке припрацювання і стійкість до заїдання. Спряження матеріалів "твердий + твердий" застосовується лише на вищих кінематичних парах. Зменшення або збільшення K_{e3} від оптимального значення буде супроводжуватися збільшенням інтенсивності зношування.

2. Коефіцієнт форми трібосистем, до якого входять робочі площі і об'єми рухомого і нерухомого елементів, виявляється функцією інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя і процесів, що відбуваються в поверхневих шарах. Чим вищий коефіцієнт форми, тим кращі триботехнічні характеристики мають трібосистеми. Збільшувати коефіцієнт форми трібосистеми можна шляхом збільшення робочої площі тертя нерухомого елемента з одночасним зменшенням об'ємів елементів трібосистем.

3. За допомогою коефіцієнта форми можна поділяти трібосистеми на вищі і нижчі. При значеннях $K_{\phi} < 1$ трібосистема є вищою, при $K_{\phi} > 1$ – нижчою. Трібосистема з $K_{\phi} = 1$ є перехідною трібосистемою.

4. За допомогою коефіцієнта форми можна здійснювати експертне оцінювання спроектованих трібосистем і виявляти шляхи підвищення їхньої зносостійкості на етапі проектування.

5.4 Шляхи зменшення зовнішнього тертя в конструкціях трібосистем

Ця група методів реалізується на стадії проектування трібосистем. Вона включає вибір матеріалів для виготовлення елементів трібосистем, оптиміза-

цію геометрії і раціональне спряження матеріалів тіл, захист зони тертя від потрапляння хімічно активних речовин, абразивних часток і інших видів забруднень, компенсацію макрогеометричних відхилень деталей, заміну зовнішнього тертя внутрішнім, застосування систем подачі мастильних речовин і регулювання температури і інші методи.

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

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

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

Оптимізація макрогеометрії поверхонь тертя. Цей метод спрямований на досягнення якомога більш рівномірного розподілу напруг у зоні контакту, зниження фрикційного нагрівання і поділу поверхонь тертя шаром мастильного матеріалу. Останнім часом розвиваються напрямки, в основу яких покладений такий принцип. При виробництві поверхні тертя повинна задаватися така форма, яку вона має у період сталого тертя. Слід зазначити, що цей принцип не позбавлений недоліків, оскільки в міру зношування безупинно змінюються зазори, теплове навантаження, відбувається перерозподіл тисків і відповідно до цих факторів змінюється макрогеометрія тертьових тіл.

Тіла, що спряжуються, повинні мати форму, близьку до ідеальної. У протилежному випадку можлива локалізація напруг, утворення припиків і інтенсивний знос окремих ділянок контакту. Макрогеометричні відхилення тіл кочення сприяють виникненню вібрацій, росту динамічних навантажень і об'є-

мному утомному руйнуванню.

Одним з методів підвищення зносостійкості є вибір оптимальної хвилястості. При великому кроці S і висоті хвилі H_x тиск на контурних площадках контакту може досягати межі плинності і для незмазаних поверхонь можливе заїдання. При малих S і H_x , шорсткість не здатна виконувати роль кишень для мастильного матеріалу.

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

Компенсація макрогеометричних відхилень деталей. Компенсація зносу, макрогеометричних відхилень поверхонь тертя і биття елементів трібосистем досягається з допомогою застосуванням еластичних прокладок. Так, між внутрішнім і зовнішнім шарами підшипника ковзання розташовують шар з еластичного матеріалу. При цьому робочий (антифрикційний) шар може бути виконаний у вигляді сегментів. Еластичні прокладки встановлюють також між корпусом і зовнішнім кільцем підшипника кочення. В ущільнених елементах завдання підвищення зносостійкості вирішується за рахунок використання еластичних матеріалів і надання поверхні тертя оптимальної форми.

Наведемо розповсюджені прийоми компенсації зносу елементів трібосистем. Це використання змінних елементів конструкції (твердосплавні зуби гірничодобувних машин, струмознімачі електродвигунів); деталей, що плавають, (поршневі пальці, втулки, шайби); конструкцій з регульованим зазором (конструкції, що реалізують тертя вертіння).

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

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

Раціональний вибір виду тертя. Не завжди перехід від ковзання до кочення тертьових тіл приводить до позитивного результату, хоча сила тертя в першому випадку на 1...2 порядки вище, ніж у другому. Застосування опор кочення найбільш виправдане у трібосистемах, що експлуатуються при малих і середніх навантаженнях і швидкостях, відсутності хімічно активних речовин, вібрацій і ударних навантажень. Крім того, їх застосування вимагає подачі мастильного матеріалу в зону тертя, високої точності виготовлення і монтажу деталей рухомих зчленувань. Нераціональним їх застосування при реверсивному русі тіл з малими кутами повороту. У цьому випадку на доріжках кочення утворюються поглиблення, що нагадують відбитки кульки при оцінюванні твердості за Бринелем. Це явище (бринелювання) призводить до швидкого руйнування опор кочення.

Застосування опор ковзання можливе в широкому інтервалі навантажень і швидкостей, у трібосистемах працюючих без мастильного матеріалу. Вони менш чутливі до вібрацій, ударних навантажень та впливів абразивів і хімічно активних середовищ. Ці переваги досягаються головним чином за рахунок того, що на відміну від опор кочення вони можуть бути виготовлені зі значно більш широкого класу матеріалів.

До основних недоліків опор ковзання відносяться високі коефіцієнти тертя й інтенсивність зношування, знос поверхні, що спряжується, залежність тріботехнічних характеристик від температури.

Істотним недоліком опор кочення є великі габаритні розміри. Це призвело, наприклад, до розробки голчастих підшипників кочення.

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

Зниження теплового навантаження контакту. Тепловідведення на фрикційному контакті є причиною інтенсивного зношування тертьових тіл в

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

5.5 Внутрішнє тертя структури матеріалів як критерій зносостійкості

У процесі роботи трібосистеми, особливо в період припрацювання, відбувається формування поверхневих шарів, що істотно впливають на подальший процес тертя. Реологічні властивості поверхневих шарів тертя, що визначають характер релаксації напруг, механізми і рівень внутрішнього тертя за даних умов зовнішнього тертя, впливають на процес формування навантажено-деформованого стану поверхневих шарів і, зрештою, на зносостійкість трібоспружень. Показано, що на різних рівнях поверхневого шару при терті реалізуються характерні механізми дисипації енергії, що підводиться. У тонкому поверхневому шарі, що зазнає найбільш високого контактного навантаження, механізмами релаксації є гістерезисне і мікропластичне внутрішнє тертя. У нижчележачих шарах внаслідок зниження амплітуди напруг реалізуються механізми релаксаційного внутрішнього тертя.

З цього приводу розглядаються різні аспекти сумісності третьових поверхонь при роботі трібосистеми в режимі граничного мащення з позицій зміни реологічних властивостей поверхневих шарів. Зміна реологічних властивостей залежатиме від різних факторів, що будуть включені в об'єкт дослідження.

У зв'язку з викладеною метою питання необхідно вивчити закономірності зміни внутрішнього тертя матеріалів трібосистеми в процесі її роботи і розробити рекомендації з вибору сумісних матеріалів в трібосистему.

Значення внутрішнього тертя часто характеризують величиною логарифмічного декременту (або просто декременту) d загасання, що є натуральним логарифмом відношення амплітуд двох послідовних коливань.

Релаксаційну здатність матеріалів пропонується оцінювати рентгенографічним методом, що дозволяє визначати характер еволюції дислокаційної структури поверхневих шарів контактуючих матеріалів. Однак, у тонких поверхневих шарах цей метод дає значні похибки. Тому на основі аналізу різних методів вимірювання внутрішнього тертя використовують ультразвуковий метод.

При вимірюваннях внутрішнього тертя на частотах порядку мегагерц і вище використовують імпульсні методи. Для вимірювання загасання в елемент

перпендикулярно його плоскопаралельним граням вводиться досить короткий ультразвуковий імпульс. Спостерігаючи багаторазові відображення цього імпульсу від рівнобіжних торців зразка, можна судити, як швидко – у залежності від часу і пройденої відстані – послідовно відображені імпульси загасають за амплітудою. Для введення звукового імпульсу звичайно використовують п'єзоперетворювач, що закріплюється на одній із плоскопаралельних сторін зразка.

Загасання звукових хвиль визначається в основному внутрішнім тертям і теплопровідністю середовища, а на високих частотах – різними процесами взаємодії ультразвукових хвиль із внутрішніми порушеннями у твердому тілі, такими, як теплові коливання решіток, електрони, спінові хвилі.

Величина загасання звукових коливань залежить від кристалічного стану речовини, від наявності дефектів і домішок, від попередньої обробки, якій був підданий матеріал.

Плоска ультразвукова хвиля, що поширюється в матеріалі деталі, втрачає свою енергію за експонентним законом:

$$A_l = A_0 e^{-2d}, \quad (5.10)$$

де A_0 , A_l – амплітуда ультразвукової хвилі відповідно в точці введення і на відстані l від цієї точки;

d – коефіцієнт загасання ультразвуку, він визначається відстанню (довжиною шляху) в метрах, на якій амплітуда плоскої хвилі зменшується в e разів – у 2,71 рази.

Енергія хвилі слабшає внаслідок поглинання (переходу ультразвукової енергії в теплову), розсіювання (відображення в різних напрямках від неоднорідностей середовища) і розбіжності поля ультразвукових коливань.

У металах загасання ультразвукових хвиль усіх типів відбувається головним чином внаслідок розсіювання. Воно дуже велике, якщо середні розміри зерна D приблизно дорівнюють або більші за довжину хвилі l , причому воно досягає максимуму в інтервалі $l = (2...4)D$. При $l \ll D$ загасання визначається в основному поглинанням. При $l > 10D$ загасання обумовлене розсіюванням ультразвуку.

При проходженні ультразвукової хвилі через матеріал хвиля, зустрівши на своєму шляху перешкоду розміром менше ніж $1/3l$, не відбивається, а огинає її. Це явище називають дифракцією. Необхідно відзначити, що під перешкодою для ультразвуку розуміють ділянки середовища, де акустичний опір rc (r – щільність середовища; c – швидкість звуку в середовищі) значно відрізняється від акустичного опору основного середовища.

У процесі роботи трібосистеми поверхневі шари матеріалу набувають структуру, відмінну від основної структури матеріалу. Отже, змінюється акустичний опір поверхневих шарів, що є додатковим джерелом загасання ультразвукових хвиль. У цьому випадку загасання ультразвукових хвиль пов'язане з релєвським розсіюванням, тобто з розсіюванням, пов'язаним з дифракцією хвиль. Необхідно враховувати і те, що структура матеріалів, з яких ви-

готоввлені трібосистеми, гетерогенна, а отже, можливі механізми загасання ультразвукових коливань, пов'язані з теплопровідністю і дифузією.

Існує кілька способів вимірювання загасання в матеріалі. Застосування автоматичної системи виміру загасання є доцільним у випадках, коли поглинання є функцією плавно мінливих параметрів (наприклад, температури). Це дозволяє істотно спростити процес вимірювання.

Метод накладення каліброваної експоненти є найбільш розповсюдженим і універсальним методом вимірювання поглинання ультразвуку, хоча він і не настільки зручний, як попередній. Метод полягає в тому, що на екрані осцилографа одночасно з картиною відображення сигналу, що огинає, подається експоненціальна убутний сигнал ("експонента"), параметри якого відомі з високою точністю і можуть регулюватися в широких межах.

Амплітудні залежності поглинання ультразвуку в мегагерцевій зоні частот вимірюється лун-імпульсним методом на фіксованій частоті. Коливання в зразках збуджувалися п'єзокварцевим перетворювачем того ж типу, що і при дослідженнях амплітудно-незалежного поглинання. Наявність у зразку амплітудної залежності загасання сильно спотворює картину відображення, роблячи її не експонентною. У зв'язку з цим застосування методу накладеної експоненти стає неможливим. Високий рівень вимірюваного поглинання робить неефективним використання автоматичної системи вимірювання.

Для практичного застосування найбільш доцільним є використання стандартних серійних приладів, що дозволяють вимірювати відношення амплітуд ультразвукових імпульсів, тобто загасання амплітуд. У даній роботі був застосований серійний метрологічно забезпечений ультразвуковий дефектоскоп УД2-12 із блоком вимірювання відношення амплітуд ультразвукових імпульсів. З цією метою можна використовувати будь-який інший ультразвуковий дефектоскоп – вимірювач відношення амплітуд ультразвукових імпульсів. Унаслідок цього використовують метод імпульсного порівняння.

Похибка вимірювання амплітуди імпульсів складала $\pm 2\%$, коефіцієнт загасання визначався з точністю $\pm 0,2$ ДБ/м.

Зондувальний імпульс подається на перетворювач. Проїшовши через зразок і багаторазово відбившись від його паралельних поверхонь, серія загасаючих імпульсів надходить на вхід приймача і після посилення на осцилограф. Імпульс порівняння подається на плавний атенуатор, а потім безпосередньо на приймач і осцилограф. Різниця значень амплітуд імпульсу порівняння, одержуваних при зіставленні з двома імпульсами в картині відображення і відлічуваних по плавному атенуатору, дає значення коефіцієнта загасання, ДБ/м:

$$\alpha = \frac{1}{2l} 20 \lg \frac{A_1}{A_2}, \quad (5.11)$$

де A_1, A_2 – амплітуда відповідно зондувального і відбитого імпульсу; l – товщина зразка. Коефіцієнт загасання α пов'язаний із внутрішнім тертям

$$Q^{-1} = \frac{\alpha \lambda}{\pi}, \quad (5.12)$$

де λ – довжина хвилі.

На рис. 5.16 показано розташування зондувального і відбитого імпульсів на екрані осцилографа дефектоскопа. Перший імпульс 1 відбиває величину амплітуди зондувального імпульсу, що посилається в матеріал. Величина амплітуди відбитого імпульсу оцінюється другим за рахунком імпульсом на екрані. Для вимірювання коефіцієнта загасання між цими двома, імпульсами строб-імпульс 3 установлюється з перекриттям цих імпульсів. У даному випадку йде вимірювання і розрахунок коефіцієнта загасання, коефіцієнта α (Дб/м) за формулою 5.11 – з видачею на цифрове табло. Конструкція дефектоскопа передбачає визначення коефіцієнта загасання тільки між зондувальним і першим відбитим імпульсом.

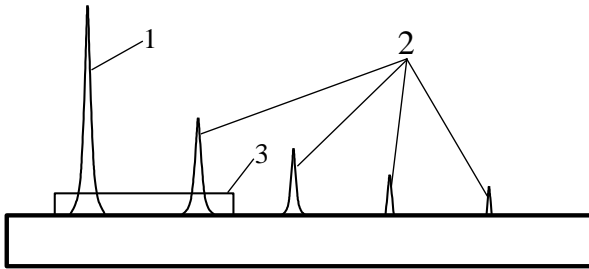


Рис. 5.16 Розташування зондувального і відбитого імпульсів на екрані осцилографа:

1 – імпульс зондування; 2 – імпульсного відбиття, 1-го, 2-го і т. ін; 3 – строб-імпульс

Методи вимірювання внутрішнього тертя висувають досить жорсткі вимоги до розмірів і форми досліджуваних зразків. Тому підготовці зразків приділялася особлива увага.

Схема вимірювання коефіцієнта загасання вихідної структури матеріалів подана на рис. 5.17, а. Як зразки 3 використовуються такі матеріали: сталі, чавуни, бронзи, котрі широко застосовуються в машинобудуванні. П'єзoeлемент 2 виконаний з цирконат – титанату свинцю, типу ЦТС-19, що дозволяє працювати в діапазоні температур до 250 °С.

Для виміру температурної залежності зміни коефіцієнта загасання вихідної структури призводиться нагрівання зразка 3 від електронагрівача з реєстрацією об'ємної температури зразка хромель-капельової термомпарі.

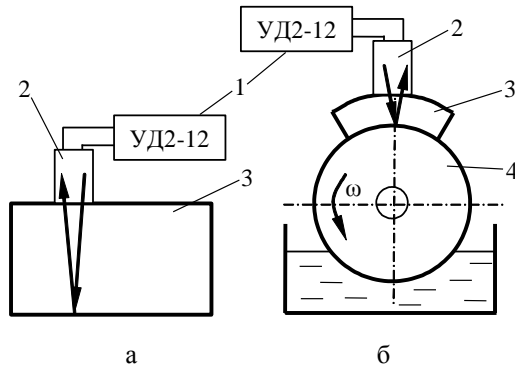


Рис. 5.17 Схеми виміру коефіцієнта затухання ультразвукових імпульсів в матеріалах: *а* – в статичних умовах; *б* – в процесі роботи вузла тертя; 1 – ультразвуковий дефектоскоп; 2 – п'єзоелемент; 3 – нерухомий елемент; 4 – рухомий елемент

Вимір коефіцієнта загасання α проводиться на частоті 5 МГц. Дефектоскоп УД2-12 дозволяє також працювати на частотах 2,5 і 10 МГц. З підвищенням частоти ультразвукових коливань і потужності зондувальних імпульсів росте чутливість методу. Оптимальну частоту ультразвукових коливань вибирають у залежності від зернистості матеріалу деталі і розмірів деталі. Так, для бронз довжина хвилі $\lambda = 1,4$ мм при $f = 2,5$ МГц; $\lambda = 0,7$ мм при $f = 5$ МГц і $\lambda = 0,35$ мм при $f = 10$ МГц. При середньому розмірі діаметра зерна $D = 70$ мкм, $\lambda = 10D$. Як відзначалося, при такому співвідношенні довжини хвилі і середнього розміру діаметра зерна загасання ультразвукових коливань буде зв'язано в основному з релеєвським розсіюванням і теплопровідністю.

Збільшення частоти коливань пов'язано з великими труднощами їхнього введення в метал, вони швидко загасають і дальність прозвучування зменшується.

Характер зміни внутрішнього тертя в процесі припрацювання. Поряд з такими факторами, як швидкість ковзання і навантаження, на зміну внутрішнього тертя матеріалів трібосистеми в процесі її роботи буде значно впливати і структура матеріалу.

Вивчення впливу структури матеріалу нерухомого зразка на характер зміни внутрішнього тертя. Випробування проводяться на парах: "сталь 40Х + Бр.АЖ 9-4" і "сталь 40Х + сірий спеціальний чавун (ЧСпец.)". Навантаження є оптимальним і рівним величині – 1000 Н, швидкість ковзання – 0,5 м/с, середовище – олива ВНИИ НП 403.

Для вивчення даного питання обираються два матеріали – бронза і сірий чавун, що мають майже однакове внутрішнє тертя вихідної структури, однак дуже сильно відрізняються за своїми фізико-механічними характеристиками.

Характер зміни моменту тертя і коефіцієнта загасання для даних обох пар у залежності від часу роботи показаний на рис. 5.18, 5.19 – для пари "сталь 40X + Бр.АЖ 9-4", рис. 5.19 – для пари "сталь 40X + ЧСпец".

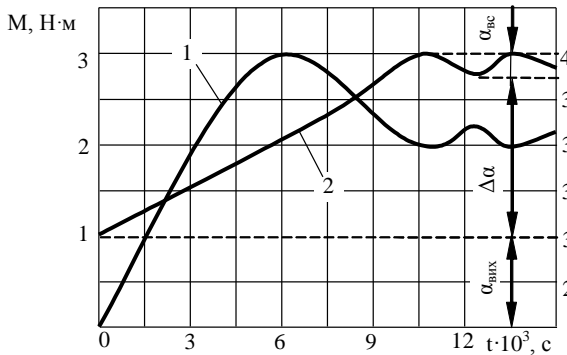


Рис. 5.18 Залежності зміни моменту тертя $M(1)$ і коефіцієнта затухання $\alpha(2)$ по часу t для пари тертя сталь 40+Бр.АЖ 9-4 в середовищі оливи ВНИИ НП 403

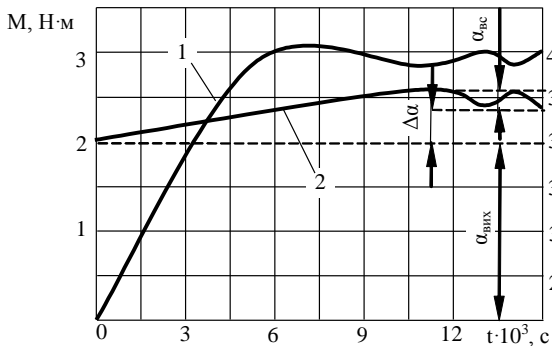


Рис. 5.19 Залежність зміни моменту тертя $M(1)$ і коефіцієнта затухання $\alpha(2)$ за часом t для трібосистеми тертя "сталь 40X + сірий чавун (ЧСпец)" у середовищі оливи ВНИИ НП 403

З аналізу отриманих залежностей випливає, що для процесу припрацювання, протікання якого можна простежити по поведженню моменту тертя (крива 1), характерно плавне збільшення внутрішнього тертя (коефіцієнта загасання, крива 2) – від значення для вихідної структури матеріалу ($\alpha_{вих}$ до визначеного значення $\alpha_{вих} + \Delta\alpha$). Збільшення на величину $\Delta\alpha$ як уже відзначалося, пов'язано з

формуванням поверхневих структур тертя. Причому для пластичного матеріалу – бронзи, рис. 5.18, це збільшення значне і складає майже 40% вихідної структури матеріал, а для крихкого матеріалу – чавуну, рис. 5.19, воно рівняється всього 11%. Данні обставини пояснюються пластичними властивостями матеріалів, а внаслідок, і механізм дисипації енергії що підводиться.

Механічна енергія, що підводиться при терті, передаючи в матеріал трибоелементів за допомогою хвиль напруги, розсіюється в результаті внутрішнього тертя, природа якого різноманітна. Механізм розсіювання залежить від типу матеріалу, характеристик хвильового фронту, структури активного шару і може проявлятися у формах від релаксаційного до гістерезисного.

З енергетичної точки зору, висока зносостійкість забезпечується при умовах, коли основна частина роботи сил тертя перетворюється в теплоту, тобто при реалізації високого внутрішнього тертя.

Джерелами внутрішнього тертя можуть служити процеси, що впливають на дисипацію енергії коливань: термо- і магніто-пружний ефекти, дислокаційного гістерезису, розсіювання енергії на різних недосконалостях мікроструктури металу (дислокаціях, розчинених атомах, дефектах упакування, границях зерен, двійникові границі).

Релаксаційні процеси при взаємодії бронзи пов'язані головним чином з атомною і тепловою перебудовою, а також обумовлені наявністю широкого діапазону часу релаксації процесів, зсуву і міграції дефектів кристалічної будови в поле напруг. Справа в тім, що реологічно бронза полікомпонентна, окремі її компоненти мають різні пружно-в'язкі і пружно-пластичні властивості, тому релаксаційні процеси будуть протікати в різних місцях і з різною швидкістю. При цьому спостерігається зменшення інтенсивності зношування і підвищення навантаження задиру при роботі таких трібосистем.

Чавуни належать до матеріалів з різко вираженою гетерогенною структурою і являють собою тверду міцну матрицю з м'якими пластичними включеннями надлишкової фази. При циклічному навантаженні основна частина структури (матриця) випробує лише пружну деформацію, а включення деформуються мікропластично, що і викликає високе внутрішнє тертя. Одним із джерел розсіювання енергії служать границі розділу "графіт – металева основа". Тертя, що виникає на цих границях, унаслідок циклічної деформації порожнини, зайнятої графітом, релаксує зовнішню напругу.

5.6 Вибір сумісних матеріалів в трібосистему

За допомогою отриманих результатів була складена схема вибору матеріалів у трібосистему (рис. 5.20).

Трібосполучення представлено у виді двох відрізків, нижній з яких відповідає рухомому елементу трібосистеми, а верхній – нерухомому. Ширина відрізка визначає можливість структури матеріалу збільшувати внутрішнє тертя за рахунок формування поверхневих структур ($\Delta\alpha + a_{a,c}$). На лівому кі-

нці відрізка позначено значення коефіцієнта загасання ультразвукових імпульсів у вихідній структурі матеріалу $a_{вих}$, а на правому – максимально можливе, котре сформується в процесі прироблення $a_{пр.маx}$. Схема відображає три широко застосовуваних сполучення матеріалів: сталь + сталь; сталь + чавун; сталь + бронза.

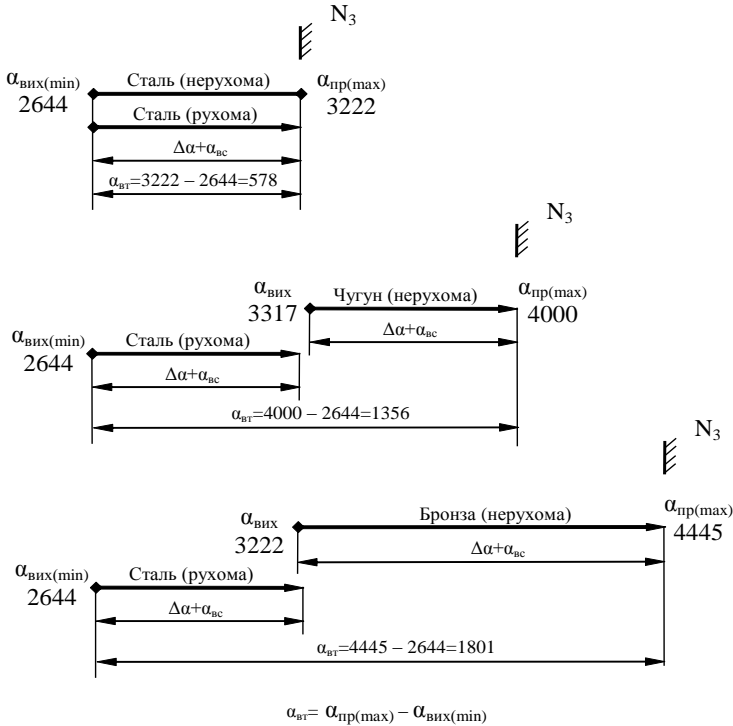


Рис. 5.20 Схема вибору матеріалів у трібосистему в залежності від зміни коефіцієнта затухання α

Як показали результати експериментальних досліджень, гарну сумісність забезпечує широкий діапазон зміни внутрішнього тертя α_{vit} структури обох матеріалів, тобто діапазон структурної пристосовуваності:

$$a_{e.m} = a_{np(max)} - a_{вих(min)}, \quad (5.13)$$

де $a_{np(max)}$ – максимально можливий коефіцієнт затухання ультразвукових імпульсів в одному з матеріалів трібосистеми, котра формується в процесі припрацювання;

$a_{вих(min)}$ – мінімальна величина коефіцієнта затухання ультразвукових імпульсів в вихідній структурі одного з матеріалів трібосистеми.

Чим більше a_{em} , тим нижче інтенсивність зношування і вище навантаження задиру N_3 , котра відображена на рис. 5.21.

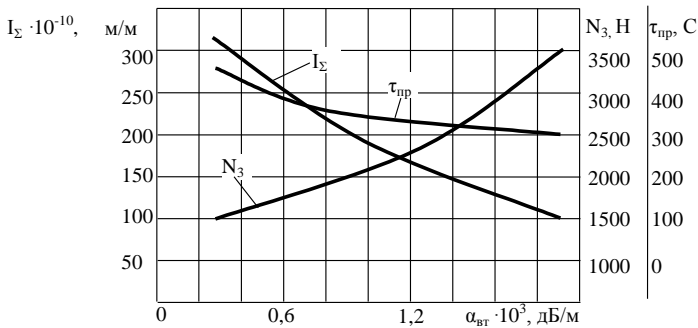


Рис. 5.21 Залежність зміни сумарної інтенсивності зношування I_{Σ} , навантаження задиру N_3 , і часу припрацювання $\tau_{пр}$, від діапазону зміни внутрішнього тертя обох матеріалів α_{em}

Якщо внаслідок режиму роботи пари a_{em} досягає критичного значення, тобто вичерпуються механізми релаксації енергії, що підводиться, настає схоплювання як особлива форма структурної релаксації.

Відповідно до даної схеми для гарної сумісності матеріалів в трібосистемі як рухомий елемент пари допускається мати матеріал з мінімальним внутрішнім тертям – $a_{внх(min)}$, з можливістю його збільшення в процесі припрацювання. Як показали дослідження, структура рухомого елемента слабо впливає на сумарну інтенсивність зношування і навантаження задиру. У практиці такі матеріали вибирають як загартовані сталі, що мають низьке внутрішнє тертя вихідної структури матеріалу, однак здатні до його збільшення завдяки мікропластичності.

Вибору структури матеріалу нерухомого елемента варто приділяти особливу увагу. Внутрішнє тертя вихідної структури таких елементів повинно бути високим і мати широкі можливості до його збільшення в процесі припрацювання, за рахунок різних механізмів релаксації енергії. Мати високе внутрішнє тертя вихідної структури, як було показано раніше, недостатньо, навіть якщо матеріал гетерогенний. Викладений висновок підтверджує приклад з чавуном, що застосовувався як нерухомий елемент трібосистеми.

Даною схемою можна пояснити погану працездатність трібосистем, що мають однойменні матеріали, наприклад: сталь + сталь; чавун + чавун; бронза + бронза. Це пов'язано з вузьким діапазоном зміни внутрішнього тертя a_{em} , рис. 5.20.

Експериментальні дослідження довели, що застосовувати сполучення матеріалів: сталь + сталь; сталь + чавун; чавун + чавун можна лише трібосистемах з високими питомими навантаженнями, тобто, на вищих кінематичних трібосистемах. За рахунок високих питомих навантажень можлива інтенсивна перебудова структури матеріалів і збільшення a_{em} . У будь-якому випадку, навіть при однакових марках сталей, їхня термообробка повинна відрізнятися – це призведе до розширення a_{em} .

З приведених результатів випливає, що при сполученні матеріалів, які мають широкий діапазон a_{em} , допускається застосування мастильного середовища з гіршими властивостями, однак на матеріалах з невеликим a_{em} мастильний матеріал повиний мати гарні мастильні властивості. Наявність поверхнево- і хімічно-активних речовин у мастильному матеріалі буде сприяти розширенню діапазону a_{em} , тим самим збільшуючи внутрішнє тертя матеріалів трібосистеми.

6 ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

6.1 Контакткування поверхонь тертя і процес їх припрацювання

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

На рис. 6.1 показані основні характеристики геометрії шорстких поверхонь: шорсткість з максимальною висотою профілю R_{max} , хвилястість з максимальною висотою хвилі R_{Wmax} і макровідхилення від горизонтальної базової площини з розміром δ .

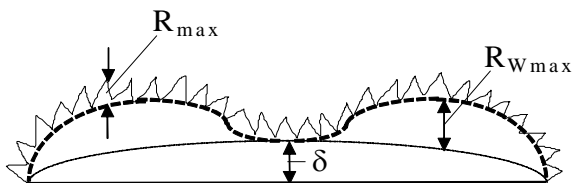


Рис. 6.1 Основні характеристики геометрії шорстких поверхонь

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

На рис. 6.2 зображена схема сучасного профілографа. Голка 1 ковзає по шорсткій поверхні і разом з якорем 2 коливається відносно призми 3, у результаті чого міняється зазор між якорем 2 і сердечником 4, який генерує змінний сигнал у котушках 5 і 6, що підсилюється блоком 7 та реєструється на стрічці 10 самописа 8, а також стрілочним приладом 9. Мікропроцесор 11 призначений для обчислення стандартних показників мікрогеометрії, що зображуються на цифровому табло. Для виключення впливу хвилястості призма приладу прикріплена до кульової опори 12. Кульова опора забезпечує ковзання по вершинах мікровиступів, обгинаючи хвилі, оскільки, якщо опора буде ковзати по плоскій гладкій поверхні, то одночасно будуть записуватися шорсткість і хвилястість (рис. 6.1). Прилад дозволяє змінювати в широкому діапазоні масштаб збільшення по осях X і Y . Можливе збільшення по осі Y до 100 000 разів.

В останні роки розроблено методи отримання профілограм на електронних скануючих мікроскопах. Розділення у цьому випадку досягає нанометрів. Вдається реєструвати шорсткість молекулярних розмірів (субмікросорст-

кість), а також мікроефекти кристалічної структури.

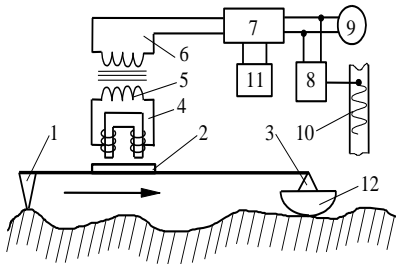


Рис. 6.2 Схема профілографа

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

Встановлені цим стандартом характеристики шорсткостей ілюструє рис. 6.3. Основні з них висотні: R_a , R_z і R_{max} і крок мікронерівностей.

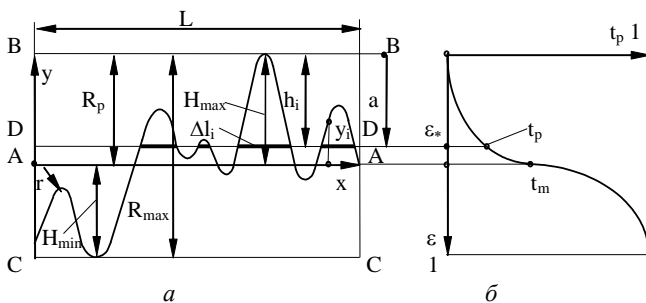


Рис. 6.3 Характеристики шорсткостей
 a – характеристики шорсткостей; b – опорна крива

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

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (6.1)$$

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

y_i – відстань точки профілю від середньої лінії (рис. 6.3, a);

n – кількість точок профілю, у яких виміряна y_i .

Положення середньої лінії AA знаходиться з припущення, що вона поділяє площу профілю навпіл $\left(\int_0^L y dx = 0 \right)$. Профіль укладений між лініями виступів BB і западин CC , що проводяться через вершини найвищих виступів і найнижчі точки западин.

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

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |H_{i_{\max}}| + \sum_1^5 |H_{i_{\min}}| \right). \quad (6.2)$$

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

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

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

$$r_{cp.} = \sqrt{r_{cp.lp.no\ddot{v}} \cdot r_{cp.non\ddot{e}p.}} \quad (6.3)$$

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

$$t_p = \frac{1}{L} \sum_1^m \Delta L_i \quad (6.4)$$

від відносного зближення:

$$\varepsilon_* = \frac{a}{R_{max}} \quad (6.5)$$

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

$$t_p = t_m \varepsilon^\nu, \quad (6.6)$$

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

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

$$n = n_0 \left(\frac{a}{R_p} \right)^{\nu-1}, \quad (6.7)$$

де n_0 – кількість виступів, вершини яких лежать вище середньої лінії.

Використовуючи стандартні характеристики, вирішують задачу по оцінці фактичної площі контакту шорстких поверхонь.

Вплив шорсткості на формування площі фактичного контакту. На рис. 6.4 показана структурна схема площі контакту. Площадки фактичного контакту ΔA_{fi} згруповані на площах дотику хвиль, сукупність яких складає контурну площу контакту A_{ci} . Загальна площа дотику тіл (удавана), у межах якої знаходяться фактичні площі контакту, називається номінальною площею контакту A_a .

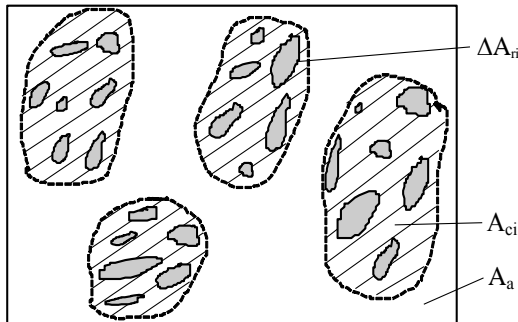


Рис. 6.4 Структурні компоненти реального контакту шорстких поверхонь:

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

ΔA_{fi} – фактична площа одиначної плями контакту

Сумарна площа фактичного контакту:

$$A_r = \sum_1^n \Delta A_{r_i} . \quad (6.8)$$

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

Розглянемо на рис. 6.5 контакт шорсткої поверхні з гладкою, що спрощує задачу, а результати можна перенести на контакт двох шорстких поверхонь. Оскільки у трибосистемах деформація виступів невелика порівняно з їх розміром, то можна знехтувати спотворенням форми і вважати, що площа контакту A_{r_i} дорівнює площі перетину виступу на відстані від вершини рівному деформації a_i , яку називають зближенням.

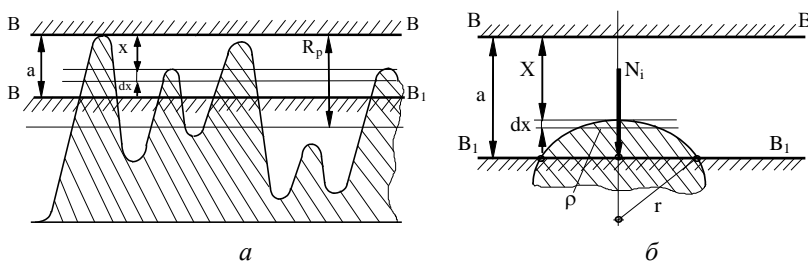


Рис. 6.5 До аналізу оцінки фактичної площі контакту

Спочатку розглянемо деформацію одного виступу (рис. 6.5). При пружній деформації фактична площа контакту і зближення розраховуються за формулами Герца:

$$\Delta A_{r_i} = 0,82\pi(jN_i r)^{2/3}; \quad (6.9)$$

$$a_i = 0,82(jN_i / \sqrt{r})^{2/3}, \quad (6.10)$$

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

θ_1, θ_2 – коефіцієнти Пуасона;

E_1, E_2 – модулі Юнга для першої і другої поверхонь;

N – нормальне навантаження; r – радіус виступу.

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

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

$$\Delta A_{ri} = N_i / HB, \quad (6.11)$$

$$a_i = N_i / 2\pi HB, \quad (6.12)$$

де HB – твердість за Бринелем, що визначається як частка від розподілу навантаження на площу відбитка, який залишився після проникнення твердої кульки в пластичний матеріал.

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

$$\rho_i^2 = r^2 - (r - a_i)^2 \cong 2a_i r, \quad (6.13)$$

$$\Delta A_{ri} = \pi \rho_i^2 \cong 2\pi a_i r, \quad (6.14)$$

звідси

$$a_i \cong \Delta A_{ri} / 2\pi r \cong N_i / 2\pi HB. \quad (6.15)$$

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

$$\Delta A_{ri} = \alpha \cdot \Delta A_{si}, \quad (6.16)$$

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

$$A_r = \alpha A_s = \alpha A_c t_p = \alpha \cdot A_c \cdot t_m \varepsilon^V = \alpha A_{so} \left(\frac{a}{R_p} \right)^V. \quad (6.17)$$

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

$$t_p = \sum_1^m \Delta L_i / l = \sum_1^n \Delta A_{si} / A_c = A_s / A_c, \quad t_m = A_{so} / A_c, \quad (6.18)$$

де A_{so} – сума перетинів виступів на рівні середньої лінії;

A_c – контурна площа контакту.

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

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

$$v_\Sigma = v_1 + v_2; \quad (6.19)$$

$$b_\Sigma = K_2 t_{m_1} \cdot t_{m_2} R_{p_\Sigma}^{v_\Sigma} / R_{p_1}^{v_1} R_{p_2}^{v_2}; \quad (6.20)$$

$$R_{p_\Sigma} = R_{p_1} + R_{p_2}; \quad (6.21)$$

$$r_\Sigma = r_1 r_2 / (r_1 + r_2). \quad (6.22)$$

$$\text{Тут } K_2 = \partial(v_1 + 1) \partial(v_2 + 1) / \partial(v_1 + v_2 + 1). \quad (6.23)$$

Індекси 1, 2 відносяться до першої і другої поверхонь.

Якщо поверхні мають яскраво виражену хвилястість, то її параметри визначають з хвилеграм, які знімаються за допомогою профілографів, і використовують математичний опис, розроблений для шорсткого шару. Контурну площу контакту можна розрахувати за формулою:

$$A_c = \left(\frac{2R_{max}}{H_B} \right)^{v+\omega} \left(\frac{r}{2R_{max}} \right)^\omega \left(\frac{2K_4 N A_a \frac{v+\omega}{v_\omega}}{\alpha M} \right)^{\frac{v_\omega}{v_\omega + v + \omega}}, \quad (6.18)$$

де H_B – найбільша висота хвилі;

A_a – номінальна площа контакту;

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

v_ω – параметр опорної кривої для хвилястості;

K_4 – стала інтегрування;

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

Якщо хвилястість виражена слабо ($H_B \leq R_{max}$), то нею можна знехтувати.

Окремо зупинимося на формуванні фактичної площі контакту гуми, оскільки вони широко використовуються у трібосистемах і механізмах, особливо, в автотранспортних засобах. Гуми, незалежно від природи (на основі натуральних або штучних каучуків), мають надзвичайно низький модуль пружності (порядку 5...30 МПа). Коефіцієнт Пуассона в них близький до 0,5, отже, навіть при невеликих тисках вони підпорядковуються закону Паскаля, поведуться як рідини. На відміну від твердих тіл, уже при тиску порядку значення модуля пружності, фактична площа контакту в них наближається по величині до номінальної площі. На рис. 6.6 показаний зразковий графік залежності фактичної площі контакту від номінального тиску.

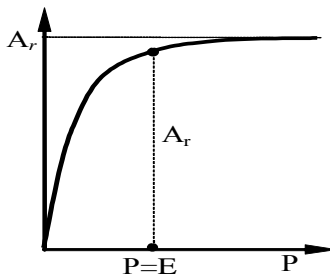


Рис. 6.6 Залежність площі фактичного контакту гуми від номінального тиску

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

$$A_r = A_a \left(1 - K_1 e^{-\delta(N/A_a E)^{2/3}} \right), \quad (6.19)$$

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

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

в часі. Швидкість наростання деформації збільшується з підвищенням температури.

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

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

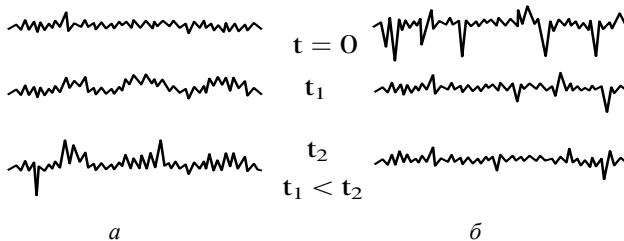


Рис. 6.7 Зміна мікрогеометрії поверхні тертя в процесі припрацювання: *a* – вихідна поверхня гладка; *б* – вихідна поверхня шорстка

На рис. 6.8 показано характер зміни шорсткості поверхонь тертя в процесі припрацювання. Крива 1 відповідає процесу припрацювання, коли початкова шорсткість нижче оптимальної. Крива 3 відповідає процесу, коли початкова шорсткість більше оптимальної. Більш привабливим є процес припрацювання за кривою 2, коли початкова шорсткість відповідає оптимальній. В

такому випадку час припрацювання буде мінімальним.

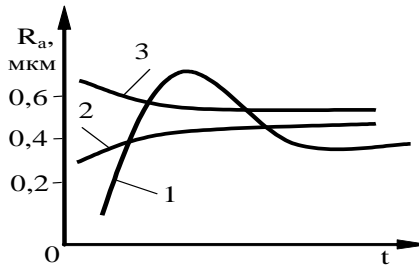


Рис. 6.8 Зміна шорсткості поверхонь тертя з різною вихідною шорсткістю в процесі тертя

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

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

6.2 Легування матеріалів для трибоелементів

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

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

Виявлення фізичних механізмів структурної пристосовуваності створює основу для розвитку теорії легування і розкриває принципово нові можливості практичних рішень для забезпечення максимальної поверхневої міцності,

антифрикційності і фрикційності матеріалів шляхом обґрунтованого вибору легуючих елементів та їхніх комплексів.

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

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

Нові та надзвичайно широкі можливості керування тертям і зношуванням сталі й чавунів пов'язані з дослідженням впливу легуючих елементів на процеси утворення і властивості вторинних структур, що виникають безпосередньо при терті та роблять вирішальний вплив на діапазон і рівень структурної пристосованості. Вивчено вплив хрому, нікелю, молібдену, алюмінію і вуглецю на швидкість утворення вторинних структур та їх властивості.

Вплив легування сталі нікелем і хромом на зміщення електрохімічного потенціалу, який визначає стан вторинних структур на поверхні тертя сталі показано на рис. 6.9. Зі збільшенням вмісту нікелю в сталі час утворення вторинних структур при терті τ зростає, і, відповідно, перехід до динамічної рівноваги утворення і руйнування вторинних структур сповільнюється. Зі збільшенням вмісту хрому час утворення вторинних структур τ зменшиться, а перехід до стану рівноваги проходить швидше. Стале значення електрохімічного потенціалу $\Delta\phi$ значно збільшується.

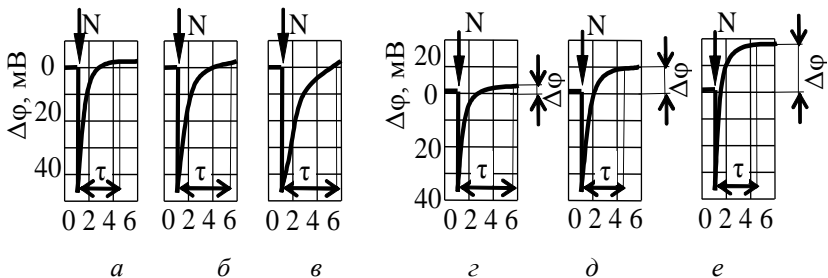


Рис. 6.9 Вплив вмісту нікелю (а, б, в) і хрому (г, д, е) на кінетику утворення вторинних структур при нормальному зношуванні ($P = 3$ МПа, $V = 1,0$ м/с) сталей:

а – 20X; б – 20XN; в – 20XN3A; г – 40; д – 40X; е – 4X13.

Сталі з приблизно однаковими механічними властивостями можуть мати суттєво різну зносостійкість (рис. 6.10).

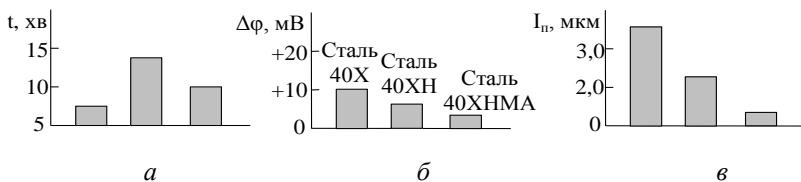


Рис. 6.10 Вплив легуючих елементів на властивості сталі при терті: *a* – час утворення вторинних структур; *б* – електрохімічні властивості структур; *в* – величини зносу

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

На рис. 6.11 показана зміна зон нормального механохімічного зношування (I) і пошкоджуваності (II) сталі при зміні нормального тиску p і швидкості відносного переміщення V в залежності від легуючих елементів.

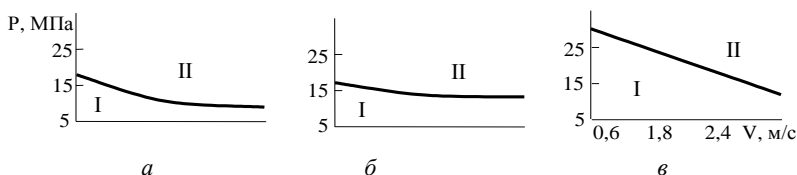


Рис. 6.11 Діаграма режимів нормальної експлуатації сталі 40 (*a*), сталі 40X (*б*), сталі 40XNM (*в*): I – зона структурної пристосовуваності; II – зона пошкоджуваності

При легуванні хромом і молібденом збільшується зона нормальних процесів (рис. 6.12, *a*). При легуванні нікелем і алюмінієм ця зона різко звужується (рис. 6.12, *б*). При легуванні одночасно хромом, нікелем і молібденом зона нормального зносу різко збільшується (рис. 6.11, *в*).

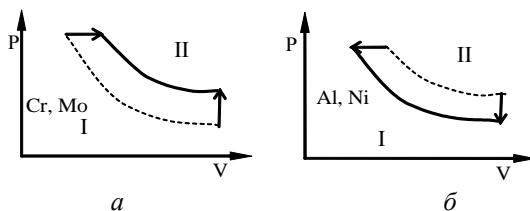


Рис. 6.12. Схема впливу легуючих елементів – хрому і молібдену (*a*), алюмінію і нікелю (*б*) на діапазон навантажень і швидкостей ковзання при нормальній експлуатації сталей:

I – зона структурної пристосовуваності; II – зона пошкоджуваності

6.3 Методи створювання поверхневого зміцнення матеріалів

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

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

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

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

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

Поверхнєве загартування з електроконтактним нагріванням здійснюється шляхом пропущення змінного струму через контакт деталі з електродом у

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

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

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

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

Ефективним методом підвищення зносостійкості деталей є лазерне легування з одночасним загартуванням поверхневого шару. Поверхня, яка підлягає обробці, покривається тонким шаром речовини, що містить легуючі елементи. Так само, як і при лазерному загартуванні, промінь сканує по поверхні деталі. Однак режим сканування підбирається таким, щоб температура в мікрооб'ємах поверхні забезпечувала плавлення. У такий спосіб проплавляється весь поверхневий шар. У процесі плавлення легуючі елементи впроваджуються в криста-

лічні решітки матеріалу деталі. Позитивним є те, що через високу швидкість нагрівання і подальшого охолодження, крім твердих розчинів легуючих елементів, у матеріалі деталі виникають метастабільні структури з надлишковим у порівнянні з твердим розчином вмістом легуючого елемента. Таким чином, виникає можливість проникнення в кристалічні ґрати навіть такого елемента, з яким речовина деталі взагалі не може утворити твердого розчину. Такі метастабільні структури, будучи міцно пов'язані з основою, володіючи при цьому надвисокою твердістю, забезпечують різке підвищення зносостійкості.

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

6.3.1 Хіміко-термічна обробка деталей машин

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

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

Азотуванню піддаються сталеві деталі при більш низьких, ніж при цементуванні, температурах: 520...560 °С. Легуючі елементи, що входять до складу сталі (Cr, Mo, V, Al), утворюють з азотом стійкі нітриди. Найбільшу твердість надає алюміній, однак поверхневий шар набуває підвищену крихкість і спостерігається спотворювання форми виробу. Азотування надає деталям високу циклічну міцність і відповідно стійкість проти втомного зношування. Крім зносостійкості, азотування надає деталям і високу корозійну стійкість.

Зносостійкість зберігається при нагріванні до 500...600° С, у той час, як при нагріванні цементованої поверхні вище 225...275 °С, твердість її, а отже і зносостійкість знижуються. Недоліком методу є збільшення деталей у розмірі та їх скороблення. Тому азотовані елементи деталей піддають остаточній обробці у вигляді полірування або шліфування.

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

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

6.3.2 Електрохімічні і хімічне формування зносостійких покриттів

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

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

Срібло наноситься гальванічним методом, переважно на деталі електроконтактних пристроїв. Застосування срібних, а також золотих і паладієвих покриттів дозволяє різко знизити перехідний опір у ковзних електричних контактах. Викор-

ристання срібла як антифрикційного матеріалу виявилось малоефективним.

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

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

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

Важливе значення має нанесення захисної оксидної плівки на поверхню деталей з алюмінію і його сплавів. Оксидна плівка має високу твердість і при хімічному оксидуванні має товщину до 5 мкм. Пориста плівка просочується мастилами, що містять колоїдний графіт, або дисульфід молібдену, які надають підшипниковим вкладишам високої антифрикційної властивості. Часто захисні плівки товщиною до 3мм одержують електрохімічним шляхом методом глибокого анодування. Створення плівки відбувається як за рахунок проникнення всередину деталі, так і нарощування на поверхні. Таким чином, збільшується

розмір деталі. Добрий результат дає глибоке анодування поршнів двигунів внутрішнього згорання. В результаті цього процесу різко знижується знос і підвищується надійність через зменшення імовірності заклинювання.

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

Одним з ефективних способів хімічної обробки поверхонь є сульфидування, яке полягає в збагаченні поверхневих шарів сталевих деталей сіркою. Сульфидування проводять у рідкому, твердому або газових середовищах, що містять сірку. Воно може бути низько-, середньо- і високотемпературним (150...450 °С, 540...580 °С, 850...950 °С відповідно). У залежності від поєднання сірчастого середовища, температури і тривалості процесу поряд з Fe, Fe₂ утворюються і інші залізо-сірчані сполуки. Рідке сульфидування здійснюється в соляних ваннах. Глибина сульфидованого шару досягає 50 мкм. Різновидом сульфидування є сульфоціанування, при якому поверхня одночасно насичується сіркою, азотом, вуглецем при температурі 540...580 °С в рідкому середовищі. Застосовується і сульфидування у твердому середовищі порошку сірчастого заліза. Шорсткість поверхонь, які пройшли сульфидування, значно вища вихідної, трохи збільшуються розміри деталей. У процесі експлуатації сульфідна плівка менш міцна, ніж основний метал, легко руйнується і відокремлюється, запобігаючи схоплюванню. Сульфідний шар і м'які слабкоабразивні продукти зносу мають високу адсорбційну здатність і активують молекули оливи. Завдяки цим властивостям припрацьовування прискорюється і швидко встановлюється рівноважна шорсткість з високою якістю, що наближається до 9...10 класу. Цікаво те, що в міру зносу під впливом температури і тиску атоми сірки дифундують усередину поверхні, підвищуючи антифрикційні властивості. У результаті насичення сіркою шар значно перевищує первісний за своїми протизносними властивостями. Завдяки циркуляції мастильного матеріалу, наявності сульфидованих деталей поліпшується умова роботи всіх тертьових пар, тому що сульфіди, які переносяться оливою, попадають на всі поверхні тертя. Сульфоціанування, на додаток до сульфидування, не тільки прискорює припрацьовування, але й істотно підвищує зносостійкість за рахунок підвищення твердості і утомної міцності. Сульфидують і сульфоціанують сталеві підшипники ковзання, нарізні сполучення, деталі шарнірів.

Сучасні методи створення захисних плівок на поверхнях відповідальних деталей засновані на використанні хімічного впливу газового середовища при певних значеннях температури і тиску (іноді з застосуванням пучків при-

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

6.3.3 Механотермічне формування зносостійких покриттів

Метод механотермічного формування полягає в тому, що захисний шар кристалізується з розплаву металу в стиснутих умовах під навантаженням. При цьому в ньому відсутні порожнини і наскрізні пори, основний метал практично не плавиться і не потрапляє в наплавлений шар, що надійно з'єднується з основою. Використовують дві технологічних схеми: фрикційне і електроконтактне формування.

Перша технологічна схема містить у собі притиснення з певним зусиллям до поверхні деталі сухарів з матеріалу майбутнього покриття. Можливий і інший варіант, коли за допомогою пуансона притискається брикет із гранул або стружки. Поверхня, що потім покривається, із заданою швидкістю приводиться в циклічний рух. Матеріал, який наноситься, третється об поверхню деталі і на межі виділяється тепло. У певний момент часу температура контакту досягає точки плавлення. Плавлення, а отже формування зносостійкого шару, відбувається під тиском від 5 до 100 МПа при швидкості ковзання 1...8 м/с. При цьому час формування шару складає 5...70 с. Цим способом створюється покриття товщиною від 0,5 до 10 мм. На сталеву основу наносяться шари з мідних, алюмінієвих та інших сплавів. Метод має ряд обмежень. Він застосовується лише для деталей циліндричної форми, які приводяться в обертання. Температура плавлення матеріалу покриття повинна бути менше, ніж матеріалу основи. Цей метод успішно застосовується для створення мідного покриття на поверхнях гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання, що стимулює виникнення режиму виборчого переносу.

При електроконтактному формуванні тепло виділяється в результаті проходження електричного струму через гранульований матеріал, що має великим опором, який притискається з заданим тиском до поверхні деталі. Тут форма поверхні деталі може бути будь-якою. Температурні обмеження

теж відсутні. Таким методом на сталь наноситься широкий спектр матеріалів: леговані сталі, тверді сплави, зносостійкі композиції. У такий же спосіб здійснюється електроконтактне наплавлення, засноване на принципі контактного зварювання. Матеріал який наплавляється (звичайно у вигляді стрічки), притискається до поверхні деталі електродом. Між електродом і деталлю прикладається різниця потенціалів від 2 до 12 В. Як джерело струму можна використовувати зварювальний трансформатор. Якщо наплавляють довгомірні деталі, то електрод роблять у вигляді ролика, який котиться по деталі і здійснює приварку захисного покриття.

6.3.4 Наплавлення зносостійких шарів

Наплавлення – це один з найбільш розповсюджених способів відновлення зношених деталей. Існує велика кількість методів наплавлення, що відрізняються джерелами теплової енергії, способами захисту наплавленого металу, рівнем автоматизації.

У процесі наплавлення розплавлений метал, взаємодіючи з навколишнім середовищем (газами, шлаками та ін.), зазнає тих чи інших змін, пов'язаних з випаром деяких його складових при високих температурах, утворенням різних хімічних сполук, нерозчинних у металі. Ці зміни характерні як для основного металу, що перебуває у зварювальній ванні, так і для додаткового металу. Як відомо, останній при різних способах відновлення (наприклад, дугове наплавлення електродом, що плавиться, електрошлакове наплавлення) нагрівається до більш високих температур, ніж температура у ванні, і має більшу контактуючу із середовищем питому поверхню (відношення поверхні до обсягу). Тому всі процеси взаємодії з навколишнім середовищем, що відбуваються через поверхню, й інтенсифіковані більш високою температурою, призводять до більшої зміни складу додаткового металу, ніж розплавленого основного. Цей змінений у процесі зварювання додатковий метал називається наплавленим металом.

При наплавленні (зварюванні) рідкий метал, взаємодіючи з розплавленими шлаками, водяними парами і навколишнім повітрям, окисляється і насичується азотом, воднем та іншими елементами. Кисень, створює окисли (закис заліза FeO , окис заліза Fe_2O_3 й ін.), з'єднується з марганцем, кремнієм, вуглецем й іншими елементами, що сприяє їхньому вигоранню. Азот повітря з рідким залізом утворює нітриди (Fe_2N , Fe_4N). Наявність окислювання металу в умовах зварювання-наплавлення знижує механічні властивості металопокриттів і вимагає розкислення.

Підвищена кількість кисню й азоту в наплавленому металі надає йому підвищену твердість і крихкість, що сприяє утворенню тріщин. Пластичність і в'язкість такого металу досить низькі. При надмірному насиченні рідкого металу азотом у шві утворюються пори.

Водень у зварювальній дузі під дією високих температур з молекулярного стану переходить в атомарний й легко розчиняється в рідкому металі.

Для більшості металів при газовому або дуговому зварюванні звичайних металів на залізній й іншій основах спостерігається збільшення в рідкому

металі концентрації водню.

Розчинений водень у міру зниження температури прагне виділитися з розчину й вийти назовні. Він концентрується в охолодженому основному металі в окремих порожнинах усередині нього, а в металопокритті дифундує убік поверхні наплавленого металу і пришовних зон. Накопичуючись у різних нещільностях (вакансіях, дислокаціях, макропорожнечах), водень приводить до підвищення крихкості, виникненню додаткових внутрішніх напружень і пор, і появі мікротріщин у відновлюваному виробі. Тому на практиці досить важливим є максимальне видалення з металу наплавлення водню, кисню й азоту.

Зменшити наводнення металу в процесі його наплавлення можна шляхом застосування попереднього нагрівання деталі, а також наступною нормалізацією, а вміст кисню й азоту за рахунок надійного захисту зварювальної ванни й зони горіння дуги. Це досягається застосуванням відповідного складу зварювальних матеріалів, газового середовища (захисних газів, вакууму), шлаків і шлакових розплавів (флюси), активно взаємодіючих з навколишнім матеріальним середовищем.

Хімічний склад наплавленого металу багато в чому залежить від способу й режимів наплавлення та визначається в основному змістом легуючих елементів в електродному матеріалі і флюсі. Середні частини обсягу металу кожного окремого валика однопрохідного шва за хімічним складом виходять досить рівномірними навіть у тих випадках, коли розплавлені основний і наплавлений метали мають досить різні склади. Однак поблизу границі сплавки, де утворюється граничний шар у двофазному твердому-рідкому стані, не відбувається повне перемішування розплавленого основного металу й наплавленого. У зв'язку із цим у деякій зоні (звичайно в межах близько 5% глибини й напівширини ванни) внаслідок недостатнього перемішування склад металу виявляється відмінним від металу в середніх частинах ванни, а по легованості - проміжним між центральними обсягами ванни й основним металом. Чим більше розходження складів основного металу і металу шва, тим більше нерівномірним буде в цій перехідній зоні і склад металу шва поблизу границі плавлення.

Механічні властивості всього наплавленого (звареного) з'єднання в цілому - міцність, деформаційна здатність, енергоємність, місце й характер руйнування - перебувають у безпосередньому зв'язку з характером і ступенем механічної неоднорідності металу різних зон і ділянок такого з'єднання. Як відомо, при наплавленні (зварюванні) у результаті дії джерела тепла утворюється ванна розплавленого металу, який після затвердіння (кристалізації) утворює металевий зв'язок з нерозплавленими зонами відновлюваних деталей. При цьому метал наплавлення має або литу структуру (при одношаровому наплавленні-зварюванні), або структуру литого металу, який при наступних нагріваннях (при багатошаровому наплавленні) зазнає в окремих зонах додаткову термічну обробку. Така структура призводить до зниження комплексу механічних властивостей.

Якщо на відновлених наплавленнях ділянках виробу, температура пере-

вишувала критичну метал цієї зони має неоднорідну структуру, а отже, і різні з основним металом властивості. Тому в деяких випадках загальна працездатність деталі визначається властивостями певної ділянки зони термічного впливу, що повинно враховуватися на практиці.

За зоною термічного впливу розташовується не змінений за структурою основний метал деталі, властивості якого при відновленні (у випадку, якщо деталь при виготовленні не піддавалася хіміко-термічній й іншій поверхневій обробці) варто приймати за еталон. Одержання властивостей металу наплавлення, аналогічних еталону, гарантує надійність відновлюваним виробам. У ряді випадків вибір хімічного складу шва може привести до значного підвищення властивостей у порівнянні з основним металом, що забезпечує відновленим деталям більшу працездатність.

Одним з найбільш ефективних засобів поліпшення механічних характеристик металопокриттів є оптимальний підбір хімічного складу металу шва. Використання (при конкретному способі відновлення) правильно підібраних зварювальних матеріалів (припадочного або електродного дроту), а також введення у зварювальну вану легуючих добавок (через флюс, електродні покриття й ін.) і наступна обробка забезпечує відносно вирівнювання металопокриття із властивостями основного металу. При цьому виріб стає міцнішим. Крім того, для забезпечення спрямованого формування властивостей металопокриттів необхідний вибір раціонального способу та режимів відновлення. При цьому варто враховувати, що важливу роль серед наплавочних матеріалів мають сплави заліза, нікелю і кобальту зі значними кількостями хрому. Останній збільшує жароміцність, корозійну стійкість, твердість й ін.

Найбільше поширення отримало електродугове наплавлення, здійснюване ручним і напівавтоматизованим способами. При механізованому наплавленні замість окремих електродів застосовується згорнутий в бухту дріт або електродна стрічка.

Якщо наплавлений метал містить достатню кількість вуглецю (>0,4%), то зміною швидкості його охолодження можна одержати різні гартівні структури (троостит, мартенсит) і, отже, різну твердість.

Твердість наплавленого металу залежить від його структури. Присутність у структурі різного роду карбідів, нітридів й інших хімічних сполук сприяє значному збільшенню твердості й зносостійкості наплавленого металу.

Всі режими наплавлення, що впливають на утворення гартівних структур, впливають і на одержання більш твердих покриттів. Так, наприклад, зі зниженням робочої напруги дуги зменшується вигорання вуглецю та інших легуючих елементів з електродного дроту і більша їхня кількість попадає в наплавлений метал. Твердість наплавленого шару в цьому випадку завжди збільшується. Крім вуглецю, присутність у наплавленому шарі хрому, марганцю, вольфраму, титану, як правило, сприяє підвищенню його твердості. Підвищений зміст у шві марганцю й кремнію сприяє одержанню високих механічних властивостей наплавленого шару. Кремній зменшує кипіння зварювальної ванни і метал ви-

ходить більш щільним, а марганець зменшує схильність металу до гарячих тріщин, у результаті підвищуються механічні властивості металу шва. Структура наплавленого металу залежить від його хімічного складу й швидкості охолодження. Зносостійкість наплавленого металу в основному визначається його структурою й твердістю. Тому всі умови наплавлень, що сприяють одержанню металу з підвищеною твердістю, у більшості випадків забезпечують одержання найбільш зносостійких покриттів. Всі види наплавлення призводять до виникнення в наплавленому металі залишкових напруг. Стискаючі напруги підвищують границю витривалості, а розтягуючі - знижують.

Походження внутрішніх напружень та їхній вплив на відновлювану деталь обумовлені цілим рядом причин. Основними причинами виникнення внутрішніх напружень у виробі при напавленні є зміна температурного та об'ємного стану і відсутність вільного переміщення ділянок, що нагрівають. Ефективним засобом для створення в металопокриттях напруг стискування є пластична деформація поверхневих шарів, здійснювана або вхолонду, або із застосуванням електроконтактного нагрівання, чи нагрівання струмами високої частоти, відомого під назвою електромеханічної, або поверхневої термомеханічної обробки.

Напавлення в середовищі вуглекислого газу – один з найбільш поширених способів (рис.6.13). Цей процес напавлення відзначається високою технологічністю і продуктивністю. Може використовуватись для напавлення поверхонь різної конфігурації. В зв'язку з підвищеною активністю розплавленого металу він потребує захисту від взаємодії з повітрям, захисну роль в процесі напавлення можуть виконувати інертні гази (аргон, гелій), але їх використання значно впливає на собівартість відновлення. Найбільше розповсюдження отримав вуглекислий газ (CO_2).

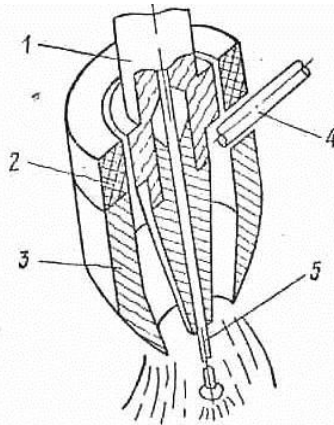


Рис. 6.13 Схема напавлення у середовищі вуглекислого газу:
1 – мундштук; 2 – ізоляційна шайба; 3 – корпус пальника; 4 – штуцер підведення захисного газу; 5 – електродний дріт

Основними недоліками наплавлення в середовищі вуглекислого газу є можливість появи тріщин, а також вигорання легуючих елементів. Цьому сприяє те явище, що при високих температурах вуглекислий газ розкладається на оксид вуглецю (СО) і атомарний кисень (О), який взаємодіє з розплавленим металом і окислює його. Запобігти цьому явищу можливо при використанні електродного дроту з підвищеним складом марганцю, кремнію, хрому, титану та інших розкислювачів. До недоліків процесу слід віднести також значне розбризування металу (до 10...12%).

Для наплавлення деталей використовується електродний дріт двох типів: зварювальний - Св та наплавлювальний – Нп. Вони розподіляються:

а) низько вуглецевий – основні марки Св – 08; Св – 08А; Св – 15; Св – 08Г; Св – 15Г, Св – 15Г2.

б) легований - Св – 08ГС; Св – 08Г2С; Св – 10ГН; Св – 18ХГС.

в) високолегований - Св – 12Х13; Св – 08Х14ГНТ, Св – 13Х25Т.

Зварювальний дріт використовується для наплавлення маловуглецевих та деяких низьколегованих сталей.

Для наплавлення легованих та високолегованих сталей використовується дріт з легованих та високолегованих сталей типу Нп по ДСТУ 3691-97 та ГОСТ 10543-98 наприклад - Нп – 18ХГСА, Нп 30ХГСА, Нп – 65Г, Нп - 80, Нп – 2Х13.

Під час наплавлення під шаром флюсу (рис. 6.14) порошковий флюс, безупинно подаваний у зону дуги, утворює над швом шлакову оболонку, яка через низьку теплопровідність зменшує швидкість охолодження наплавленого матеріалу і сприяє нормалізації структури. Вона також захищає шов від окислювання і запобігає розбризуванню металу, частка якого у шві коливається в межах 30...65%, що частково погіршує властивості захисного шару.

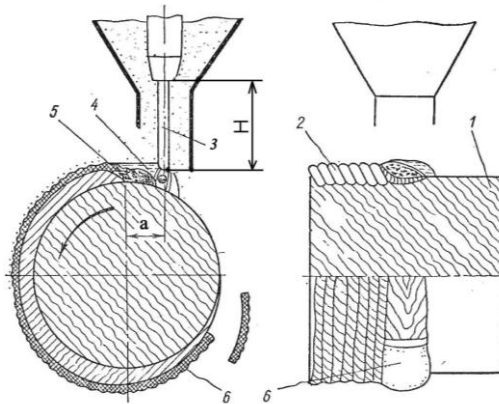


Рис. 6.14 Схема наплавлення під шаром флюсу:

1 – деталь; 2 – наплавлений шар; 3 – електрод; 4 – розплавлений флюс; 5 – ванна розплавленого металу; 6 – шлакова кірка; а – зміщення електроду із zenіту; Н – виліт електроду

Головними перевагами наплавлення під шаром флюсу є отримання на робочій поверхні практично будь-якого хімічного складу та розмірів наплавленого шару з заданими властивостями для конкретного виду зношування; можливість багаторазового відновлення, що значно зменшує витрати металу; досить висока продуктивність механізованих способів наплавлення і навіть можливість їх автоматизації.

При напавленні на поверхні деталі утворюється металевий шар високої якості, що має надійне сплавлення з основним металом, необхідний склад та структуру, які забезпечують потрібні вимоги. Для цього використовують легуючі елементи. Промисловість випускає різні марки електродного дроту в залежності від потреб ремонтного виробництва. При напавленні деталей під шаром флюсу з'являються додаткові можливості в досягненні якості хімічного складу поверхневого шару та його фізико-механічних властивостей. Напавлення під шаром флюсу використовується для деталей, що працюють в умовах тертя без мастильного матеріалу, при значних навантаженнях (опорні катки, направляючі колеса гусеничних тракторів та ін.).

Для напавлення під шаром флюсу використовується електродний дріт різних діаметрів (в основному $1,0 \div 3$ мм) та складу. Марку дроту вибирають в залежності від вимог до напавленої поверхні. Наприклад, для напавлення деталі з маловуглецевої сталі рекомендується застосовувати низьковуглецеві дроти Св – 08А, Св – 08ГА та ін. Для одержання зносостійких покриттів використовують дроти з вуглецевих і легованих сталей: Нп – 30ХГСА, Нп – 40 та ін.

Флюси, що використовуються для напавлення (зварювання) підрозділяються на плавлені АН та керамічні АНК.

Плавлені флюси – досить складні силікати, за властивостями близькі до скла. Температура їх плавлення до 1200°C . За розмірами зерен ($0,1 \div 5$ мм) вони розподіляються на декілька груп. Найбільш розповсюджені флюси марок АН-348А, ОСЦ-45 та АН-15.

Керамічні флюси за складом та способом виготовлення близькі до якісних (товстих) покриттів електродів ручного зварювання, поряд з захисними властивостями, мають також легуючі та модифікуючі елементи. На відміну від плавлених флюсів, керамічні дозволяють в широкому діапазоні легувати напавлений шар і при використанні навіть дешевого низьковуглецевого дроту одержати якісні зносостійкі покриття. До керамічних флюсів відносять АНК-3, АНК-35, АНК-18 та ін.

Інколи використовуються флюси-суміші в різному процентному відношенні, в залежності від вимог до напавленої поверхні.

Також є цікавий високоефективний метод напавлення порошковим дротом, що являє собою тонку трубку зі сталі з запресованою в ній порошковою сумішшю, яка забезпечує одержання необхідної сполуки напавленого шару.

Використання порошкового дроту при напавленні (зварюванні) низько – та середньовуглецевих сталей дозволяє одержати високу якість поверхневого шару без додаткового захисту дуги. До такого дроту відносяться ПП-АН1, ПП-1ДСК та ін.

Існуючий самозахисний дрiт марок ПП-3Х13-0, ПП-3Х4В3Ф-0 та iн. дозволяє одержати поверхню з підвищеною зносостійкістю і міцністю до HRC 56 без подальшої термічної обробки.

Плазмове наплавлення - це процес нанесення покриття з розплавленого присадного матеріалу на металеву поверхню з використанням у якості джерела енергії стисненої дуги (що горить між електродом плазмотрона та деталлю) або плазмового струменя (що горить між електродом і соплом плазмотрона).

Плазмою може бути названий такий стан газоподібної суміші, у якій число заряджених часток електронів та іонів зростає до рівня не нижче 10^9 в 1 см^3 . Приблизно плазмі відповідає температура порядку 10000°K і вище.

У стиснених дугах, застосовуваних для зварювальних процесів, переважає первинна іонізація, при якій відбувається відрив зовнішніх (валентних) електронів, що мають більш низький потенціалом іонізації в порівнянні з електронами більш глибоких рівнів. Для первинної іонізації характерна часткова іонізація газу. Для вторинної іонізації атома потрібно затратити енергію, що досягає сотень електрон-вольтів. Наприклад, азот при $T=12000^\circ\text{K}$ майже повністю дисоціює, при $T=20000^\circ\text{K}$ відбувається первинна іонізація, а при $T=35000^\circ\text{K}$ вторинна.

У якості газів, що утворюють плазму, самостійно можуть бути використані аргон, азот, гелій, аміак. Водень і кисень можна застосовувати в суміші з аргоном, азотом. Застосування одного водню неможливо через його високу теплопровідність, що призведе до швидкого нагрівання й руйнування сопла.

У сучасній зварювальній техніці застосовують дві схеми (рис. 6.15) одержання плазми. Перша (рис. 6.15,б) відповідає схемі стисненої дуги прямої дії, коли анодом служить оброблюваний матеріал. Друга - стиснена дуга непрямої дії (рис. 6.15,а) утворюється між вольфрамовим електродом і внутрішнім соплом плазмотрона, з якого витікає у вигляді плазмового струменя. Дуга непрямої дії електрично не пов'язана з оброблюваним металом. Друга схема знайшла застосування при обробці діелектричних матеріалів, а також при напилюванні та загартуванні.

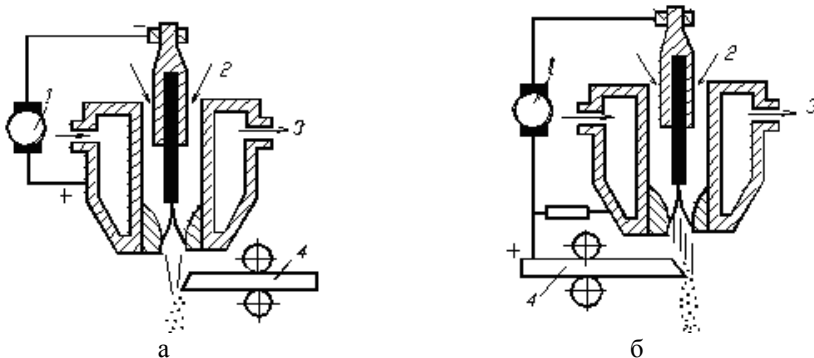


Рис. 6.15 Характеристика плазмової дуги при наплавленні:
а) дуга непрямої дії, б) дуга прямої дії; 1 - джерело живлення дуги, 2 - газ, що утворює плазму, 3 - холодна вода, 4 - матеріал для наплавлення (дрiт) або деталь

При наплавленні деталей із застосуванням порошкових матеріалів для наплавлення загальна схема процесу виглядає в такий спосіб (рис. 6.16). При обробці порошок може подаватися з бункера як під дією сил гравітації (самопливом), так і примусово, за допомогою транспортуючого газу або шнека.

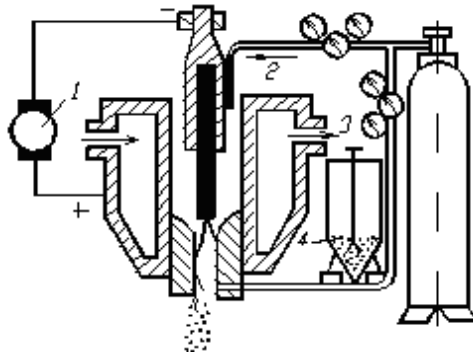


Рис. 6.16 Схема плазмового наплавлення з використанням порошкових матеріалів:

- 1 - джерело живлення дуги, 2 - плазмостворюючий газ, 3 - холодна вода, 4 - порошковий живильник (бункер)

У цьому випадку порошок, що напильється, подається в струмінь плазми. Існують і електродугові пристрої, в яких через зону плавлення в дуговому розряді двох дрових електродів вдувається стиснене повітря. Струмień розпеченого повітря разом із краплями розплаву направляєтья на поверхню деталі.

Переваги плазмового методу наплавлення деталей:

- плазмове наплавлення внаслідок малого проплавлення поверхні виробу дозволяє одержати заданий склад металу у першому шарі, завдяки чому у два - три рази (у порівнянні з дуговим наплавленням під шаром флюсу) знижуютья витрати наплавочних матеріалів і значно скорочуютья трудові витрати;

- завдяки локальному тепловому впливу на основний метал при плазмовому наплавленні залишкові напруги розтягання в напавленому шарі значно менші, ніж при електродуговому наплавленні, це підвищує стійкість напавленого металу проти розтріскування при різких тепломінах;

- плазмове наплавлення характеризується гарним формуванням напавленого валика, що дозволяє призначати малі припуски на механічну обробку;

- висока температура плазмового потоку дозволяє розпавляти й наносити будь-які матеріали, навіть найтугоплавкі;

- потік плазми дає можливість одержувати сплави різні за властивостями або наносити багатшарові покриття з різних сплавів. Це відкриває можливість одержувати напавлений метал з будь-якими заданими властивостями;

- можливості цього способу не обмежені формою і розмірами оброблюваного виробу;

- плазмова дуга найбільш гнучке джерело нагрівання, що дозволяє в широкому діапазоні регулювати його енергетичні та теплові характеристики;
- завдяки високій кінетичній енергії часток у плазмовому струмені можливо одержання більш щільного й однорідного покриття, ніж при інших способах наплавлення;
- забезпечується можливість рівномірного нанесення покриттів на деталі складної форми і практично будь-якої товщини;
- застосування безкисневих газів (аргон, азот, водень, гелій) та їхніх сумішей зменшує здатність до окислення відновленого шару.

Підвищення величини зварювального струму при плазмовому наплавленні призводить до збільшення нагрівання поверхні основного металу. Надмірне збільшення струму призводить до пропалвлення основного металу при наплавленні легкоплавких металів і до збільшення пропалвлення основного металу і ступеню перемішування основного і наплавленого металу.

При плазмовому наплавленні здійснюється процес самозагартовування (охладження з рідкого стану на відкритому повітрі). Завдяки цьому стає можливим одержання досить високої твердості (60 – 65HRC₃) наплавленого шару при використанні низьколегованих матеріалів на основі заліза (рис. 6.17,а). Однак при високій швидкості кристалізації в наплавленому шарі накопичуються внутрішні напруження, які призводять до появи тріщин (рис. 6.17,б). Тому після наплавлення деталь рекомендується поміщати для охолодження в піч або пісок. Також можливе застосування спеціальних кожухів з матеріалів з низькою теплопровідністю.

При малій величині зварювального струму не відбувається досить міцного сплавлення присадного матеріалу з основою. Як результат у наплавленому шарі і на межі сплавлення можна виявити частки нерозплавленого порошку (рис. 6.17,в). Це призводить до відшаровування наплавленого шару в процесі експлуатації відновлених деталей.

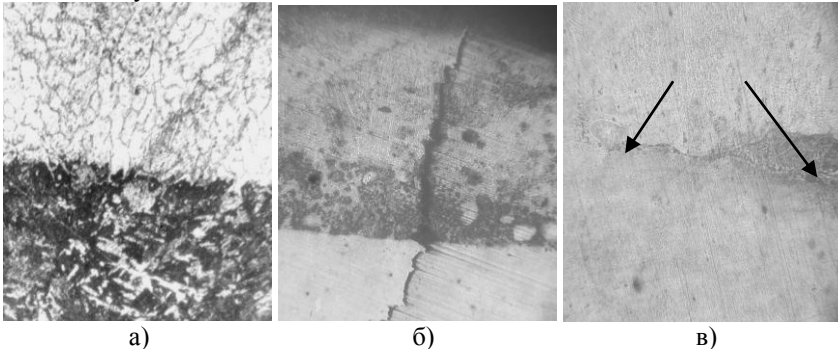


Рис. 6.17 Зона сплавлення основного й присадного матеріалів залежно від величини зварювального струму:

- а) оптимальне значення величини зварювального струму; б) підвищене значення величини зварювального струму; в) низьке значення величини зварювального струму

Для одержання поверхневого наплавленого шару з досить високою якістю найчастіше застосовують порошкові матеріали, наплавлення якими може здійснюватися декількома способами. Найпростішим з них є спосіб наплавлення по шарі грубозернистого порошку (крупки). У цьому випадку порошок заздалегідь насипається на поверхню деталі, а плазмова дуга, що горить між електродом і деталлю, розплавляє його.

Для плазмових металопокриттів рекомендують порошки з розміром часток 40 - 200 мкм (ПГ - СР2, ПГ - СР3, ПГ - СР4, СНГН - 50, СНГН - 55, ВСНГН - 80 й ін.), порошкові дроти (ПП - АН122, ПП - АН133 - П, ПП - АН125, ПП - АН170 й ін.) діаметром 2,6 - 3,2 мм.

При наплавленні з подачею порошку у зварювальну ванну дуга горить між електродом та деталлю. При цьому утворюється ванна основного металу, куди подається порошок тугоплавкого металу. Спосіб цей застосовується тоді, коли необхідно, щоб в метал деталі були вкраплені частки тугоплавких матеріалів, що призводить до збільшення зносостійкості.

Застосування плазменно-дугового замість звичайного електродугового розряду дозволило істотно знизити шкідливий вплив підплавлення основного матеріалу. Тут можливі різні варіанти подачі наплавленого матеріалу в зону наплавлення: подача дроту, проплавлення заздалегідь покладеного дроту, вдування наплавленого порошку разом з потоком плазми. Останній метод кращий, оскільки дозволяє цілком автоматизувати процес.

Окрім вище перелічених способів також застосовується газополуменевого наплавлення сталі, чавуну, міді та її сплавів, сплавів на основі нікелю й кобальту при цьому в якості присадного матеріалу використовуються суцільні дроти й прутки за відповідними стандартами. Зокрема, для наплавлення сталі застосовують наплавочні дроти за ГОСТ 10543 та зварювальні за ГОСТ 2246, а для наплавлення чавуну литі прутки за ГОСТ 2671. Прутки діаметром 4, 6, 8 мм відливають довжиною 250-450 мм, а діаметром 10, 12, 14, 16 мм – 450-700 мм. Поверхня прутків повинна бути чистою й вільною від шлаків, окисних плівок та ін.

Для відновлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування з помірними ударами (робочі органи ґрунтообробних та дорожніх машин, зуби ковшів екскаваторів і т.п.), за ГОСТ 21449 використовують литі прутки ПР-С1 (тип наплавленого металу У30Х28Н4С3); ПР-С2 (тип наплавленого металу У20Х17Н2); ПР-С27 (тип наплавленого металу У45Х28Н2ВМ). Діаметр прутків із цих сплавів 4, 6 та 8 мм, довжина 300-500 мм.

Сплави на основі кобальту мають високу корозійну стійкість у різних середовищах. Вони добре працюють в умовах абразивного й ерозійного зношування, ударних навантажень і тертя металу по металу. При цьому кобальтові сплави зберігають свої експлуатаційні властивості при підвищених температурах (до 750 °С). Для газового наплавлення литі прутки на основі кобальту виготовляють згідно ГОСТ 21449. Литі прутки Пр-В3К (тип наплавленого металу У10К63Х30В5Н2) використовують для наплавлення клапанів і сідел, двигунів внутрішнього згорання; ущільнювальних поверхонь деталей

енергетичних, нафтових арматур; ножів і т.і.; прутки Пр-ВЗК-Р (тип наплавленого металу У20К57Х30В10Н2Р) в основному призначені для наплавлення різального інструменту, зубів рамних пилок і т.п.

6.3.5 Напилювання покриттів з порошкових матеріалів

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

Сутність процесу газополуменового напилення полягає в утворенні спрямованого потоку дисперсних частинок матеріалу (порошку), які напилюються, це забезпечує їх перенесення на поверхню деталі, яка оброблюється при оптимальних для формування шару покриття значеннях температури та швидкості. Необхідний запас теплової та кінетичної енергії матеріал, що наноситься, отримує з полуменем від згоряння суміші горючий газ кисень. Порошок подається у факел полум'я в результаті інжекції струменем газів або під дією сил гравітації (рис. 6.18). При газополуменовому напавленні за допомогою виділеної теплової енергії при згорянні суміші горючий газ кисень утворюється зварювальна ванна, у яку безпосередньо подається наплавлювальний порошок.

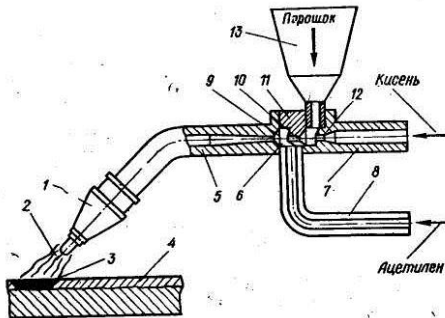


Рис.6.18 Пальник для газополуменового напилення:

- 1 - мундштук; 2 – факел полум'я; 3 - зварювальна ванна; 4 - наплавлювана поверхня; 5 - трубка; 6 – канал; 7 - киснева трубка; 8 - ацетиленова трубка; 9 - камера зміщення; 10, 12 - інжектори; 11 - змішувальна камера; 13 - бункер

В якості робочих газів використовують ацетилен згідно ГОСТ 5457, кисень ГОСТ 20448, пропан-бутан ГОСТ 20448, азот ГОСТ 9293 або стиснене повітря, очищене від мастила та вологи. Повітря, азот або інший стиснений газ використовують для охолодження соплової частини пальника та обдування факелу полум'я.

Перевага газополуменевого напилення - висока продуктивність (до 8-10 кг/год) та коефіцієнт використання матеріалу (більше 95%), локальність обробки, незначний температурний вплив на деталь, можливість нанесення покриттів на вироби великих розмірів, відсутність обмежень на поєднання матеріалів покриття і підшару, що дозволяє охопити велику номенклатуру відновлення зношених деталей.

Основними недоліками газополуменевого нанесення покриттів є: обмеження температури плавлення матеріалу (до 3000 °С); недостатня для деяких умов експлуатації міцність зчеплення покриття з основою (5-25 МПа при випробуваннях на нормальний відрив); висока пористість покриттів (5-25%), що обмежує їх використання в корозійних середовищах без додаткової обробки; невисокий коефіцієнт використання енергії згоряння газу на нагрівання матеріалу (2-12%).

Залежно від призначення і матеріалу деталі, умов її експлуатації, контактів спряжених поверхонь при відновленні зношених деталей використовуються такі методи газополуменевого нанесення покриттів:

1. Газополуменеве напилення порошку без наступного оплавлення. Використовується для відновлення деталей зі зношуванням до 2,0 мм на сторону, без деформації, перекручування або зміни структури основного металу, що не піддаються в процесі експлуатації ударам, знакозмінним навантаженням, значному нагріванню (до 300-350 °С);

2. Газополуменеве напилення з одночасним оплавленням. Використовується для відновлення деталей, виготовлених із сірого чавуну, конструкційних, нержавіючих сталей та інше, з місцевим зношуванням до 3-5 мм, що працюють при знакозмінних й ударних навантаженнях;

3. Газополуменеве напилення з наступним оплавленням. Дає можливість відновлювати деталі типу «вал» зі зношуванням до 2,5 мм на сторону. Відновлені цим методом деталі стійкі проти корозії, абразивного зношування, дії високих температур.

Сфери застосування газополуменевого напилювання досить різноманітні-відновлення геометричних розмірів зношених деталей; підвищення твердості, стійкості проти зношування і високих температур; одержання теплоізоляційних і декоративних покриттів тощо.

Порошки: для газополуменевого напилювання - ПТ-НА-01 (підшар) ПТ-19Н-01, ПТ-19Т-01; для газополуменевого напилювання з наступним оплавленням - ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-12Н-03; для газополуменевого напилювання - ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-03, ПГ-10Н-04.

При електродуговому напилюванні (рис. 6.19) два дроти з напилюваного металу діаметром 1-2мм з'єднані з джерелом електричного живлення, подаються за допомогою механізму подачі по напрямних наконечниках. У точці їх зближення виникає електрична дуга, яка розплавляє метал. Останній стиснутим повітрям або інертним газом переноситься на поверхню деталі.

Для електродуговому напилювання використовують дроти Нп-30, Нп-30ХГСА та Нп- 30Х13.

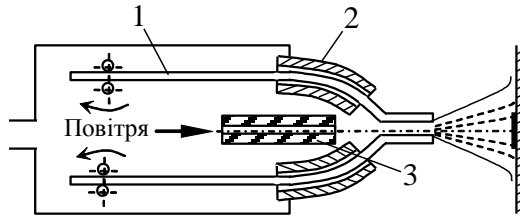


Рис. 6.19 Схеми розпилюючих головок електродугового напилювання:
1 – дрот; 2 – наконечники для дроту; 3 – повітряне сопло

Іншим варіантом нагрівання матеріалу, що напилюється, є використання індукційних струмів високої частоти, які виникають у дроті, що проходить через охолоджуваний соленоїд, який генерує високочастотне електромагнітне поле. Через котушку продувається струмінь повітря, що підхоплює краплі дроту, які розплавилася, і вдаряє їх об поверхню деталі (рис. 6.20).

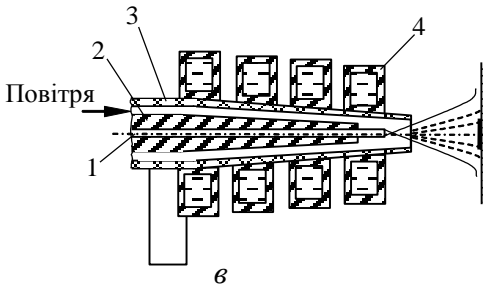


Рис. 6.20 Схеми розпилюючих головок високочастотного металі затору:
1 – дрот; 2 – наконечники для дроту; 3 – повітряне сопло; 4 – індуктор

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

Напилювання широко застосовується для відновлення форми зношених деталей. Велику роль відіграє підготовка поверхні під напилювання. Поверхня повинна бути добре очищена від забруднень, мати шорсткість і пористість. Це гарантує гарне зчеплення матеріалу, який наноситься, на його основу. Поверхні знежирюють за допомогою промивання в розчинниках (бензин, бензол, ацетон, чотири-хлористий вуглець тощо.). Для усунення дефектів поверхневої структури використовується обробка струменем абразиву (піскострумом).

Останнім часом для нанесення зносостійких твердосплавних покриттів використовується метод детонаційного напилювання. Установка для детонаційного напилювання нагадує гармату, що стріляє порціями розігрітого порошку. У замкнуту камеру згоряння, до якої прикріплюється стовбур, подається суміш кисню і пального газу (ацетилен, пропан-бутан і ін.). Стовбур направляють на поверхню, що напилюється. Через завантажувальний отвір у камеру подається порошок. Суміш підпалюється електричною іскрою і вибухає. Розпечені частки разом із продуктами згоряння вдаряються об оброблювану поверхню і закріплюються на ній. Температура часток у момент удару досягає 4 000 °С. Частота пострілів – 3...4 за секунду. Недоліком методу є нерівномірний розподіл матеріалу по поверхні, який усувається шляхом оздоблювальної обробки шліфуванням. Так створюють покриття з металокераміки: карбідів вольфраму, титану і кобальту, нітридів титану і бору, окису алюмінію. Покриття мають високу твердість і зносостійкість. Знос знижується до 10 разів.

6.3.6. Іонно-плазменні методи

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

Є кілька різновидів методу. Катодне розпилення засноване на використанні розташованих у вакуумній камері 2-х електродів. Після відкачки 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 випарований матеріал, що випаровується, який розпорошується й іонізується в плазмі розряду. Частки осаджуються на деталі, створюючи покриття. Якщо використовувати реакційний газ, пролітаючи через який атоми металу утворюють нітриди, карбіди або окисли, можна одержати необхідну структурно-фазову сполуку покриття. Швидкість часток, що осаджуються, досягає 10 км/с, тому вони міцно зчіплюються з основою. Найкращі результати отримують при використанні для випаровування променевого методів нагрівання (електронно-променевого і лазерного), де застосовується додаткове прискорення іонів накладенням електричного поля.

Широко поширена технологія нанесення покриттів із плазми дугового розряду з холодним катодом. Матеріал випаровується катодною плямою електричної дуги – потужнострумним низьковольтним розрядом, що розвива-

ється в парах матеріалу електродів. Між анодом і катодом з напилюванням матеріалу виникає розряд, що протікає в парах продуктів ерозії катода. Металева плазма виділяється з мікроплям катода, у зонах яких виникають локально висока температура і тиск. Прикладаючи до деталі прискорюючий потенціал, підвищують швидкість у плазмі іонів, що генеруються. Така технологія реалізується на багатьох підприємствах в установках "Булат". Найчастіше наносять покриття з TiN, TiC, Al₂O₃ – найбільш твердих зносостійких матеріалів. Розвиток методу пов'язаний із запровадженням плазмових прискорювачів, які формують сфальцьований високошвидкісний іоно-плазменний пучок, що сканує поверхню деталі. Тут так само, як і в електронно-променевій трубці, фокусування пучка і сканування здійснюються за допомогою електростатичних магнітних лінз і пластин, для відхилення. Покриття мають невелику товщину 4...10 мкм, викликають помітне поліпшення якості поверхонь, мають високу корозійну стійкість.

6.3.7. Плакування

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

Товстошарові покриття часто наносяться методом прокатки. Зчеплення шарів здійснюється за рахунок дифузії, стимульованої високою температурою. Застосовуються також дифузійне і електроконтактне зварювання, наплавлення, припаювання та інші способи. Таким методом одержують біметалічні смуги, кільця. Часто наноситься шар з порошкових металів і кераміки. Шари приікаються в конвеєрних печах і прокочуються разом з основою в гарячому стані. Суспензія порошків (суміші з летучими рідинами з добавкою речовини, що клеїть) може наноситися способом шлікерного лиття. Потім деталі просушуються. На поверхні утвориться шар рівної товщини, утримуваний клеєм. Деталі надходять у піч, клей вигорає, а матеріал, який наноситься, приікається до основи. Утворюється пористе тверде покриття, що потім просочується будь яким службовим матеріалом, наприклад, фторопластом.

6.3.8. Механічне зміцнення поверхонь

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

Зміцнення поверхні деталі пристроями поверхнево-пластичного деформування (ППД) (обкатування, вібронакатування та ін.) відрізняються від тра-

диційних способів механічної обробки (точіння, шліфування, хонінгування та ін.) більшим кроком мікронерівностей і радіусами закруглень мікровиступів та мікровпадин, відносно більшою опорною поверхнею та високою однорідністю, малим числом мікровиступів на одиницю довжини. Зі збільшенням радіусу вершин мікровиступів і однорідності їх за формою та висотою збільшується несуча здатність поверхні, темп її приробки, контактна жорсткість, зносостійкість, гідроцильність, товщина оливої плівки, виникаюча при змащенні, а зі збільшенням радіусу закруглення мікровпадин підвищуються стомлююча міцність, опір корозії та запилення поверхні.

Основними особливостями та недоліками засобів чистої обробки різанням є:

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

Ці недоліки більшості способів чистої та зміцнюючої обробки різанням і тиском ускладнюють рішення таких задач, як:

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

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

Одним із рішень задач з усунення вище перерахованих недоліків є прогресивний спосіб зміцнення – вібронакатування (вібровигладжування). Обробка металів ППД заснована на застосуванні їх пластичних властивостей, здатності при визначених умовах здобувати під дією зовнішніх сил остаточні деформації мікровиступів поверхневого шару без порушень їх суцільності.

Сутність вібронакатування полягає у тому, що закріпленій деталі у центрах токарно-гвинторізного станку надається обертальний рух з частотою P_p , а робочому інструменту (алмазному вигладжувачу, кульці), до якого прикладене навантаження P , надається осцилюючий рух (коливаючий) з частотою $P_{н.х.}$ паралельно осі оброблюваної деталі та повздовжня подача $S_{пр.}$ (рис.6.21).

Внаслідок обробки виникає мережа каналів з частковорегулярним мікрорельєфом (ЧРМР) або повністю регулярним мікрорельєфом (ПРМР) ГОСТ 24773-81 (рис. 6.22). Характер мікрорельєфу (розміри, форма, взаєморозташування мікронерівностей) визначається режимом та умовами обробки поверхневого шару деталі.

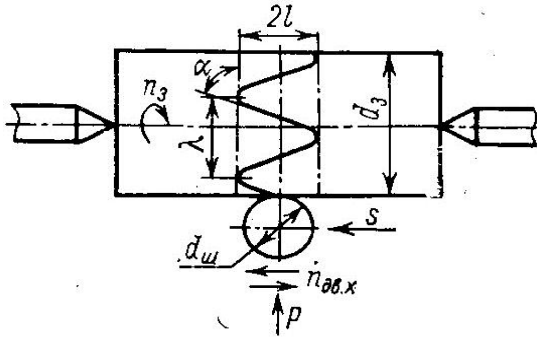


Рис. 6.21 Принципова схема процесу вібронакатування (вібровигладжування) деталей

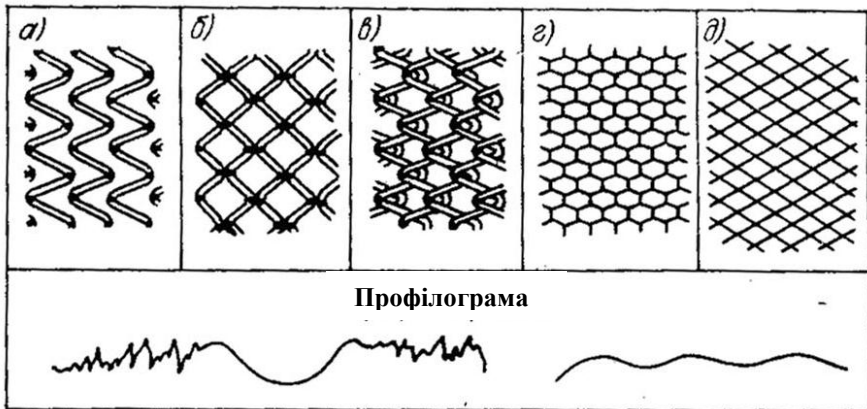


Рис. 6.22 Види частково-регулярних мікрорельєфів: ЧРМР (а, б, в) та мікрорельєфу ПРМР (г, д):

а – канавки, що не торкаються; б – канавки, що торкаються; в – канавки, що пересікаються; г, д – канавки, що зливаються (ПРМР).

В процесі вібронакатування поверхня деталі оброблюється по гвинтовій лінії віброючим робочим інструментом з амплітудою коливань λ , тобто на гвинтову лінію накладається нескінченна синусоїдна крива. На поверхні деталі видавлюються канавки визначеної форми глибиною в декілька десятків мкм в залежності від твердості оброблюваного матеріалу.

Вібронакатування – чистова (фінішна) обробка, яка забезпечує утворення оптимального для різних умов експлуатації мікрорельєфу поверхні, збільшує стомлюючу міцність, контактну жорсткість та зносостійкість. Вона супроводжується наклепом, збільшенням мікротвердості оброблюваного ме-

талу, підвищенням класу шорсткості поверхні, зменшенням або повністю виключенням приробки спряження. При утворюванні системи канавок ЧРМР зміцнюються ділянки впадин та напливів; при утворюванні повністю перекритої канавками поверхні (ПРМР) - нова поверхня зміцнена повністю (як виступи, так і впадини).

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

Існує ще й технологічний спосіб деформаційної формозміни поверхонь деталей вузлів, що зміцнює. Спосіб відкриває великі можливості для підвищення зносостійкості, навантажувальної здатності, контактної твердості та інших важливих в експлуатації характеристик трібосистем. Зміцнююча деформаційна формозміна поверхонь деталей здійснюється накатним інструментом у вигляді роликів 2, на периферії яких розташована замкнута система клиноподібних інденторів, наприклад гексагональної структури (рис. 6.23). Можливі варіанти холодного накочування і накочування при нагріванні. Розроблено гаму інструментів, що реалізують цей спосіб, визначена сфера його застосування, оптимізовані технологічні режими обробки, виготовлені допоміжні пристрої і устаткування для обробки типових деталей циліндричної, сферичної і плоскої форми.

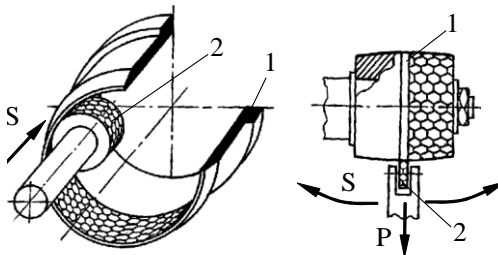


Рис. 6.23 Схема процесу деформаційної формозміни поверхонь

Основними об'єктами застосування деформаційної формозміни поверхонь є технології обробки втулок і вкладишів підшипників ковзання, прямолінійних напрямних, номінально нерухомих сполучень з чорних (сталь, чавун) і кольорових металів (латунь, бронза, титанові сплави), коли формозміна поверхня не піддається подальшій механічній обробці і є робочою; обробки контактуючих поверхонь підшипників ковзання або нерухомих сполучень

з чорних і кольорових металів та сплавів під металеві і твердомастильні покриття; обробки контактуючих поверхонь під металізацію при відновленні, під час ремонту або при одержанні біметалічних трібосистем; обробки поверхонь деталей трібосистем з наступним їхнім обдуванням мікрокульками; обробки поверхонь деталей трібосистем з наступним хіміко-термічним зміцненням тощо.

7 МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

7.1 Функції і види мастильних матеріалів

Одним із найбільш ефективних способів забезпечення надійності й довговічності рухомих з'єднань деталей машин і механізмів та мінімізації енергетичних втрат під час їх експлуатації є використання в якості компонентів трібосистем мастильних матеріалів. Вони вже давно визнані повноправними конструкційними матеріалами. Тому трібологія тісно пов'язана з хімотологією – галуззю знань про властивості, якість і раціональне використання паливно-мастильних матеріалів та спеціальних рідин.

Присутність будь-якої адсорбованої речовини на активній поверхні твердого тіла в якійсь мірі може виконувати роль мастильного матеріалу, різниця полягає лише в ступені ефективності мастильної дії, яка визначається передусім в структурі адсорбованої плівки. Виключаючи або мінімізуючи безпосередній контакт трібоелементів, мастильні матеріали покращують фрикційно-зношувальні характеристики тертьових поверхонь.

Розвиток техніки викликав значну різноманітність умов, в яких працюють мастильні матеріали, і отже, збільшення необхідних функцій, які повинні вони виконувати. Основними функціями мастильних матеріалів є:

- забезпечення низького (в необхідних межах) рівня тертя;
- зниження інтенсивності зношування тертьових тіл;
- запобігання заїдання трібосистем;
- забезпечення відводу тепла з зони фрикційного контакту;
- очищення зон тертя від продуктів зносу або корозії;
- захист поверхонь тертя від корозії і дії зовнішнього середовища;
- ущільнення зазорів та герметизація рухомих з'єднань.

До мастильних матеріалів належать продукти органічного і неорганічного походження, які вводять в трібосистему з метою зменшення втрат на тертя, зношування і запобігання заїдання.

Якість мастильних матеріалів характеризується комплексом фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей у відповідності з умовами роботи трібосистеми. Властивості мастильних матеріалів визначаються: кінематикою руху (ковзання, кочення); величиною питомого або повного навантажень в місті тертя; максимальною, середньою і об'ємною температурами в зоні контакту; видом матеріалу та геометрією поверхонь (хвилястість, шорсткість) тертьових деталей; властивостями навколишнього середовища та ін.

Мастильні матеріали повинні зберігати свої властивості у всьому діапазоні умов експлуатації, а також при зберіганні, не впливаючи негативно на дію контактуючих матеріалів (корозія металів і сплавів, погіршення якості матеріалів ущільнення та ін.) Крім того, вони повинні забезпечувати максимально вибухову і пожежну небезпечність, а шкідлива дія на навколишнє се-

редовище повинна бути зведена до мінімальної шляхом оптимізації як його складу, так і конструкції трібосистем, а також відповідними організаційно-технічними заходами.

Усю номенклатуру змащувальних продуктів умовно поділяють на конструкційні та технологічні.

Конструкційні мастильні матеріали розглядаються як невід'ємні конструктивні елементи трібосистем машин і механізмів. При проектуванні машини конструктор здійснює вибір продукту мащення одночасно з вибором матеріалу та інших параметрів трібоелементів і він входить в специфікацію деталей і матеріалів на виробі.

Технологічні мастильні матеріали використовуються при обробці металів різанням і тиском з метою мащення та охолодження інструмента і обробляючого матеріалу. Технологічна олива вибирається технологом і розглядається як невід'ємний елемент прийнятого технологічного процесу.

За агрегатним станом розрізняють чотири групи мастильних матеріалів: рідкі (оливи); пластичні (пластичні мастила), тверді та газоподібні.

Використання в трібосистемах мастильного матеріалу того чи іншого виду обумовлено умовами роботи конкретної трібосистеми. Так для змащування сучасних двигунів внутрішнього згоряння використовують рідкі мастильні матеріали. У випадках, коли мастильний матеріал закладають тільки при монтажу трібосистеми або вводять в нього періодично (для змащування герметичних підшипників кочення, трібосистем шасі і рульового керування, карданних шарнірів, для герметизації рухомих ущільнень, сальників, різьбових з'єднань), ефективні пластичні мастила

В умовах тертя, коли рідкі і пластичні матеріали не забезпечують ефективного змащування (при температурах нижче температур застигання оливо, або при втраті рухомості мастил, або вище граничних температур їх ефективної роботи, при роботі в умовах глибокого вакууму, коли рідкі і пластичні мастильні матеріали випаровуються, при екстремально низьких швидкостях ковзання), використовують тверді мастильні матеріали.

В специфічних умовах при дуже високих частотах обертання (до 500 тис. min^{-1} і вище), при необхідності виключення стрибків сили тертя при переміщеннях з мінімальною швидкістю ковзання (до сотих часток mm/хв.), в широкому діапазоні температур і тисків, а також в зоні підвищеної радіації дуже ефективне використання газового змащувального матеріалу.

Звичайно під час експлуатації мастильний матеріал виконує одну або кілька визначених функцій. Тому в народному господарстві використовують мастильні матеріали, які мають певне призначення й забезпечують в їх галузях найбільший ефект. Залежно від призначення оливи поділяють на моторні, трансмісійні, гідравлічні, індустріальні та іншого призначення.

Виконання мастильних матеріалів своїх функцій протягом необхідного періоду можливе за умовою, що їх якість буде задовольняти певним експлуатаційним вимогам. Перш за все це в'язкісно-температурні, протизносні, про-

тизадирні, антиокиснювальні, антикорозійні, миюче-диспергуючі та інші властивості.

Важливими характеристиками вважаються також теплопровідність мастильного продукту, його температура спалаху і застигання, схильність до спінення та інші показники властивостей, залежних від функціонального призначення мастильних матеріалів.

В залежності від призначення мастильні матеріали повинні мати:

- оптимальні в'язкісно-температурні властивості для полегшення запуску машин та механізмів у межах температур навколишнього середовища, які потребує експлуатація; для зниження тертя і зносу та скорочення витрат енергоресурсів;

- добру змащувальну здатність для забезпечення надійного змащення на всіх режимах роботи машин та механізмів;

- необхідні антиокиснювальні властивості, які забезпечують мінімальну зміну хімічного складу оливи у процесі її роботи;

- добрі миюче-диспергуючі властивості з метою зниження схильності до утворення різного виду відкладень на нагрітих металевих поверхнях і у системі мащення (лаки, нагари, осадки);

- високі протикорозійні властивості стосовно до конструкційних матеріалів, особливо кольорових металів та сплавів при робочих температурах оливи;

- достатні захисні властивості для захисту металевих поверхонь від атмосферної корозії у неробочий період машин та механізмів;

- стійкість до процесів випаровування, спінювання та утворення емульсій.

Крім того, мастильні матеріали не повинні негативно впливати на ущільнюючі матеріали, а також не викликати забруднення навколишнього середовища.

Перелік вимог до оливи конкретного призначення включає велику кількість різноманітних позицій. Ступінь важливості тих чи інших вимог різна. Багато з них суперечні. Тому при визначенні вихідних вимог їх ранжирують за ступенем важливості. Це дозволяє розробнику оливи знаходити компроміс між суперечними вимогами.

Вибір показників якості оливи, встановлення норм за ними і визначення запасу якості обґрунтовуються та експериментально підтверджуються спільними дослідженнями машинобудівників, експлуатаційників і розробників оливи. Затверджений зміст державних, галузевих нормованих показників, які характеризують якість оливи, складає перелік стандартів, технічних умов та інших відповідних документів.

Високі вимоги, які ставлять до якості оливи, досягаються шляхом вибору необхідної оливної основи (базової оливи) та доданням до неї комплексу присадок.

7.2 Склад олив та присадки до них

Сучасні мастильні матеріали являють собою складні суміші різних компонентів, кожен із яких виконує свої функції. Залежно від вихідної сировини, яка використана для одержання базової оливи, мастильні матеріали поділяють на нафтові (мінеральні) та синтетичні. Поряд з повністю синтетичними основами використовують також суміш нафтових олив з синтетичними продуктами. Змішування нафтових олив з синтетичними є одним з можливих і достатньо ефективних засобів покращення якості товарного продукту.

Вибір основи нафтового або синтетичного походження або їх сумішей в визначених співвідношеннях залежить перш за все від умов експлуатації техніки і режимів роботи мастильного матеріалу.

Порівняно недавно в якості ще одного компонента базової основи стали використовувати рослинні оливи та продукти їх переробки або модифікування. Не зважаючи на відомі недоліки рослинних олив (низьку термоокиснювальну стабільність, посередні низькотемпературні властивості та ін.), можливості їх невичерпні. Оновлюючі сировинні джерела, відмінні екологічні властивості і ряд інших позитивних характеристик знову притягли увагу до цієї сировини розробників змащувальних матеріалів.

Найбільше розповсюдження одержали оливи на нафтовій основі. Вони являють собою рідкі суміші висококиплячих вуглеводнів з температурою кипіння 300 – 600°C і вище.

Товарні нафтові оливи готують на основі базових олив трьох видів: дистильатні, які одержують шляхом очистки окремих дистильатів, що виділяються під час вакуумної перегонки мазуту; залишкові, одержувані шляхом очистки залишків, які утворюються під час переробки гудрону, та змішані (компаундовані), які одержують змішуванням різноманітних олив – дистильатних одна з одною та з залишковими. Самостійну групу складають загущені оливи, виготовлені з базових олив введенням полімерних присадок.

Якість базових олив має велике значення. Саме вони визначають такі важливі характеристики товарних олив, як випаровуваність, високотемпературні властивості, рухомість при низькій температурі, тощо, та які важко поліпшити введенням присадок. Тому для забезпечення надійної експлуатації сучасної техніки з жорстким режимом роботи при виробництві олив зростає роль базових олив вузького фракційного складу, з гарними в'язкісними, низько-та високотемпературними властивостями. Характеристика базових олив наведена в таблиці 7.1, де властивості олив оцінені за 5-бальною шкалою – чим вище бал, тим вище рівень відповідних властивостей.

Оливи набувають необхідних експлуатаційних властивостей в результаті застосування сучасних процесів переробки та очищення нафтової сировини. Однак, незалежно від вибору нафти і способів її одержання, базові оливи не можуть забезпечити необхідного рівня експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів. Для поліпшення експлуатаційних властивостей олив на за-

вершальній стадії виробництва в базові оливи вводять різноманітні хімічні сполуки – присадки.

Таблиця 7.1 - Характеристика базових олив

Оливи	Температурний інтервал використання, °С	Індекс в'язкості	Триботехнічні властивості	Термоокиснювальна стабільність
Нафтові оливи	-45...135	60...120	4	2
Поліалкіленгліколи	-55...260	160...280	4	3...4
Полі- α -олефіни	-70...290	120...150	4	5
Діефіри (складні ефіри двохосновних карбонових кислот)	-60...300	120...180	4	5
Силікони	-60...205	130...300	2	4

Примітка: Властивості олив оцінені за 5- бальною шкалоюї, чим вище бал, тим вище рівень відновлених властивостей.

Забезпечення необхідних якостей олив досягається шляхом правильного поєднання властивостей базової основи з комплексом уведених присадок різноманітного функціонального призначення.

Присадки – це оливорозчинні синтетичні сполуки органічного походження або їхні суміші. Деякі присадки впливають на фізичні властивості оливи (схильність до застигання, в'язкісно-температурні характеристики), інші надають оливним фракціям властивостей, яких вони не мали (антикорозійні, протизадирні та ін.). Найчастіше в оливи вводять композиції присадок. При цьому вони можуть взаємно посилювати одна одну, створюючи синергічний ефект, або викликають антагонізм (послаблення функцій присадок при невдалій композиції).

За функціональним призначенням існують такі групи присадок:

- в'язкісні – підвищують в'язкість та поліпшують в'язкісно-температурні властивості;
- депресорні – знижують температуру застигання;
- антифрикційні, протизносні та протизадирні – поліпшують мастильні властивості оливи, зменшують тертя, знос і попереджають задири;
- антиокиснювальні – підвищують стійкість оливи проти окиснення киснем повітря;
- миюче-диспергуючі – забезпечують необхідну чистоту деталей, підтримуючи продукти окиснення і забруднення у зваженому стані;
- антикорозійні та захисні – сприяють зниженню і запобіганню корозійного впливу на метали кислих продуктів та вологи;

- протипінні та деемульгуючі – запобігають спіненню олив та утворенню стійких емульсій.

Присадки, які поліпшують одночасно декілька властивостей мастильних матеріалів, називають багатофункціональними. При цьому назву присадки визначає лише її основне призначення.

Ефективність присадок до олив різного походження обумовлюється не тільки оптимальною концентрацією (у випадку композиції оптимальним поєднанням компонентів), але й складом, властивостями, умовами виробництва і застосування мастильних матеріалів.

Присадки вводять в оливи у порівняно невеликих кількостях, від часток відсотка до кількох відсотків (у композиціях їхня загальна концентрація може доходити до 15% і більше). Виняток складають в'язкісні присадки, їх можна додавати до 20 – 30% і більше.

Загальними вимогами до сучасних присадок, незалежно від призначення, є добра розчинність в оливах у широкому інтервалі температур, стабільність при тривалому зберіганні. Присадки також не повинні розчинятися у воді та затримуватися оливоочисними пристроями.

7.3 Властивості та якість змащувальних матеріалів

7.3.1 Внутрішнє тертя (в'язкість) в оливах

До найважливіших експлуатаційних показників мастильних матеріалів відносять їхні в'язкісні властивості. Ці властивості, в першу чергу, визначають можливість і доцільність застосування тієї чи іншої оливи для конкретних вузлів та механізмів у заданих умовах роботи. Показники в'язкості характеризують втрати на тертя, тепловиділення, несучу здатність, товщину плівки і ін. Від в'язкості олив залежить легкість і час запуску механізмів у роботу, здатність їх циркулювати у системі мащення, утримуватися у змащувальному вузлі та забезпечувати гідродинамічний режим мащення, а значить зводити до мінімуму втрати енергії на тертя і зменшувати зношування деталей. В'язкість також впливає на охолодження тертьових поверхонь, витік через ущільнення, фільтрацію та витрату оливи.

До основних показників, що характеризують в'язкість оливи, належать динамічна в'язкість, кінематична в'язкість, індекс в'язкості та п'єзокоєфіцієнт в'язкості, який характеризує вплив тиску на в'язкість оливи.

Динамічна (абсолютна) в'язкість є мірою внутрішнього тертя і характеризує властивість оливи чинити опір взаємному переміщенню її шарів один відносно другого під дією зовнішньої сили.

Закони щодо процесів течії (деформування) рідин потребують урахування їх внутрішнього тертя. Особливості і закономірності течі реальної в'язкої оливи можна уявити на простішому прикладі її деформації між паралельними нерухомою і рухомою пластинами (рис. 7.1).

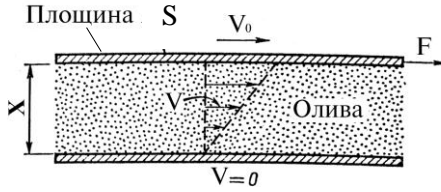


Рис. 7.1 Внутрішнє тертя між двома паралельними пластинами

Під час руху оливи між поверхнями виникає диференціація швидкостей окремих шарів від нульової швидкості для шару, прилеглого до нерухомої пластини, і до швидкості, рівної швидкості рухомої пластини.

Гradient швидкості зсуву рідини по нормалі до напрямку потоку dv/dx є похідною від швидкості по товщині (зазору) шару рідини. На припущенні, що внутрішнє тертя залежить від відносної швидкості переміщення складових часток рідини Ньютон сформулював закон в'язкої течії рідини. Сила тертя F , яка виникає при переміщенні одного шару відносно другого (зсуві), прямо пропорційна gradientу відносної швидкості зсуву і поверхні шарів:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx}, \quad (7.1)$$

де η – коефіцієнт пропорційності, залежний від природи рідини і є однією з її важливих характеристик (його зовуть коефіцієнтом в'язкості, коефіцієнтом внутрішнього тертя, динамічною в'язкістю, або просто в'язкістю);

S – площа пластини.

$$\eta = \frac{P}{\frac{dv}{dx}} \quad (7.2)$$

З визначення коефіцієнта в'язкості η вимірюється в $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ ($\text{Па}\cdot\text{с}$) – в'язкість такої рідини, яка чинить опір в 1Н взаємному переміщенню двох шарів рідини площею 1м^2 , що знаходяться один від одного на відстані 1м і переміщуються з відносною швидкістю 1 м/с .

Закон течії Ньютонів враховує зв'язок між тангенціальною силою зсуву F , віднесеною до одиниці площини S (напруження зсуву P), і gradientом швидкості зсуву:

$$P = \eta \frac{dv}{dx} \quad (7.3)$$

Таким чином, динамічна в'язкість – це властивість рідини чинити опір переміщенню однієї її частини відносно другої при зсуві (або других видах деформації), тому закон Ньютонів можна сформулювати так: напруження зсуву P при ламінарній течії рідини пропорційне швидкості деформації dy/dt , або швидкості деформації пропорційна напруженню зсуву:

$$P = \eta \frac{d\gamma}{d\tau} \quad (7.4)$$

У свою чергу, величина деформації γ залежить від часу:

$$\gamma = \frac{P}{\eta} \tau \quad (7.5)$$

Деформація при постійному напруженні пропорційна часу його дії. З розглянутої залежності витікає, що ідеальні рідини здатні текти (деформуватись) під дією дуже малих зовнішніх навантажень протягом усього часу дії останніх.

Рідини, які підлягають закону Ньютона, звуться ньютонівськими рідинами. Більшість нафтових і синтетичних олів при визначених температурах і тисках належать до ньютонівських рідин. Вони характерні тим, що напруження зсуву в них є лінійною функцією градієнту швидкості зсуву; таким чином, їх в'язкість величина постійна і не залежить від градієнту швидкості.

В'язкість рідини обумовлена головним чином міжмолекулярною взаємодією, яка обмежує рухливість молекул. Молекулярний перехід з шару в шар і залучення сусіднього шару до руху можливі лише за рахунок визначених енергетичних втрат, зростаючих зі зниженням температури і зростанням тиску. Оливи становляться ньютоновськими рідинами в основному в двох випадках:

- 1) при низьких температурах, коли олива починає застигати і в результаті кристалізації вміщених в неї парафінових вуглеводнів набуває властивості структурованої системи;
- 2) при загущенні полімерними присадками.

В обох вказаних випадках в'язкість оливи залежить від градієнту швидкості зсуву, причому зі збільшенням цього градієнту в'язкість зменшується. Зменшення в'язкості у структурованих оливах відбувається руйнуванням структури, у загущених – зростаючою орієнтацією задовгих ланцюжків молекул полімерів в напрямку течії. Зміна в'язкості в цих випадках оборотна.

Для визначення динамічної в'язкості використовують ротаційний віскозиметр (рис. 7.2). Він складається з двох коаксіальних циліндрів: внутрішнього 1 і зовнішнього 2 встановлених у підшипниках корпуса приладу.

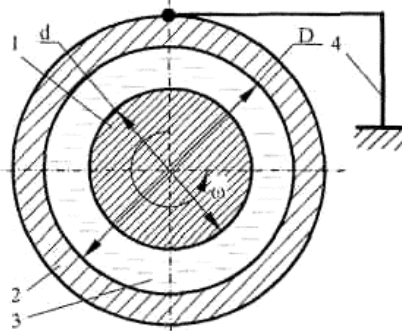


Рис.7.2 Схема ротаційного віскозиметру

Внутрішній циліндр приводиться в рівномірне обертання з кутовою швидкістю ω . Простір між циліндрами заповнено випробуваним мастильним матеріалом 3. Внутрішній циліндр захоплює за собою шар мастильного матеріалу, який приймає до нього, і за рахунок внутрішнього тертя в рідині обертання передається на зовнішній циліндр, що утримується від обертання. Пружинний динамометр 4 під час вимірювання моменту тертя, утримує від обертання зовнішній циліндр.

Динамічну в'язкість η за показниками приладу розраховують за формулою:

$$\eta = \frac{P}{dv} = \frac{F(D-d)}{2\pi^2 n D^2 L} dx \quad (7.6)$$

тут F – тангенціальна сила;

n – частота обертання внутрішнього циліндра;

L – довжина робочої частини циліндрів;

$(D-d)$ – товщина мастильного шару;

πDL – площа, на якій відбувається зрушення шарів мащення.

Згідно ГОСТ 1929 динамічну в'язкість визначають на ротаційному віскозиметрі (типу Реостат 2, або його подальших модифікацій), реєструючи момент опору обертання внутрішнього циліндра з досліджуваною оливою при різних градієнтах швидкості і розрахунку напруження зсуву.

Для визначення динамічної в'язкості оливи використовують також такий простий спосіб, як вимірювання при певній температурі сталої швидкості падіння недеформованої кульки усередині досліджуваної рідини, яка знаходиться в циліндрі приладу (рис. 7.3).

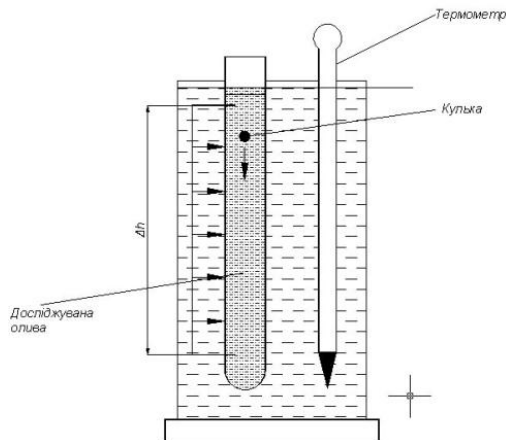


Рис.7.3 Віскозиметр з падаючою кулькою

В приладі замірюється час падіння кульки в рідині t з заданої висоти Δh . Припускається, що швидкість падіння кульки ($v=\Delta h/t$) в рідині незмінна, але необхідно підбирати масу і розміри кульки в залежності від в'язкості оливи.

На практиці цей метод використовують для рідин, які мають відносно високу в'язкість (моторна, трансмісійні оливи, гліцерин та ін.)

Згідно закону Стокса кулька радіусом r , рухаючись з сталою швидкістю v зазнає в в'язкій рідині опір:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (7.7)$$

Якщо рух здійснюється під впливом сили ваги, то сила, яка прикладена до кульки дорівнює:

$$F = \frac{3}{4} \pi r^3 g (\rho_1 - \rho_2), \quad (7.8)$$

де g – прискорення сили ваги;

ρ_1 і ρ_2 – відповідно густини кульки і рідини.

Таким чином:

$$\frac{3}{4} \pi r^2 g (\rho_1 - \rho_2) = 6\pi\eta r v \quad (7.9)$$

Звідки

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{9v} \quad (7.10)$$

В цих умовах дослідження закон Стокса додержується при наступних умовах: кульки мають правильну сферичну форму, гладкі і не деформуються, вони рухаються на достатньої відстані від дна і стінок циліндра; рідина повинна бути однорідною, в неї відсутні сторонні рухання (конвекційні токи і течі, рухи бульбашок газів та ін.); швидкість руху кульки повинна бути такою, щоб навколо неї встановлювалась ламінарна теча рідини.

При гідродинамічних розрахунках, пов'язаних із конструюванням трібо-систем і підбором для них оливи, звичайно використовують кінематичну в'язкість. Вона є обов'язковим показником в нормах для усіх мінеральних і синтетичних оливи.

Кінематична в'язкість ν (питомий коефіцієнт внутрішнього тертя) є мірою опору течії рідини під впливом гравітаційних сил. Кінематична в'язкість ν_t , пов'язана з динамічною η_t через густину рідини ρ_t при температурі дослідів t наступним виразом:

$$\nu_t = \frac{\eta_t}{\rho_t} \quad (7.11)$$

Одиниця виміру кінематичної в'язкості – $[m^2/c]$. В практиці використовують також меншу одиницю $[mm^2/c] = 10^{-6} m^2/c$.

Для визначення кінематичної в'язкості (ГОСТ 33–2000) використовують капілярні віскозиметри із скла з малим коефіцієнтом температурного розширення (табл.7.2).

Таблиця 7.2 -Віскозиметри для визначення кінематичної в'язкості

Тип віскозиметра	Діапазон в'язкості, мм ² /с
Віскозиметри Оствальда для прозорих рідин:	
Канон –Фенске звичайний	0,5...20000
Пінкевича (ВПЖТ–4)	0,6...10000
ВПЖТ–2	0,6...17000
Віскозиметри з висячим рівнем для прозорих рідин:	
ВПЖТ–1 (BS/IP/SL)	0,6...30000 (3,5...100000)
Убеллоде	0,3...100000
Віскозиметри із зворотним протоком для прозорих і непрозорих рідин:	
ВНЖТ (Каннон–Фенске-Опакв) – непрозорий	0,6...20000 (0,4...20000)
BS/IP/PF з V-образною трубкою	0,6...300000

Згідно ГОСТ 33–2000 (ISO 3104–94) визначення кінематичної в'язкості полягає в вимірюванні часу витікання визначеного об'єму рідини від мітки M_1 до мітки M_2 під впливом сили ваги при постійній температурі через калібрований скляний капілярний віскозиметр (рис. 7.4).

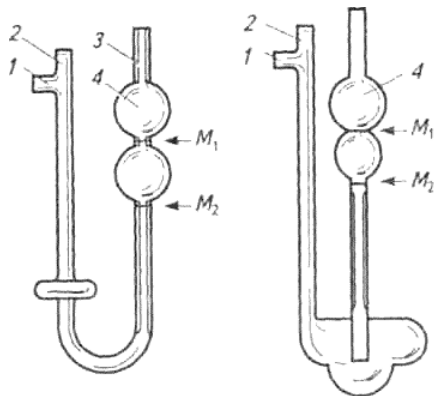


Рис. 7.4 Капілярні віскозиметри Пінкевича ВПЖТ–4 і ВПЖТ–2:
1–відвідна трубка; 2, 3–коліна; 4–розширення

В залежності від внутрішнього діаметра капіляра віскозиметра встановлена його стала, яка використовується для розрахунку в'язкості досліджуваного зразка оливи.

Значимість в'язкісних властивостей змащувальних олив настільки велика, що показник в'язкості є основою класифікації змащувальних олив. Однак при виборі оливи для машин і механізмів недостатньо знати в'язкість при одній певній температурі.

В'язкість оливи не є постійна величина, на неї впливають ряд факторів і передусім температура: чим вона вище, тим менша її в'язкість, і навпаки. Характер цієї залежності неоднаковий для олив із різної сировини, різних способів отримання та складу. Змінювання в'язкості від температури не підкорюється лінійної залежності, особливо в зоні високих температур.

Кінематичну в'язкість розраховують за формулою:

$$\nu = C\tau, \quad (7.12)$$

де C - стала віскозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$;

τ – час витікання оливи через капіляр віскозиметра, с.

Чим менше змінюється в'язкість з підвищенням чи зниженням температури, тим краще олива веде себе в експлуатації. Тому досить важливою є оцінка змащувальних олив за в'язкісно-температурними властивостями, тобто за ступенем положості зміни в'язкості від температури.

У міжнародній практиці для оцінки в'язкісно-температурної характеристики олив прийнято кількісний критерій, який називається індексом в'язкості.

Індекс в'язкості (ІВ) є умовним показником, який визначається порівнянням досліджуваної оливи з двома еталонними, в'язкісно-температурні властивості однієї з яких прийняті за 0, а іншої – за 100 одиниць. Чим вищий ІВ, тим більш полого в'язкісно-температурна характеристика і тим краща олива для зимової експлуатації.

Застосовується кілька систем визначення індексу в'язкості. Згідно ГОСТ 25371 його визначають по таблицям і номограмам в залежності від в'язкості при температурах 40 і 100°C

Найпоширенішою у світовій практиці є система Діна та Девіса. Ця система дозволяє порівнювати властивості аналізованої оливи з в'язкісно-температурними властивостями двох еталонних олив, для одної з яких умовно прийнято показник ІВ=0 (в'язкість дуже змінюється з температурою), а другої – ІВ=100 (в'язкість значно менш змінюється з температурою).

У відповідності з американським стандартом ASTM D 2270–79 (модифікацією цієї системи) індекс в'язкості розраховують за формулою:

$$IB = 100 \frac{\nu_0 - \nu_x}{\nu_0 - \nu_{100}}, \quad (7.13)$$

де ν_0 , ν_{100} , ν_x – відповідно кінематична в'язкість оливи з ІВ=0, ІВ=100 та випробуваної оливи.

В той час, коли була розроблена шкала індексів в'язкості, припускалось, що усі інші оливи за цим показником знаходяться в межах від 0 до 100. Однак використання сучасних методів очищення олив спеціальними розчинниками, полімерними присадками і синтетичними продуктами призвело до появи олив, які виходять за межі шкал індексів в обох напрямках.

Звичайно оливи з $IV < 80$ називають низькоіндексними, з $IV = 80 \dots 90$ – середньоіндексними, а з $IV > 90$ високоіндексними. Сучасні оливи з загущеними присадками мають $IV > 100$.

Наявність відомостей про величину індексу в'язкості має важливе значення у практиці використання олив, оскільки ці відомості необхідні для визначення можливого діапазону температур експлуатації машин і механізмів. Так, при низьких (мінусових) температурах в'язкість низькоіндексних олив настільки підвищується, що вони втрачають рухомість і не поступають в трибосистему при пуску, а при підвищеній температурі в'язкість знижується настільки, що не забезпечує гідродинамічного режиму мащення. Втрата рухомості олив при низьких температурах визначається вмістом в них твердих і поліциклічних ароматичних вуглеводнів, які кристалізуються і осідають в цих умовах використання. Високоіндексні оливи, навпаки, ефективно виконують свої функції в широкому діапазоні температур.

Разом з тим IV не відображає можливість використання олив в умовах низьких температур. Тому для зимових та всесезонних олив, крім IV , додатково вказують значення кінематичної або динамічної в'язкості при мінусовій температурі.

Індекс в'язкості нафтових олив визначається їхнім фракційним і вуглеводневим складом. Чим менша в'язкість оливи при 100°C , тим більш полого її в'язкісно-температурна характеристика (рис.7.5).

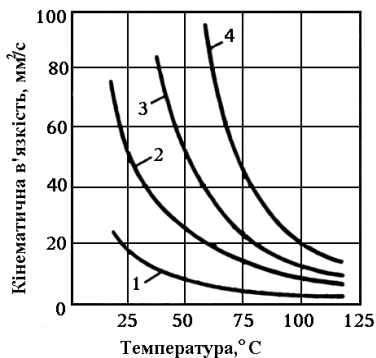


Рис. 7.5 В'язкісно-температурна характеристика олив, які мають в'язкість при температурі 100°C :

1 – 2,5 мм²/с; 2 – 6,0 мм²/с; 3 – 10,0 мм²/с; 4 – 20,0 мм²/с

Малов'язкі оливи характеризуються високим індексом в'язкості, але при високих експлуатаційних температурах їхня в'язкість є недостатньою для створення умов гідродинамічного режиму мащення.

Для забезпечення суміщення необхідної в'язкості при робочих температурах і при пологій залежності в'язкості від температури малов'язкі оливи загущують спеціальними в'язкісними (загущуючими) присадками.

Оливи, що містять ці присадки, називають загущеними. За основу для таких олив використовують оливи з в'язкістю 3,0 – 5,0 мм²/с при температурі 100°С. У загущених оливах мала в'язкість при низькій температурі забезпечується базовою оливою, а висока в'язкість при робочих температурах – в'язкісною присадкою.

Одержані таким чином оливи мають значно пологішу в'язкісно-температурну характеристику, ніж звичайні оливи, які мають таку ж в'язкість при робочих температурах (рис.7.6).

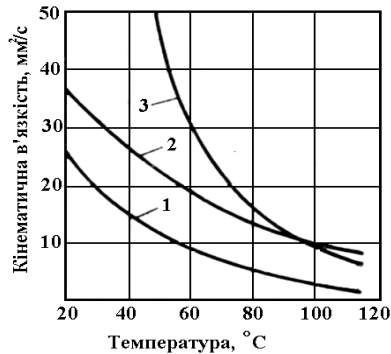


Рис.7.6. Вплив в'язкісної присадки на в'язкість оливи при різних температурах: 1 – малов'язка олива; 2 – та ж олива з в'язкісною присадкою; 3 – дистилатна олива, рівнов'язка при 100°С із загущеною оливою

Загущені оливи поєднують у собі добрі пускові та антифрикційні властивості, які характерні для малов'язких олив при низьких температурах та добрі мастильні властивості високов'язких олив при високих робочих температурах.

Застосування загущених присадок дозволяє одержати зимові та всесезонні оливи. Сучасні технології отримання всесезонних олив відкривають великі можливості для варіювання їх в'язкісних властивостей. Таке варіювання досягається використанням в складі всесезонних олив наряду з базовими малов'язкими мінеральними оливами з високим індексом в'язкості синтетичних компонентів, а також базових олив гідрокрекінгу з індексом в'язкості до 150 і сумішей останніх з мінеральними і синтетичними оливами. Суттєво розширюється асортимент полімерних в'язкісних присадок. Традиційним в'язкісним полімерним присадкам (поліметакрилатам, сополімерам олефінів) надають диспергуючі властивості. Використовують також нові присадки-модифікатори низькотемпературної прокачуємості LTPM (Low temperature pumpability modifiers), при додаванні яких в кількості 0,2 – 0,5% в декілька разів зменшується в'язкість всесезонних олив при низьких температурах і градієнті швидкості зсуву.

Існує принципова різниця між реологічними властивостями всесезонних

олив з полімерними в'язкісними присадками і без них. Загущенні макрополімерними присадками оливи – це неньютоновські рідини, в'язкість яких суттєво залежить від напруженості і від градієнту швидкості зсуву. Введення макрополімерних присадок значно впливає не тільки на реологічні, але і протизносні, миючі та інші властивості оливи. Тимчасове падіння в'язкості при високій температурі і градієнту швидкості зсуву, необоротне зниження в'язкості з-за механічної, термічної, і термоокислювальної деструкції макрополімерних присадок вважаються негативними властивостями загущених всесезонних олив. Однак загущені оливи складають значну долю всесезонних олив, тому що в цьому випадку в якості базової основи можна використовувати доступні і відносно дешеві мінеральні оливи, звичайно дистильовані в'язкістю 3,5...7 мм²/с при 100° С з індексом в'язкості 95...105.

Вартість базових олив гідрокрекінгу з індексом в'язкості 130...150 вище вартості мінеральних в 1,5 – 2 рази, однак, всесезонні моторні оливи на основі продуктів гідрокрекінгу знайшли більш широке використання. Вони поступаються синтетичним за температурою застигання, випаровуваністю (за виключенням алкілбензолів) і в'язкісно-температурною характеристикою при низьких негативних температурах. Однак, різниця за цими показниками не так визначальна в порівнянні з вартістю. В порівнянні зі звичайними малов'язкими мінеральними оливами селективного очищення оливи гідрокрекінгу мають ряд суттєвих переваг.

В якості загущуючих присадок використовують високомолекулярні полімерні та сополімерні продукти: поліізобутилені, поліметакрилати, полівінілалкілові ефіри, сополімери олефінів, стиролдієнові сополімери. Механізм дії в'язкісних присадок заснований на змінюванні форми та об'єму макромолекул полімерів в залежності від температури оливи. При високій температурі макрополімерні молекули, витягуючись у довгі розгалужені ланцюги, дають більший загущуючий ефект, ніж знаходячись у згорнутому стані при низьких температурах, коли полімерні молекули, притягуючись одна до одної під впливом внутрішньо-та міжмолекулярних адгезійних сил, витискують молекули оливи у процесі згортання в клубок.

В практиці використання оливи велике значення має також залежність їх в'язкості від тиску. В трібосистемах в умовах точкового і лінійного контакту навантажених третьових поверхонь в підшипниках кочення, зубчатих передачах, кульових опорах мастильний матеріал зазнає високі тиски, які можуть досягати сотні і тисячі МПа. У зв'язку зі скороченням відстані між молекулами при високих тисках взаємодія між ними збільшується. Відповідно при підвищених тисках в'язкість рідин зростає.

В'язкість стисливих рідин збільшується по мірі підвищення тиску. Відносно низька стисливість мінеральних та синтетичних олив призводить до значного збільшення в'язкості при високих тисках. Цей фактор слід враховувати, бо у всіх процесах мащення оливна плівка відчуває навантаження між третьовими поверхнями, а у гідравлічних системах олива зазнає тиску в

об'ємі. Наприклад, у підшипниках дробарок і млинів питомий тиск складає 2–20 МПа, у підшипниках колінчастого вала – 20–35 МПа, у втулках шатунів – 50–90 МПа, у парах кулачок-штовхач і у зубчастих передачах – 1500–3000 МПа та вище. Особливо велике навантаження оливи у гіпоїдних передачах.

Для прогнозування підвищення в'язкості оливи в залежності від навантаження користуються формулою:

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p}, \quad (7.14)$$

де η_p – динамічна в'язкість оливи при тиску P , Па·с;

η_0 – динамічна в'язкість оливи при атмосферному тиску, Па·с;

α – п'єзокоефіцієнт в'язкості, Па⁻¹.

П'єзокоефіцієнт в'язкості залежить від хімічного складу оливи і зростає зі збільшенням у ньому ароматичних вуглеводнів. В оливах з високим індексом в'язкості в'язкість збільшується у меншій мірі, ніж у низькоіндексних. Від п'єзов'язкісних властивостей оливи залежить товщина змащувальної плівки у місці контакту, коефіцієнт тертя, а також прокачуваність оливи у трубопроводах гідросистем.

Наприклад, при тиску 35 МПа в'язкість нафтової оливи подвоюється. Вже при тиску 50–100 МПа в'язкість зростає настільки, що олива втрачає властивості рідини і перетворюється на пластичне або квазітверде тіло.

Низькотемпературні характеристики. Для більшості мінеральних оливи є характерним різке підвищення в'язкості і повна втрата рухомості при зниженні температури. Ці явища пояснюються схильністю вуглеводнів, що входять в склад нафтових оливи, до асоціації з утворенням аморфних або кришталевих структур. Розмір і характер надмолекулярних структур залежить від будови вуглеводнів, режиму охолодження, присутності в оливі поверхнево-активних речовин (ПАР).

Висока в'язкість оливи і втрата рухливості відбивається на надійності роботи машин та механізмів, особливо в момент пуску. Зниження температури оливи призводить до збільшення пускового моменту прокручування двигуна, запізнювання подачі оливи до трібосистем і погіршення ефективності роботи оливоочисного обладнання.

Температура, при якій олива втрачає текучість, називається температурою застигання. Як і для рідкого палива, її визначають шляхом охолодження оливи у пробірці доти, доки меніск при нахилі пробірки на 45° не буде зміщуватися протягом однієї хвилини.

Застигання при зниженні температури, з одного боку, пов'язане з виділенням з рідкої фази оливи кристалів парафіну та утворенням з них структурного каркасу (структурне застигання), з іншого – викликане різким збільшенням в'язкості оливи.

Зниження температури застигання досягається депарафінізацією оливних дистилатів на нафтопереробних заводах.

Процес вилучення з оливи парафіну є складним і дорогим, крім того, при цьому з оливи вилучаються цінні компоненти. Тому депарафінізацію здійснюють частково до температури застигання оливи приблизно – 15°C.

Подальше зниження температури застигання забезпечується введенням депресорних присадок, ефективність яких проявляється при концентраціях від 0,05 до 1%. Якщо різниця температур застигання і помутніння оливи більше 10°C, то це свідчить про вміст депресорної присадки.

Механізм дії депресорних присадок зводиться до зміни кристалічної структури парафіну, що запобігає утворенню кристалічної решітки, яка з'являється при охолодженні оливи, та забезпечує, таким чином, її текучість при більш низькій температурі. Попередження утворення суцільної кристалічної решітки (структурного каркасу) досягається або в результаті адсорбції присадки на мікрочастинках парафіну, що виділяються з оливи, або внаслідок сумісної кристалізації з ним.

Ефективність депресорних присадок залежить від вуглеводневого складу оливи. Вони більш ефективні в оливах парафінової основи. Депресори у кількості до 1% здатні знизити температуру застигання на 25%. Застосування депресорів дозволяє використовувати для виробництва олив сировину різноманітного походження, в деяких випадках навіть без вилучення парафінових вуглеводнів

7.3.2 Мазильні (трібологічні) властивості

Однією з основних експлуатаційних властивостей, що характеризують якість мазильних матеріалів, є їх мазильна здатність. Оливи повинні мати високу мазильну властивість для створення на поверхні тертьових деталей міцної плівки, здатної знижувати втрати від тертя і запобігати або зменшувати їхнє зношування при робочих навантаженнях та швидкостях

Мазильна властивість є узагальненим поняттям, яке об'єднує кілька експлуатаційних властивостей олив, що впливають на процес тертя та зношування контрактованих поверхонь у машинах та механізмах. Основними з них є протизносні, протизадирні та антифрикційні властивості.

Мазильна дія в граничному режимі мащення тісно пов'язана з характером процесів на межі розділу метал-олива. При інших рівних умовах їх інтенсивність і особливості залежать від складу мазильного середовища і температури поверхні тертя, яка визначається режимом роботи трібосистеми. В цих умовах мазильне середовище (плівка оливи) як елемент третього тіла суттєво впливає на процеси тертя і зношування.

Підвищення мазильної властивості сучасних олив досягається введенням до їхнього складу присадок (антифрикційних, протизносних і протизадирних). При цьому не виключається вплив на тертя і зношування присадок іншого функціонального призначення.

Механізм дії присадок обумовлений двома факторами: адсорбцією присадок на металевих поверхнях і хімічною активністю молекул присадки сто-

совно до матеріалів третьових тіл. Присадки, які покращують мастильні властивості, класифікують переважно за призначенням – антифрикційні, протизносні та протизадирні.

Антифрикційні присадки (модифікатори тертя) знижують або стабілізують коефіцієнт тертя. В якості таких присадок використовують різноманітні оліворозчинні поверхво-активні речовини (ПАР), наприклад, солі довогланцюгових органічних кислот.

Для олів, які працюють в умовах високих температур або навантажень, використовують високотемпературні антифрикційні присадки і, перш за все дитиофосфати і дитиокарбамати молібдену. Такі присадки, взаємодіючи з поверхнями тертя, формують на металі полімолекулярні адсорбційно-хемосорбційні шари, які мають низький опір зсуву і легко відновлюються внаслідок високої адсорбційної активності у випадках пошкодження. Розкладаючись при більш жорстких умовах тертя (перш за все дитиокарбамати молібдена) висаджують на поверхнях сірку і молібден. Ці елементи в результаті вторинних реакцій на поверхнях тертя утворюють дисульфід молібдену, який забезпечує значний антифрикційний ефект.

Протизносні присадки запобігають інтенсивному зношуванню третьових поверхонь при помірних навантаженнях. До них відносять:

- сполучення з високою поверхневою активністю стосовно до третьових тіл і молекул з великою довжиною вуглеводневих ланцюгів, які надійно екранують силове поле твердих тіл;

- різноманітні зольні (ДФ-11, ДФБ, ЭФО) і беззольні (АДТФ, БМА-5) похідні дитиофосфорних кислот, які впливають також на антиокислювальну дію.

Протизадирні присадки запобігають заїданню при надвисоких навантаженнях, підвищуючи критичне навантаження заїдання. Вони, при високих температурах, хімічно взаємодіючи з металами третьових поверхонь, утворюють сполуки, які мають менший опір зрізу та більш низьку температуру плавлення, ніж чисті метали, внаслідок чого запобігають заїдання і схоплювання поверхонь.

В якості протизадирних присадок використовують сполучення, які мають значну реакційну здатність внаслідок чого, при розкладанні вони виділяють такі елементи, як хлор, фосфор, сірку та їх сполучення, а також деякі інші елементи. Вступаючи в хімічну взаємодію з поверхневими шарами третьових тіл, вони утворюють модифіковані шари, які надійно розділяють ці тіла і перешкоджають їх металевому контакту при терті. До таких присадок належать сульфідиди, дисульфідиди та їх похідні, ефіри, трихлорметилфосфонові кислоти тощо. (АБЭС, КИНХ-2, ОТП, хлореф-40, ЛЗ-318, ТОС, ВИГОС і т. ін.)

Атоми сірки, хлору і фосфору протизадирних присадок – основні компоненти, які в залежності від своєї реакційної здатності, вступають у реакції з металами в умовах тертя (температура, тиск). Так, сірка і сірчисті сполуки, починаючи з температури 200°C, утворюють сульфідні плівки. Плівки містять карбіди, оксиди, сульфати заліза (внаслідок окиснення). Ці плівки запобігають прямому контакту між металами третьових поверхонь. Коефіцієнт

тертя сталі складає 0,78, а коефіцієнт тертя FeS – 0,39. Завдяки відносно низькій температурі плавлення сульфід заліза у порівнянні зі сталлю, сульфід на півка зношується поступово і зварювання не відбувається.

Механізм протизадирної дії хлористих сполук ґрунтується на утворенні півки металхлориду на локальних мікроділянках поверхонь тертя в умовах високих навантажень і температур, особливо у присутності вологи. $FeCl_2$ плавиться при температурі $627^\circ C$ і тому має менший опір до зсуву, ніж сталь.

Фосфорні сполуки, завдяки низькій температурі плавлення можуть визвати так звану “поліруючу” дію фосфорорганічних присадок.

Завдяки вмісту реакційно здатних атомів сірки, хлору, фосфору – продукти реакції є ефективними протизадирними присадками, але вони мають досить сильну корозійну дію. Тому при розробці таких присадок знаходять компроміс між протизадірною ефективністю і корозійною агресивністю. Для досягнення оптимальних протизадірних якостей і зменшення корозії у протизадірних присадках використовують комбінації різних класів. Наприклад, протизадірні присадки у оливах для гіпоїдних передач вміщують декілька активних компонентів. Так, Cl, P, S вмісні сполуки комбінують з діалкілдітіофосфатом цинку. Перевагу віддають сполукам, які вміщують S, P, N.

Останнім часом для зниження зносу і тертя робочих поверхонь в умовах високих температур використовують добавки, які є колоїдними дисперсіями нерозчинних у оливі сполук (дисульфід молібдену, графіт). Ці сполуки називають також модифікаторами тертя. У ряді випадків модифікатори тертя більш ефективні, ніж оливорозчинні присадки, бо не втрачають мастильних властивостей у більш широкому температурному інтервалі та в умовах високих контактних тисків.

Оцінку мастильних властивостей оливок проводять різними методами випробувань у реальних вузлах машин і механізмів та кваліфікаційними випробуваннями.

Найбільше розповсюдження мають випробування оливок на чотирикульковій машині тертя (ЧКМ), основною складовою частиною якої є чотири сталеві загартовані кульки (рис 7.7).

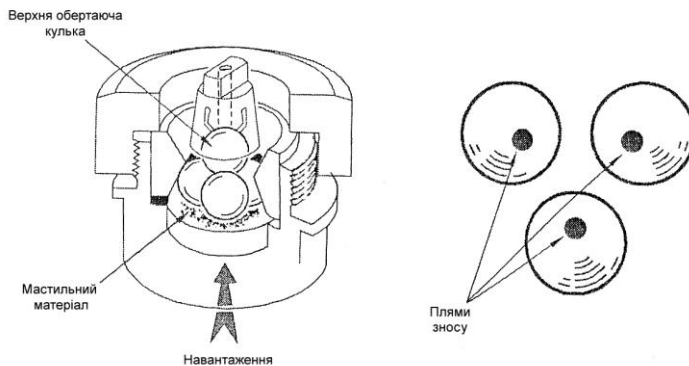


Рис.7.7 Оцінка трибологічних властивостей оливок на чотирикульковій машині тертя

Протизносні та протизадирні властивості мастильних матеріалів оцінюють за діаметром плями зносу на кульках та за критичними навантаженнями та завантаженням як зварювання, при якій відбувається задир кульок (ГОСТ 9490-75).

Визначаючи критичне навантаження P_k , навантаження зварювання $P_{зв}$, а інколи і індекс задиру I_3 , оцінюють здатність оливи протистояти задиру контактуючих сталевих поверхонь. При визначенні P_k і $P_{зв}$ здійснюють ряд послідовних випробовувань, поступово збільшуючи навантаження до тих пір, поки при черговому збільшенні навантаження не буде зафіксовано стрибкоподібного росту діаметра зносу (при визначенні P_k), або поки машина тертя автоматично не зупиниться із-за досягнення моменту тертя або зварювання кульок (при визначенні $P_{зв}$). Індекс задиру I_3 розраховують за спеціальними формулами, використовуючи заміри діаметрів слідів зносу на кульках в інтервалі навантажень від початкової до $P_{зв}$.

Крива зношування, отримана за допомогою машини тертя, наведена на рис.7.8.



Рис.7.8 Залежність діаметру плями зносу від навантаження

Критичне навантаження – навантаження, при якому виникає різке збільшення плям зносу на кульках за рахунок руйнування або плавлення адсорбованого шару оливи.

Навантаження зварювання – навантаження, коли виникає міцне з'єднання двох тертьових поверхонь металу в формі зварювання кульок.

Широке застосування одержав метод оцінки протизносних та протизадирних властивостей змащувальних матеріалів на машинах тертя КТ-2 і МАСТ-1. Ці машини забезпечують випробування за різноманітними схемами (рис. 7.9).

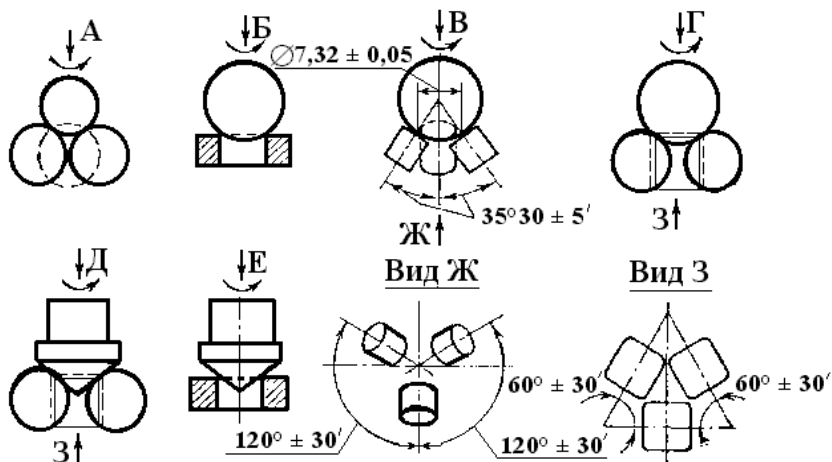


Рис. 7.9 Схема випробування олив на машинах тертя

Схеми А, В, Г, Д застосовують при випробуванні олив для зубчатих коліс, підшипників кочення, спряження кулачок-штовхач та ін.; схеми Б і Е – для підшипників ковзання та спряжень типу поршневе кільце-гільза двигуна.

Для більш об'єктивного аналізу мастильних властивостей необхідні дані не тільки про коефіцієнт тертя, але і про поведінку оливи стосовно до металевих поверхонь в широкому діапазоні температур. Тому велику увагу приділяють вивченню поверхневої (адсорбційної) активності і реакційної здатності присадок. (див. розділ 4)

Адсорбція характеризує накопичення в граничному шарі рідини, яка визначає формування захисної плівки і розвиток наступних процесів. Олива зосереджується не на усій поверхні, а тільки на активних її ділянках. Звичайно, що з методичної точки зору вірніше оперувати не стільки величиною, скільки швидкістю адсорбції, порівнюючи зі швидкістю переміщення третьових поверхонь. Але таке порівняння експериментально ускладнене і тому величина адсорбції остається поки єдиною кількісною характеристикою процесу тертя в присутності хімічно активного змащувального матеріалу.

Реакційна здатність також визначається прямим експериментом. Крім того, вона може оцінюватись рядом побічних показників, наприклад, термічною стійкістю.

Найбільші труднощі зустрічаються при оцінці поведінки хімічно модифікованих шарів. Їх поведінка залежить від хімічного складу, товщини і других характеристик. В спрощеному вигляді поведінка цих шарів характеризується температурою плавлення, твердістю і т. ін. Виходячи з практичної доцільності, протиспрацьовувальні присадки вибирають по їх поверхневої активності, а протизадирні – по реакційній здатності.

7.3.3 Антиокиснювальні властивості

Однією з найважливіших властивостей мастильних матеріалів, що характеризує їх при тривалій роботі машин і механізмів, є стабільність проти окиснення при підвищених температурах. Термоокиснювальна стабільність характеризує схильність оливи до утворення розчинених та нерозчинених у ній продуктів окиснення.

При зберіганні нафтових мастильних матеріалів при відносно невисокій температурі навколишнього середовища їхній хімічний склад і властивості змінюються незначно. Оптимально очищена олива при зберіганні у неопалюваному приміщенні в герметичній тарі може зберігати свої фізико-хімічні та експлуатаційні показники, в тому числі і стабільність проти окиснення протягом багатьох років. Олива в основному окиснюється у процесі роботи, коли вона опиняється під впливом високих температур та інших факторів. Окиснення оливи призводить до зміни її хімічного складу. В оливі з'являються кислоти, що мають високу корозійну агресивність, олива темнішає, стає більш в'язкою, у ній накопичуються механічні домішки органічного походження. При цьому експлуатаційні властивості різко погіршуються. Глибокі зміни якості оливи викликають необхідність її заміни.

Сприятливі умови для окиснення вуглеводневих олив створює добра розчинність у них кисню. Вирішальний вплив на окислюваність мастильних матеріалів має температура. Вже при температурі оливи близько 50°C та вище процес окиснення може проходити досить помітно, особливо в умовах контакту з повітрям протягом тривалого часу. Із збільшенням температури до 150°C швидкість окиснення різко зростає.

При постійній температурі процес окиснення відбувається в три етапи (рис.7. 10).

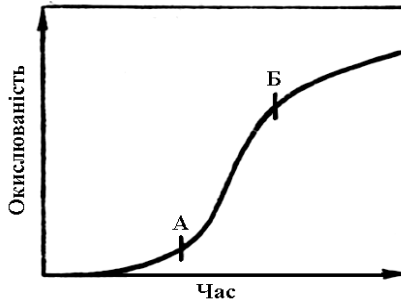


Рис. 7.10 Процес окиснення оливи

Початкова стадія – індукційний період (від початку координат до точки А) характеризується уповільненим ходом процесу. Протягом індукційного періоду окиснювальна агресивність кисню повітря відносно вуглеводнів (збільшення кислотності, в'язкості, наявності осадів) практично не

виявляється. Тривалість цього періоду залежить від хімічного складу і глибини очищення олив, наявності металів, які каталізують окиснення, температури та інших факторів.

Після закінчення індукційного періоду інтенсивність взаємодії оливи з киснем різко зростає, починається процес ініціювання окиснення (від точки А до точки Б). Він супроводжується виділенням теплоти й інтенсивним утворенням і накопичуванням у оливі кислих та нейтральних продуктів окиснення. Залежно від хімічного складу олив, у стадії інтенсивного окиснення, можуть утворюватися різноманітні продукти в різних співвідношеннях.

Після стадії ініціювання процес протягом певного часу прагне до стабілізації.

На швидкість окиснення оливи суттєво впливають метали, з яких виготовлені деталі машин і механізмів. Значну каталітичну дію на окиснювальний процес має залізо і мідь, а також їхні сполуки.

На інтенсивність і глибину окиснення оливи впливають також частки металів та забруднення неорганічного походження, які потрапляють у оливу внаслідок зношування, недостатнього очищення всмоктуваного повітря, а також металоорганічні сполуки, що утворюються внаслідок корозії або взаємодії продуктів зношування з органічними кислотами. Всі ці речовини також каталітично прискорюють процес окиснення оливи.

Стабільність мастильних матеріалів проти окиснення залежить як від структури та властивостей вуглеводів, так і від наявності різноманітних сірчистих, азотних і кисневмісних речовин, що входять до складу оливи.

Найстабільнішими проти окиснення є ароматичні вуглеводні без бокових ланцюгів. За ними слідують нафтонові вуглеводні і найбільш нестійкими є алкани. Наявність бокових ланцюгів у молекулах циклічних вуглеводнів знижує їхню стабільність проти окиснення. Чим більше бокових ланцюгів у молекулах ароматичних та нафтонових циклів і чим вони довші, тим менш вони стійкі до впливу кисню.

Різноманітні типи вуглеводнів, що входять у базову оливу, дають різні за хімічним складом та фізичними властивостями кінцеві продукти окиснення.

Окиснення оливи протікає як послідовна ланцюгова реакція за двома напрямками з утворенням нейтральних та кислих продуктів (рис. 7.11).

Першими проміжними продуктами окиснення вуглеводнів є пероксиди (нейтральні кінцеві сполуки, які перетворюються далі у кислоти і гідрокислоти). Крім того, як проміжні продукти окиснення, можуть утворюватися альдегіди, кетони та спирти. В міру збільшення ступеня окиснення оливи знижується розчинність її продуктів, збільшується їхня молекулярна маса, відбувається ущільнення і утворюються продукти конденсації та полімеризації – асфальтени, естоліди, смоли та ін. Кінцеві продукти окиснювальної полімеризації карбени і карбоїди не розчиняються у органічних сполуках.

До антиокиснювачів, крім речовин, що безпосередньо впливають на обривання реакційних окиснювальних ланцюгів, відносять також хімічні сполуки, які знижують активність металевих каталізаторів окиснення. До таких сполук належать речовини (пасиватори або деактиватори), які утворюють адсорбційні або хемосорбційні плівки на поверхні металів і таким чином запобігають безпосередньому контакту оливи з металом.

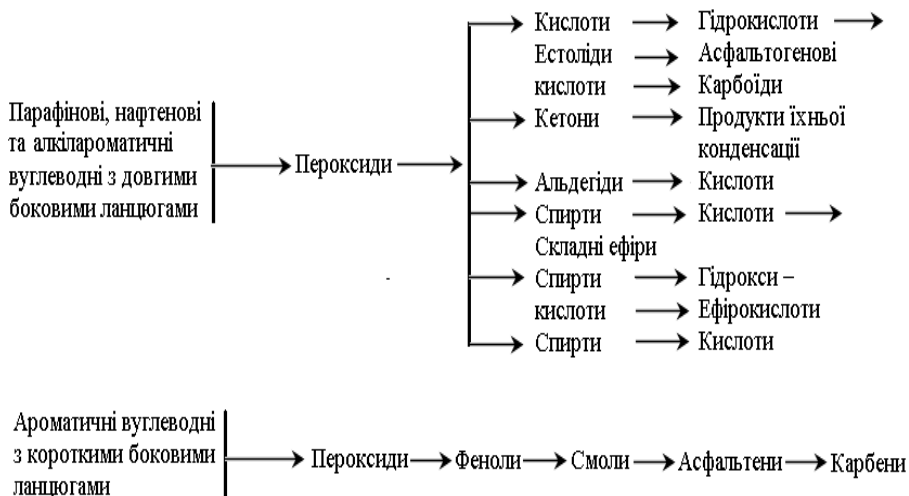


Рис. 7.11 Схема окиснення вуглеводнів оливи

Антиокиснювальні властивості олив оцінюють шляхом пропускання повітря або кисню крізь оливу при підвищених температурах за наявності каталізатора (мідь, залізо тощо) і у визначенні фізико-хімічних показників оливи до і після окиснення.

В залежності від призначення оливи змінюється температура, тривалість окиснення і каталізатор. Методи відбірних випробувань олив, які використовуються для оцінки антиокиснювальних властивостей і термоокиснювальної стабільності дослідних зразків, наведено у табл. 7.3.

Стабільність оливи характеризується зміною кислотного числа, в'язкості, наявністю смол (для олив без присадки) та коксування після проведення випробувань.

Про ступінь окиснення працюючої оливи роблять висновок за тими ж показниками, які використовуються для оцінки свіжої оливи, що зазнає штучного окиснення.

Таблиця 7.3 - Методи оцінки антиокиснювальних властивостей та термоокиснювальної стабільності оливо

Метод	Умови випробування	Показники оцінки
ДК-НАМИ (ГОСТ 11063–77)	Окиснення повітря у тонкому шарі (в обертовій І-подібній колбі) при температурі 200°C	Час окиснення до початку утворення нерозчинного осаду (індукційний період осадкоутворення); зростання в'язкості за час індукційного періоду
Визначення стабільності проти окиснення в універсальному апараті (ГОСТ 18136–72)	Окиснення в об'ємі при температурі до 250°C з продувкою киснем або повітрям у присутності або відсутності каталізаторів	Зростання в'язкості і коксівності; вмісту нерозчинного осаду; змінювання кислотного числа за час випробування
Оцінка періоду осадкоутворення оливо з присадками	Окиснення повітрям в об'ємі 20 мл при 230°C та інтенсивним обертовим стрижнем	Зміна оптичної густини за кожну годину випробування; час досягнення оптичної густини 0,5 (зменшення світлопропускання по відношенню до вихідного)
Метод Папок (ГОСТ 23175–78)	Ізотермічне окиснення в атмосфері повітря при заданій температурі	Час до утворення у випарнику рівних кількостей лаку і робочої фракції

7.3.4 Миюче-диспергуючі властивості

Миюче-диспергуючі властивості характеризують здатність оливи забезпечувати необхідну чистоту деталей машин і механізмів та підтримувати продукти окиснення і забруднення у зваженому стані. З підвищенням миюче-диспергуючих властивостей збільшується кількість нерозчинних речовин – механічних домішок, що утримуються в оливі без випадання у осад, а також зменшується кількість лакоподібних відкладень та нагарів, які утворюються та залишаються на гарячих деталях.

У більшості випадків миюче-диспергуючі властивості оливо мають велике практичне значення під час використання у двигунах внутрішнього згорання, бо моторні оливи, на відміну від оливо іншого призначення, зазнають впливу підвищеної температури та тиску, контакту з киснем повітря, агресивними газами, з різноманітними металами та інших факторів, які інтенсифікують окиснення, конденсацію та розклад вуглеводів. Вуглецеві речовини, які утворюються, осідають на деталях у вигляді нагару, лаку та шламу,

а також призводять до значних змін у фізико-хімічних та експлуатаційних показниках оливи.

Нагари – тверді речовини чорного кольору, які відкладаються у двигунах внутрішнього згоряння на стінках камери згоряння, клапанах, свічках, днищах поршнях тощо.

Лаки – тонкі, міцні, як правило, блискучі плівки з продуктів окиснення від світло-жовтого до темно-коричневого і навіть чорного кольору. Лаки відкладаються у зоні поршневих кілець, на юбці і внутрішніх стінках поршня, на стержнях клапанів та інших гарячих деталях. Нагар і лакові відкладення викликають пригорання поршневих кілець, задирки циліндро-поршневої групи, прорив продуктів згоряння в картер двигуна. Лакові плівки дуже міцні та мають низький коефіцієнт теплопровідності.

Низькотемпературні відкладення (шлами) – мазеподібні відкладення від коричневого до чорного кольору, накопичуються під час роботи двигуна на шийках колінчастого вала, в оливосистемі та на фільтрах. Вони являють собою суміш продуктів окиснення (гідроксикислоти, смоли та ін.) з оливою, водою та іншими речовинами (сажа, паливо тощо), що потрапляють у мастильну систему з камери згоряння.

Миюче-диспергуючі властивості мають велике значення також під час використання олив у інших механізмах, які експлуатуються в умовах підвищених робочих температур. Так, у сучасних гідромеханічних коробках передач, де температура іноді перевищує 150°C, на поверхні фрикційних дисків утворюються відкладення, які порушують надійність роботи агрегату.

Для зменшення або запобігання утворенню вуглецевих відкладень у оливи вводять спеціальні поверхнево-активні речовини – миюче-диспергуючі (детергентно-диспергуючі) присадки.

На миюче-диспергуючі присадки припадає 50% загальної кількості використовуваних присадок. Механізм дії цих присадок обумовлений адсорбцією їхніх молекул на металевих поверхнях. Молекули присадок, маючи підвищену поверхневу активність, адсорбуються на деталях двигуна, утворюючи міцний захисний шар, який запобігає осадженню та утворенню відкладень на високонагрітих деталях.

З іншого боку, миюче-диспергуючі присадки, адсорбуючись на поверхні нерозчинних у оливі часток механічних домішок, надають їм підвищеного електричного заряду. При цьому досягається ефект взаємного відштовхування однойменно заряджених часток та поверхонь і тим самим запобігається злипання (коагуляція) часток у більш крупні домішки й осадження на деталі.

Крім того, миюче-диспергуючі присадки нейтралізують кислі продукти, які утворюються у двигуні в процесі експлуатації при згорянні палива та окисленні оливи. Тому практично всі миюче-диспергуючі присадки мають певний запас лужності, при чому цей запас може бути значним. Чим більше лужної присадки є у оливі, тим забезпечується більша ефективність нейтралізації кислих продуктів. Лужність моторної оливи є одним з важливих показни-

ків, які визначають можливість забезпечувати тривалу нормальну роботу двигуна на високосірчистому паливі.

В якості миюче-диспергуючих присадок в основному застосовують металомісткі зольні присадки – сульфонати, алкілсаліцилати кальцію, барію або магнію у різноманітних поєднаних один з одним (НСК, детерсоли Д-50, Д-140 і Д-180, надлужна алкілсаліцилатна присадка Детерсол-300, С-150, АСБ)

Крім цих сполук використовують беззольні та малозольні миюче-диспергуючі присадки – сукцинамідні та сополімерні.

В основному сучасні оливи містять комбінації зольних і беззольних присадок у поєднанні з антиокиснювальними, протикорозійними та іншими компонентами, при яких досягаються оптимальні функціональні характеристики.

Для оцінки миючих і лакоутворюючих властивостей оливок використовують метод ПЗВ, розроблений К.К. Папок, А.П. Зарубіним і А.Б. Віппером. За цим методом оливу випробовують на установці ПЗВ, що являє собою одноциліндровий двигун з приводом від електродвигуна (рис. 7.12).

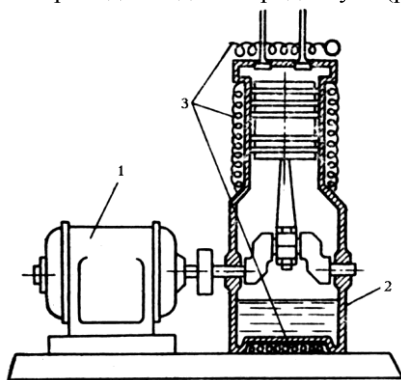


Рис. 7.12 Схема установки ПЗВ для визначення миючих властивостей оливок:
1 – електродвигун; 2 – одноциліндровий двигун; 3 – електропідігрів

Циліндр установки, оливу у картері та всмоктуване повітря нагрівають електронагрівальним приладом. За шлакоутворенням на боковій поверхні поршня після випробувань протягом двох годин оцінюють миючі властивості оливи, використовуючи кольорову еталонну шкалу у балах від 0 до 6. Аналіз залишку оливи у картері дозволяє оцінити її окиснюваність у об'ємі та випаровуваність.

7.3.5 Антикорозійні та захисні властивості

Корозія відбувається в результаті комбінованого впливу на поверхню металу активних реагентів з оточуючого середовища. До них належать волога у поєднанні з киснем та агресивними газами, які потрапляють з атмосфери, а також продукти окиснення оливи і згоряння палива. В теорії та практиці використання нафтопродуктів розглядають два види корозії – хімічну та еле-

ктрохімічну, які проходять за такими схемами взаємодії металу з корозійним середовищем:

- нафтопродукт + метал (хімічна корозія);
- нафтопродукт + вода + метал (електрохімічна корозія).

Тому розрізняють антикорозійні властивості оливи, пов'язані з хімічними процесами і, залежно від впливу самих змащувальних оливи, здатних викликати або запобігати хімічно-електрохімічній корозії металу, та захисні властивості, які характеризують здатність нафтопродуктів захищати металеві поверхні від корозії у присутності електроліту. Відповідно розрізняють антикорозійні присадки, які зменшують корозійний знос, перш за все, кольорових металів при високих температурах, та оливорозчинні інгібітори корозії, які поліпшують захисні властивості матеріалів.

Інтенсивність корозії металу у нафтопродукті залежить від температури, навантаження на тертьові поверхні, термоокиснювальної стабільності оливи і характеру продуктів його окиснення. На інтенсивність корозійних процесів також впливає тривалість контакту металу з корозійно-агресивними продуктами, наявність води у оливі, співвідношення між поверхнею металу та якістю оливи.

Поверхні металів, особливо кольорових, відносно легко зазнають впливу корозії внаслідок їхньої хімічної взаємодії з кислими продуктами. Такі продукти утворюються в процесі окиснення оливи. Корозійна агресивність оливи може бути обумовлена також наявністю функціональних, переважно протизносних і протизадирних присадок.

Основним джерелом корозійного впливу оливи на метал є низькомолекулярні карбонові та оксикарбонові кислоти, наприклад, мурав'яна, оцтова і масляна. Ці кислоти здатні викликати корозію металу вже при кімнатній температурі. Високомолекулярні кислоти проявляють здатність до таких реакцій лише при підвищених температурах (вище 100°C). При більш низьких температурах вони взаємодіють тільки у присутності води і кисню повітря, причому не безпосередньо з металом, а через його гідроксид, який утворюється внаслідок контакту металу з киснем і водою. Чим сильніше може окиснюватися олива, тим інтенсивніше вона кородує метал. Тому корозійна агресивність оливи залежить від тих самих факторів, що і схильність оливи до окиснення.

У свіжих мінеральних та синтетичних оливах корозійна агресивність мінімальна. Їхня кислотність незначна і визначається, головним чином, наявністю в них молекулярних нафтових кислот і функціональних присадок з кислою реакцією. Однак, з підвищенням температури агресивність цих сполук посилюється.

Корозія металів характеризується появою на їхніх поверхнях темних плям, раковин, шорсткості поверхні. Особливо інтенсивної хімічної корозії зазнають кольорові метали, які входять у антифрикційні сплави вкладишів підшипників колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання.

Про складний характер корозійних процесів свідчить різноманітність та характер цих видів руйнування (рис. 7.13)

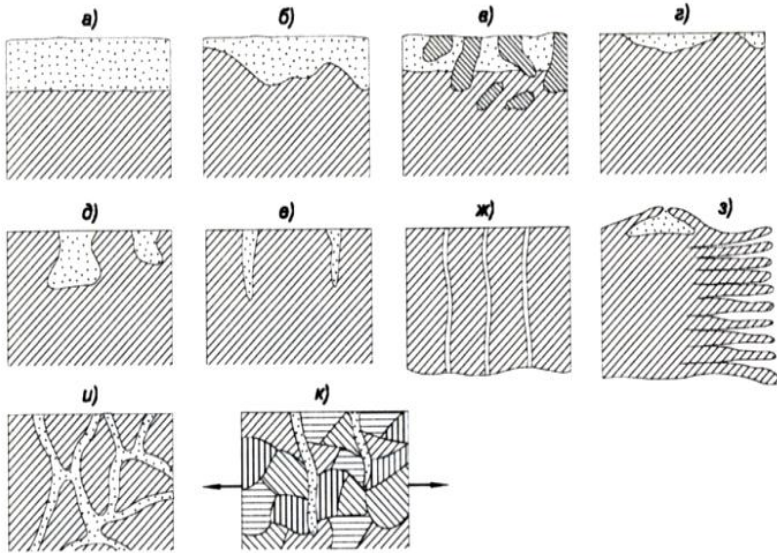


Рис. 7.13. Характер корозійних руйнувань

Суцільна корозія: а – рівномірна; б – нерівномірна; в – вибіркова.
 Місцева корозія: г – плямами; д – виразками; е – точкова; ж – наскрізна;
 з – підповерхнева; и – міжкристалічна; к – корозійне розтріскування.

Зниження корозійної агресивності змащувальних олиव досягається підвищенням їхніх антиокиснювальних властивостей шляхом додавання спеціальних протикорозійних присадок. Протикорозійні присадки сприяють утворенню на металевих поверхнях захисних плівок. Ці плівки перешкоджають безпосередньому впливу корозійно-агресивних речовин на метал. Крім того, вони дезактивують метал як каталізатор окиснення.

Процес утворення плівки полягає у проявленні як протикорозійних, так і антиокиснювальних функцій олив. Тому як інгібітори хімічної корозії найбільше застосування мають присадки ДФ-1, ДФ-11, ИНХП 121, ВНИИ НП-354, які одночасно є і антиокиснювальними присадками.

Найчастіше корозійну агресивність оливи стосовно до металів оцінюють, витримуючи у ній металеві пластинки при підвищеній температурі, і фіксують зміни зовнішнього вигляду поверхонь пластинок (ГОСТ 2917–76).

Захисні властивості характеризують здатність мастильних матеріалів протистояти розвитку електрохімічної корозії металів під час роботи і в періоди короткочасних та тривалих простоїв машин і механізмів, у тому числі і при їхньому зберіганні.

Оскільки електрохімічна корозія є наслідком електролітичних явищ, запобігання їй досягається тільки за допомогою захисних присадок (інгібіторів

корозії). Захисні присадки формують на металевій поверхні міцні адсорбційно-хемосорбційні плівки, які є непроникними для води та кисню. Інгібітори корозії також поліпшують змочувальну здатність мастильного середовища стосовно до металів, гальмують анодний, катодний або одночасно обидва процеси електрохімічної корозії.

Широке розповсюдження у сільськогосподарському виробництві для використання в експлуатації та консервації автотракторної і сільськогосподарської техніки має захисна присадка АКОР-1 (ГОСТ 15171–78). Присадку додають у мастильні оливи для поліпшення їхніх захисних властивостей або застосовують як самостійний продукт для консервації машин і механізмів.

Промисловістю випускаються також ефективні захисні присадки КП, КП-2, СИМ, АЯА та ін. Вони використовуються для виготовлення робочо-консерваційних олив різноманітного призначення.

Методи оцінки захисних властивостей олив різноманітні. Їх застосовують, головним чином, для оцінки швидкодії та водовитискуючих властивостей олив, а також міцності утворених ними адсорбційних та хемосорбційних захисних плівок.

Швидкодію захисних олив оцінюють за ГОСТ 9.54–75 або за близьким до нього методом FTMS 51081. Згідно з цими методами, металеві пластинки опускають на короткий час у бромисто-водневу кислоту або її емульсію з оливою, а потім кілька разів занурюють у оливу і тримають у ній. Після цього пластинки переносять у камеру вологості та фіксують момент появи перших ознак корозії.

Водовитискування оцінюють методом FTMS 3007.1, наносячи на сталеві пластинки спочатку дистильовану воду, а потім оливу, яка випробовується. Після цього пластинки витримують одну годину при 100%-й вологості і оцінюють їх корозію.

Міцність захисної плівки встановлюють, піддаючи її дії водо-оливної емульсії та конденсаційної води або різних агресивних середовищ. Для цього проводять тривалі випробування пластинок, захищених оливою, у камерах вологості за ГОСТ 9.054–75.

7.3.6 Протипінні та деемульгуючі властивості

При динамічних умовах використання нафтові оливи можуть утворювати стійку піну. Основною причиною спінення оливи є аерація – насичення оливи повітрям. Піноутворення виникає внаслідок інтенсивного перемішування оливи з розчиненим та диспергованим в ній повітрям. Це – фізичний процес, який характеризується появою на поверхні рідини дисперсної системи повітря-олива з концентрацією газової фази 50% і більше. Піноутворюючі властивості олив полягають у схильності їх до спінення і стабільності піни в часі. Ці властивості залежать від хімічного складу оливи, її в'язкості, густини, поверхневого натягу, а також від умов експлуатації (температури, кратності циркуляції, інтенсивності перемішування). З підвищенням температури оли-

ви її піноутворення знижується. Малов'язкі оливи утворюють піну, яка складається з великих бульбашок, що легко руйнуються. У високов'язких оливах утворюються більш стабільні дрібні бульбашки. Схильність олив до спінення збільшується також, коли в них присутні поверхнево-активні речовини: мючі і протизадирні присадки, інгібітори корозії. Утворенню піни сприяють наявні в оливах забруднення, продукти окиснення, волога, смолисто-асфальтові речовини та сіркоорганічні речовини.

Внаслідок піноутворення погіршується тепловідведення і нормальне надходження оливи до поверхонь тертя, посилюються кавітаційні явища, відбувається викид оливи з оливосистем.

Піноутворення олив зменшують різні хімічні сполуки: багатоатомні спирти, складні ефіри, сополімери ефірів акрилової кислоти та інші. Найпоширенішим і ефективним протипінним засобом є присадка ПМС-200А – поліметилсилоксан.

Методи оцінки схильності олив до спінення полягають у перепусканні певного об'єму повітря через фіксовану кількість оливи, що випробовується, у заданих умовах. Після чого визначають об'єм утвореної піни та тривалість її існування. У нестандартних методах, для оцінки здатності олив до піноутворення, використовують такі критерії, як висота стовпа піни, коефіцієнт спінення (відношення висоти стовпа піни та оливи до висоти стовпа оливи до спінення), кратність піни (відношення об'єму піни до об'єму оливи). Стабільність піни часто визначають терміном її існування.

При потраплянні води у мастильні оливи можуть утворюватися відносно стабільні емульсії типу вода-олива, які утруднюють нормальну роботу оливних систем. Наявність таких емульсій викликає зменшення в'язкості оливи, внаслідок чого порушується гідродинамічний режим тертя. Крім того, погіршуються мастильні властивості олив, збільшується електрохімічна корозія металевих поверхонь. Збільшення сумарного об'єму оливи при утворенні емульсії викликає її викид із системи змащення.

Для запобігання утворенню стійких емульсій у оливи вводять деемульгуючі присадки. Дія таких присадок полягає у руйнуванні оливних оболонок та відділенні води від оливи внаслідок зменшення поверхневого натягу плівки оливи, яка обволікає краплини води. Як деемульгатори використовують поверхнево-активні речовини.

Емульгуючі властивості олив визначають у відповідності до ГОСТ 12068–66. Оцінку проводять визначенням числа деемульсації, за яке приймають час у секундах, потрібний для відокремлення заданої кількості оливи з водо-оливної емульсії, одержаної у певних умовах випробування.

7.3.7 Характеристики інших властивостей та якості олив

До важливих характеристик змащувальних олив, крім розглянутих, належать теплопровідність, температура спалаху, температура застигання, луж-

не число, зольність та ін. Ці показники змінюються в досить широких межах в залежності від складу функціонального призначення та умов використання олив.

Лужне число характеризує умовну міру здатності оливи нейтралізувати кислоти, утворені з продуктів згоряння палива, та окиснення основи олив (мг КОН/г оливи). У випадку свіжої оливи воно залежить в основному від наявності металовмісних детергентів і в меншій мірі – беззольних дисперсантів. Лужність визначають потенціометричним титруванням соляною кислотою. За кордоном лужне число моторних олив визначають методами ASTM D 664 і ASTM D 2896. В першому випадку воно відповідає цьому показнику визначеному за ГОСТ 11362–76, а в другому перевищує його на 15–20%. Для працюючих олив ця різниця може бути значно більшою. Для запобігання завищеної оцінки нейтралізуючих властивостей перевагу віддають методу ASTM D 664.

Температура спалаху – мінімальна температура, при якій в визначених умовах в контакт з відкритим полум'ям з'являється перший спалах в суміші парів повітря і оливи над поверхнею рідини, але подальшого горіння не спостерігається. Це має велике значення з точки зору безпеки і використовується для класифікації олив за ступенем пожежебезпеки. В товарних оливах вона знаходиться в межах 160...240°C. Крім того, використовують для визначення присутності в оливі домішок легкозаймистих компонентів або забруднень паливом. Поряд з визначеною в'язкістю оливи показник температури спалаху дозволяє встановити чи є продукт вузької або широкої фракції або є сумішшю двох фракцій. Температура спалаху низькокиплячих олив визначається в закритому тиглі (ГОСТ 6356), висококиплячих – у відкритому (ГОСТ 4333). Враховуючи, що ці методи дають різні результати, в кожному випадку слід вказувати метод визначення.

Температура помутніння і застигання. Поведінка олив в низькотемпературних умовах характеризується температурою, при якій олива стає мутною при визначених умовах охолодження внаслідок початку виділення твердих парафінових вуглеводнів (точка помутніння), або температурою, при якій олива втрачає рухомість (температура застигання) Якщо застигання оливи виникає завдяки виділенню і затвердінню парафіну, точка помутніння вище температури застигання; якщо виділення парафінів відсутнє, олива втрачає текучість із-за збільшення в'язкості (при цьому температури помутніння не відмічається). Втрата текучості оливи виключає можливість прокачування (циркуляцію) її в мастильних системах механізмів, і надходження її у трібосистемі утруднюється або зовсім припиняється. Для більшої частини олив температура застигання, як умовний показник втрати рухомості, нормується. Для визначення температури застигання невелика кількість оливи в пробірці охолоджують до температури, за якої олива застигає настільки, що при нахилу пробірки рівень її не зміщується. Умовність цього показника як експлуатаційної характеристики пояснюється тим, що встановлена таким способом температура засти-

гання часто не відображує істинний стан оливи при даній температурі. В умовах експлуатації механізмів при прокачуванні оливи через оливопроводи її структурні елементи руйнуються і олива може зберігати рухомість при температурах на 10-15° С нижче встановленої вказаним методом.

Коксівність оливи характеризує вміст в оливі коксоподібного залишку (% маси), отриманого при спалюванні зразка оливи в спеціальному приладі без доступу повітря. Цей показник прийнятий в якості норми для ряду олив, зокрема, моторних олив. За нашого часу його використовують в основному для оцінки схильності до коксівності олив, призначених для роботи при високих температурах, а також для відпрацьованих олив.

Коксівність визначають за Конрадсону (ГОСТ 19932, ISO 6515) спалюванням досліджуваної оливи з подальшим визначенням коксового залишку.

Відсутність прямого зв'язку між схильністю оливи до утворення нагару на гарячих деталях механізмів і коксівністю дозволяє вважати цей показник в значній мірі умовним, який характеризує лише походження, склад, спосіб і глибину очищення оливи. Наприклад у випадку олив з комплексними присадками висока коксівність може вказувати на присутність присадки.

Зольність. Компоненти, що утворюють золу в свіжих і працюючих оливах – це залишки після очищення або домішки, які потрапили в оливу при виробництві, зберіганні та транспортуванні. Другий шлях виникнення – введення їх з присадками. В працюючих оливах присутні також неорганічні механічні домішки, які потрапляють в оливу під час її експлуатації, в тому числі і металеві частки зносу.

Утворення золи (звичайно у вигляді сульфатів металів) у трібосистемі при підвищенні температури може призвести до утворення відкладень на робочих поверхнях контактуючих тіл, що знижує надійність механізму та погіршує його експлуатаційні характеристики. Сульфатна зольність оцінюється у відповідності з ГОСТ 12417.

Механічні домішки і вода. При наявності в оливі сторонніх домішок, особливо абразивних часток (пісок, пил, продукти зносу деталей та ін.) та води вище допустимих граничних норм збільшується знос і нагароутворення в механізмах. За вмістом механічних домішок поряд з другими показниками (наприклад, кислотним числом) можна оцінювати робото-здатність оливи в механізмі, якості фільтрації і відстою оливи.

Теплофізичні властивості оливи – теплоємність і теплопровідність визначає здатність відводити теплоту від поверхонь тертя до змащувального шару, а отже, теплову напруженість трібосистеми. При інших рівних умовах, чим вище теплоємність оливи, тим нижче температура трібосистеми. Для теплових розрахунків звичайно визначають питому теплоємність і коефіцієнт теплопровідності оливи. Для нафтових і синтетичних олив питома теплоємність $c_p = (0,82 \dots 2,1) \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), а коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,1 \dots 0,15$ Вт/(м·К). Вода в якості основного компонента деяких композицій забезпечує кращий тепловідвід: $c_p = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,6$ Вт/(м·К).

7.4 Рідкі мастильні матеріали

7.4.1 Моторні оливи

Вимоги до властивостей і якості. Моторні оливи можуть тривало і надійно виконувати свої функції тільки у разі відповідності їхніх фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей тим термічним, механічним і хімічним впливам, яких вони зазнають у мастильній системі двигуна і на поверхнях змащених та охолоджуваних деталей. Тільки при взаємній відповідності системи "моторна олива – конструкція двигуна – умови експлуатації" може бути досягнута висока експлуатаційна надійність двигуна.

Сучасні моторні оливи, які характеризуються особливо високими експлуатаційними властивостями, стали необхідними елементами двигунів внутрішнього згоряння.

До якостей моторної оливи для кожного типу двигуна внутрішнього згоряння, залежно від умов його експлуатації, ставиться ряд вимог, часто специфічних. При високих температурах моторні оливи повинні зберігати досить високу в'язкість для забезпечення необхідного режиму мащення і створення надійного ущільнення між поршнем і гільзою. При низьких температурах навколишнього середовища в'язкісно-температурні властивості оливи повинні забезпечувати можливість легкого запуску двигуна.

В'язкість оливи особливо важлива для створення гідродинамічного режиму мащення, наприклад, у шатунних та корінних підшипниках колінчастого вала.

Для забезпечення мінімального зношування в умовах граничного мащення оливи повинні мати здатність модифікувати третьові поверхні і нейтралізувати утворені при роботі продукти кислотного характеру.

Внаслідок високого термічного впливу, якого зазнає олива у двигуні, ставляться жорсткі вимоги до її окиснювальних властивостей і антикорозійних якостей, особливо стосовно до кольорових металів. Крім того, моторні оливи повинні мати миюче-диспергуючі властивості стосовно до нерозчинних забруднень у поєднанні з ефективною нейтралізуючою дією, забезпечуючи чистоту деталей у всіх температурних зонах двигуна.

Останнім часом велике значення надається захисним властивостям оливи для двигунів, які працюють на низькотемпературних режимах, а також з короткочасними і тривалими перервами у роботі.

До деяких моторних олив ставляться специфічні додаткові вимоги. Так оливи, загущені в'язкісними присадками, повинні мати досить високу стійкість до механічної та термічної деструкції. Для олив також важлива вологостійкість присадок і незначна емульгованість з водою.

Вітчизняна класифікація моторних олив регламентується у відповідності з ГОСТ 17479.1–85. Згідно з цим стандартом (зміни № 1-3), в залежності від кінематичної в'язкості, оливи поділяють на класи (табл. 7.4).

Для літніх класів нормують межу в'язкості при температурі 100°C, а для зимових – при температурі –18°C. Всесезонні оливи повинні одночасно

задовольняти нормам в'язкості одного літнього та одного зимового класів. Клас таких олив позначається дробом, у чисельнику і знаменнику якого вказують клас в'язкості зимової та літньої олив відповідно. Літера “з” вказує на наявність у оливі загущуючих присадок.

Таблиця 7.4 - Класифікація моторних олив за в'язкістю (ГОСТ 17479.1–85)

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість, мм ² /с при температурі, °С		Клас в'язкості	Кінематична в'язкість, мм ² /с при температурі, °С	
	100	– 18		100	– 18
3 _з	≥ 3,8	≤ 1250	24	21,9–26,3	–
4 _з	≥ 4,1	≤ 2600	3 _з /8	7,0–9,3	≤ 1250
5 _з	≥ 5,6	≤ 6000	4 _з /6	5,6–7,0	≤ 2600
6 _з	≥ 5,6	≤ 10400	4 _з /8	7,0–9,3	≤ 2600
6	5,6–7,0	–	4 _з /10	9,3–11,5	≤ 2600
8	7,0–9,3	–	5 _з /10	9,3–11,5	≤ 6000
10	9,3–11,5	–	5 _з /12	11,5–12,5	≤ 6000
12	11,5–12,5	–	5 _з /14	12,5–14,5	≤ 6000
14	12,5–14,5	–	6 _з /10	9,3–11,5	≤ 10400
16	14,5–16,3	–	6 _з /14	12,5–14,5	≤ 10400
20	16,3–21,9	–	6 _з /16	14,5–16,3	≤ 10400

Згідно з ГОСТ 17479.1–85 (зміни № 1-3), в залежності від експлуатаційних властивостей та сфері застосування, оливи поділяють на групи А, Б, В, Г, Д і Е (табл. 7.5.)

Належність оливи до тієї чи іншої експлуатаційної групи встановлюють на підставі результатів класифікаційних випробувань на спеціальних одноциліндрових установках або повнорозмірних двигунах. Для олив різних груп визначені норми на оціночні показники, які передбачені методами випробувань. Порівнюючи результати моторних випробувань оливи за цими нормами, визначають її приналежність до відповідної групи за експлуатаційними властивостями.

Згідно з класифікацією система позначення моторних олив включає кілька знаків: літеру “М” (моторне), цифровий індекс, який характеризує клас кінематичної в'язкості, потім ставлять літеру з цифровими індексами 1 або 2, що означають належність до групи за експлуатаційними властивостями та типом двигуна. Універсальні оливи, призначені для використання як у дизелях, так і в бензинових двигунах одного рівня форсування цифрового індексу не мають, а оливи, що належать до різних груп, мають подвійне значення, в якому перше значення характеризує якість оливи для використання у дизелях, друге – у бензинових двигунах.

Таблиця 7.5 - Класифікація моторних олив за призначенням та експлуатаційними властивостями (ГОСТ 17479.1–85)

Група олив		Рекомендована галузі застосування
А		Нефорсовані бензинові двигуни та дизелі
Б	Б ₁	Малофорсовані бензинові двигуни, які працюють в умовах, що сприяють утворенню високотемпературних відкладень і корозії підшипників.
	Б ₂	Малофорсовані дизелі
В	В ₁	Середньофорсовані бензинові двигуни, які працюють в умовах, що сприяють окисненню оливи і утворенню усіх видів відкладень.
	В ₂	Середньофорсовані дизелі з підвищеними вимогами до антикорозійних, протизносних властивостей олив і здатності запобігати утворенню високотемпературних відкладень
Г	Г ₁	Високофорсовані бензинові двигуни, які працюють у важких експлуатаційних умовах, що сприяють окисненню оливи і утворенню всіх видів відкладень та корозії.
	Г ₂	Високофорсовані дизелі без наддуву або з помірним наддувом, які працюють у експлуатаційних умовах, що сприяють утворенню високотемпературних відкладень
Д	Д ₁	Високофорсовані бензинові двигуни, які працюють у експлуатаційних умовах більш важких, ніж для олив групи Г ₁ .
	Д ₂	Високофорсовані дизелі з наддувом, які працюють у важких експлуатаційних умовах, або коли використане паливо вимагає застосування оливи з високою нейтралізуючою здатністю, антикорозійними та протиспрацьовувальними властивостями, незначною схильністю до утворення всіх видів відкладень
Е	Е ₁	Високофорсовані бензинові двигуни і дизелі, які працюють у експлуатаційних умовах більш важких, ніж для олив груп Д ₁ і Д ₂ .
	Е ₂	Відрізняються підвищеною диспергуючою здатністю, кращими протизносними властивостями

Приклади позначення оливи: М-10-Г₂ – моторна олива, цифра 10 вказує на те, що ця олива має кінематичну в'язкість 9,3...11,5 мм²/с при температурі 100°С, а індекс Г₂ – що олива призначена для високофорсованих дизельних двигунів без наддуву або з помірним наддувом;

М-4₃/8-В₂Г₁ – моторна всесезонна універсальна олива, клас в'язкості 4₃/8 свідчить про те, що її кінематична в'язкість при температурі –18°С дорівнює 1250–2600 мм²/с, а при 100°С – 7...9,3 мм²/с. Ця олива призначена для використання у середньофорсованих дизелях групи (В₂) та у високофорсованих карбюраторних двигунах – (Г₁).

Після основного позначення у дужках може бути вказано додаткове позначення, яке характеризує відмінні ознаки оливи, наприклад, “рк” – робочо-

консерваційне – М-8-Г₂ (рк); “к” – для двигунів автомобілів КамАЗ – М-10-Г₂(к); “и” – має композицію імпорتنних присадок – М-10-Г₁ (и); “м” – має в своєму складі малозольні присадки – М-10-Д (м) тощо.

Деякі фірми України виробляють моторні оливи за технічними умовами підприємств, показники якості яких можуть відрізнятися від встановлених стандартів на оливи, які використовуються в наш час в Україні і деяких країнах СНД як міждержавні. Для таких олив застосовується позначення, запропоноване Українським науково-дослідним інститутом нафтопереробки (МАСМА), у якому вказують:

- фірмову назву продукту (ГАЛЮЛ–АТ НКП “Галичина”, Славол-АТ “Укртатнафта”, ЛЕОЛ–Лебединський оливозавод, АЗМОЛ–Бердянське АТ “Азовські мастила і оливи”);

- цифровий індекс, який вказує клас в’язкості за американською класифікацією SAE J 300 (див. табл.7.6);

- цифровий індекс експлуатаційної групи згідно ГОСТ 17479.1 (1 – група А; 2 – група Б; 3 – група В; 4 – група Г; 5 – група Д; 6 – група Е);

- цифровий індекс, який характеризує тип двигуна (0 – олива універсальна, тобто для бензинових і дизельних двигунів; 1 – для бензинових двигунів; 2 – для дизельних двигунів).

Наприклад: ЛЕОЛ-М-15/4041 (ТУ У 22589938.005–95А) – олива моторна з класом в’язкості SAE 15W-40(15/40) для всесезонного використання у високофорсованих (цифра 4) бензинових двигунах (цифра 1);

АЗМОЛ-М-4032 – олива моторна з класом в’язкості SAE-40 (цифра 40) для використання у середньофорсованих (цифра 3) дизельних двигунах (цифра 2).

Зарубіжна класифікація моторних олив. Зарубіжні моторобудівники в інструкціях, а виробники моторних олив у проспектах, рекламі, у маркуванні тари використовують одні і ті ж умовні позначення властивостей, галузей використання і характеристик олив. Ці позначення прийняті у відповідності до класифікацій товариства інженерів-автомобілістів США (SAE), Американського нафтового інституту (API), Асоціації європейських виробників автомобілів (ACEA).

В останні роки використовується також класифікація Міжнародного комітету по стандартизації і допуску до застосування мастильних матеріалів (ILSAC), яка сформульована американською (ААМА) і японською (JAMA) асоціаціями автомобілебудівників.

Зарубіжні моторні оливи класифікуються за трьома основними ознаками:

- в’язкісно-температурними властивостями;
- галузь використання і рівнем експлуатаційних властивостей;
- наявністю або відсутністю енергозберігаючих властивостей.

У США розроблені і впроваджені класифікації моторних олив за в’язкістю товариством інженерів-автомобілістів (Society of Automobile Engineers) і за умовами застосування Американським нафтовим інститутом (Amerikan Petroleum Institute). Ці класифікації вважаються міжнародними тому що вони широко використовуються у багатьох країнах світу, причому у

деяких з них прийняті як національний стандарт.

Відповідно до класифікації SAE моторні оливи поділяються на шість зимових (0W, 5W, 10W, 15W, 20W, та 25W) і п'ять літніх (20, 30, 40, 50, 60) класів (табл.7.6).

Таблиця 7.6 - Класифікація оливо за SAE J300

Клас в'язкості SAE	Низькотемпературна характеристика		Кінематична в'язкість, мм ² /с при 100°С	
	Обертваність	Прокачуваність	не менш	не більш
	Динамічна в'язкість, 10 ⁻³ Па·с, при температурі °С, не більше	Температура, °С, при якій динамічна в'язкість не перевищує 60000 10 ⁻³ м Па·с		
0W	3250 при -30°С	-40	3,8	—
5W	3500 при -25°С	-35	3,8	—
10W	3500 при -20°С	-30	4,1	—
15W	3500 при -15°С	-25	5,6	—
20W	4500 при -10°С	-20	5,6	—
25W	6000 при -5°С	-5	9,3	—
20	—	—	5,6	9,3
30	—	—	9,3	12,5
40	—	—	12,5	16,3
40	—	—	12,5	16,3
50	—	—	16,3	21,9
60	—	—	21,9	26,1

У позначенні зимових оливо після цифрового індексу проставляють літеру “W”. Згідно з позначенням за класифікацією SAE цифра означає середнє значення в'язкості в універсальних секундах Сейболта (SSU), поділених на 2.

Всесезонні оливи у класифікації SAE позначаються подвійним номером, наприклад, 15W-40. Таке маркування вказує на те, що при мінусових температурах даний сорт відповідає вимогам, які ставляться до зимової оливи класу 15W, а при плюсових – до літньої оливи класу 40.

Кожен клас зимової оливи характеризується двома параметрами: динамічною в'язкістю при мінусових температурах та мінімальним значенням кінематичної в'язкості при 100°С. Для літніх оливо запроваджені межі кінематичної в'язкості при 100°С і мінімальні значення динамічної в'язкості при 150°С при швидкості зсуву 10⁶ с⁻¹. Клас зимової або всесезонної оливи характеризується двома значеннями динамічної в'язкості при температурах, які відрізняються на 10°С. Перше значення визначають за допомогою імітатора холодного пуску (по ASTM Д 5293). Воно характеризує граничну температу-

ру оливи, при якій можливе обертання двигуна стартером. Друге значення вказує на граничну температуру, при якій оливний насос буде прокачувати оливу під тиском у процесі холодного запуску. Гранична температура прокачування повинна бути обов'язково нижчою для гарантованого запобігання “оливного голодування” тертьових поверхонь, що змашуються під тиском, під час холодного пуску двигуна. Орієнтовна відповідність в'язкісних класифікацій оливи за ГОСТ 17479 1–85 (зміни №1-3) та SAE наведені в табл. 7.7.

Таблиця 7.7 - Відповідність класів в'язкості моторних оливи за ГОСТ 17479.1–85 та SAE J 300

Клас в'язкості		Клас в'язкості	
ГОСТ	SAE	ГОСТ	SAE
3 _з	5W	24	60
4 _з	10W	3 _з /8	5W-20
5 _з	15W	4 _з /6	10W-20
6 _з	20W	4 _з /8	10W-20
6	20	4 _з /10	10W-30
8	20	5 _з /10	15W-30
10	30	5 _з /12	15W-30
12	30	5 _з /14	15W-40
14	40	6 _з /10	20W-30
16	40	6 _з /14	20W-40
20	50	6 _з /16	20W-40

При виборі оливи для зимової експлуатації потрібно завжди пам'ятати цифру 35. Якщо від неї відняти зимовий індекс класу в'язкості за SAE, то отримаємо значення граничної температури прокачуваності, тобто температуру, при якій олива ще зберігає текучість. Наприклад: олива SAE 10W-40 може використовуватися до –25°C (35–10=25).

Дані табл.7.7. дозволяють встановити відповідність вітчизняних та зарубіжних сортів моторних оливи шляхом порівняння класифікаційних характеристик за класами в'язкості. Класи в'язкості SAE у більшості випадків мають більш широкі діапазони кінематичної в'язкості при 100°C, ніж такі, що визначені ГОСТ 17479.1–85. Тому одному класу SAE можуть відповідати два суміжних класи вітчизняного стандарту. У цьому випадку перевагу слід віддавати аналогу, який має найближче фактичне значення за даними нормативних документів на даний продукт.

Рівень експлуатаційних властивостей моторних оливи оцінюється за класифікацією API. Згідно з класифікацією передбачається поділ моторних оливи на дві категорії і ряд класів:

– категорія S (Service) – оливи, призначені для чотиритактних бензинових двигунів легкових автомобілів, мікроавтобусів і автофургонів.

– категорія С (Commercial) – оливи призначені для чотири- і двотактних дизелів автотракторної та сільськогосподарської техніки.

У порядку зростання експлуатаційних властивостей у межах кожної категорії оливи поділяють на класи:

- SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI та SL;
- CA, CB, CC, CD, CD-II, CE, CF, CF-2, CF-4, CG-4 і CH-4.

Друга літера у маркуванні олив (A, B, C, D, E, F, G, H, I та L) характеризує робочі навантаження роботи двигуна, для якого вони призначені, та вимоги до якості оливи. Цифри у позначенні вказують, що оливи призначені для використання у двотактних (CD-2 і CF-2 класів) або у чотиритактних (CF-4 і CG-4 класів) дизелях.

Універсальні оливи, які задовольняють вимогам певних класів категорій S і C, одночасно позначаються подвійним маркуванням, наприклад API SI/CF-4.

Сьогодні у США сертифікують моторні оливи за вісьмома класами: SH і SI та SL категорії “Service” і CF, CF-2, CF-4, CG-4, CH-4 категорії “Commercial”. Але на ринку ще зустрічаються оливи класів SE, SF, SG, CC, CD, CE, а також універсальні SF/CC, SG/CD, SG/CE та ін.

Оливи застарілих у США класів API слід використовувати тільки у випадках, коли вони рекомендуються виробниками техніки в керівництвах з експлуатації.

Характеристику здатності оливи забезпечувати економію палива (Energy Conserving) часто позначають абрєвіатурою EC після класу по API (наприклад, API SI/CF-4 EC, де EC означає – енергозберігаюча). Римська цифра II у позначенні EC II свідчить про високу ступінь енергозберігаючих властивостей. Градація EC I означає наявність помірних енергозберігаючих властивостей.

Автомобілебудівні фірми США і Японії сформулювали єдині мінімальні вимоги до моторних олив для чотиритактних бензинових двигунів у класифікації ILSAC, яка сьогодні має два класи олив GF-1 і GF-2. Вони практично ідентичні класам API SH і SJ відповідно. Основна різниця полягає у тому, що оливи класів GF-1 і GF-2 обов’язково енергозберігаючі і всесезонні, причому зимова характеристика обмежена трьома класами SAE OW, 5W і 10W.

На сьогодні у Європі діє, розроблена асоціацією Європейських виробників автомобілів, класифікація олив ACEA (на заміну застарілої CCMC).

Відповідно до цієї класифікації, у вимогах до моторних олив враховують конструктивні особливості двигунів європейського виробництва. Класифікація ACEA на відміну від API виділяє оливи для дизелів легкових автомобілів і автофургонів у самостійну категорію. Ця класифікація дозволяє виробництво і використання олив усіх класів в’язкості SAE, якщо їхня стійкість до механічної деструкції і динамічна в’язкість при 150°C при градієнті швидкості зсуву 10^6 c^{-1} відповідає певним вимогам.

За класифікацією ACEA-98 встановлені три категорії моторних олив, в залежності від експлуатаційних вимог (табл.7.8).

Таблиця 7.8 - Призначення моторних олив згідно з класифікацією ACEA

Класифікація ACEA	Призначення
Бензинові двигуни	
A1	Для двигунів, спроектованих для використання малов'язких олив; мають високі екологічні та енергозберігаючі властивості
A2	Для двигунів загального призначення; мають високі енергозберігаючі властивості
A3	Для важконавантажених двигунів випуску до 1997 р., які використовуються всесезонно з подовженим терміном до зміни оливи (якщо непередбачено виробником двигуна); відповідають вищим сучасним вимогам до експлуатаційних властивостей олив
Легконавантажені дизельні двигуни	
B1	Для двигунів, спроектованих для використання малов'язких олив; енергозберігаючі оливи
B2	Для використання у більшості двигунів і легких автофургонів загального призначення (переважно з нерозділеною камерою згорання); енергозберігаючі оливи
B3	Для двигунів випуску до 1997 р., всесезонного використання; відповідають вищим сучасним вимогам до експлуатаційних властивостей
B4	Для застосування в двигунах з нерозділеною камерою згорання, які вимагають оливи спеціальних якостей
Важконавантажені дизельні двигуни	
E1	Для дизелів без наддуву і з невеликим турбонаддувом при легких помірних умовах експлуатації
E2	Для дизелів без наддуву і з турбонаддувом при умовах експлуатації від середніх до важких
E3	Для дизелів випуску з 1997р. з турбонаддувом, які працюють в важких умовах експлуатації; рекомендовано для дизелів з рівнем токсичності за викидами відповідно до вимог Euro-1, Euro-2
E4	Оливи з експлуатаційними властивостями вищими, ніж у групі E3; призначені для двигунів, які відповідають рівню токсичності за викидами вимогам Euro-1, Euro-2 і працюють у дуже важких умовах експлуатації; мають тривалий термін роботи без заміни оливи (якщо непередбачено виробником двигуна)
E5	Для високошвидкісних дизелів з турбонаддувом, які відповідають рівню токсичності за викидами вимогам Euro-1, Euro-2 і Euro-3; мають суттєво збільшений термін роботи без заміни оливи (якщо непередбачено виробником двигуна)

Першому рівню якості оливо у групах А1 і В1 відповідають вимоги до енергозберігаючих оливо, які за експлуатаційними властивостями повинні бути не гірше другого рівня. В інших випадках принцип такий: чим більша цифра рівня якості, тим вище вимоги до оливи.

У маркуванні оливо вказується рік введення вимог, а також позначення чергового їхнього видання. Номер року позначається двома цифрами і означає рік введення більш жорстких вимог до існуючої раніше категорії (наприклад А3–96). Новий наступний номер року означає, що у сучасну категорію введено нові параметри та вимоги до випробування оливо (наприклад, А3–98).

Чергове видання позначається словом “issue”(видання) і порядковим номером. Він додається до основного позначення номера року при оновленні технічних вимог (наприклад, Е2–96 issue2) без позначення спеціальної жорсткості вимог.

У першій редакції класифікації АСЕА–96 моторні оливи поділялись на три класи (А, В і Е) по три категорії у кожному (А1–96, А2–96, А3–96, В1–96, В2–96, В3–96, Е1–96, Е2–96, Е3–96). У другій редакції АСЕА–98 збережено три класи класифікації АСЕА–96, але збільшена кількість категорій до одинадцяти (А1–98, А2–96 “issue2”, А3–98, В1–98, В2–98, В3–98, В4–98, Е1–96 “issue2”, Е2–96 “issue2”, Е4–98 і Е5–99).

Класифікації АСЕА і АРІ визначають базові, фундаментальні вимоги до моторних оливо. Однак багато фірм-виробників автомобілів, використовуючи свої права, доповнюють вимоги класифікацій власними вимогами. Вони обумовлені специфікою конструкції двигунів, використанням рідкісних експлуатаційних матеріалів та ін. Такі додаткові вимоги мають місце у фірмових специфікаціях моторних оливо. Їхнє виконання перевіряється спеціальними фірмовими методами випробувань у двигунах, які випускає дана фірма.

Виробники моторних оливо, звичайно, вказують, яким класам SAE за в'язкістю та яким класам АРІ і АСЕА за рівнем експлуатаційних властивостей і умов використання відповідає даний продукт. Крім того, якщо олива пройшла відповідні випробування певних фірмових специфікацій, виробник оливи обов'язково повідомляє споживача про наявність допуску до використання продукту конкретними фірмами, які виробляють техніку.

Найбільш поширені фірмові специфікації моторних оливо мають такі позначення:

- Volvo VDS, Volvo VDS-2;
- BMW “Special Oils”
- Mercedes-Benz: MB229.1, MB 228.5, MB 228.2/3, MB 228.0/1, MB 227.0/1;
- MAN 270, MAN 271, MAN OC 13017, MAN M 3275, MAN M 3277.

Наприклад, олива певної торгової марки може характеризуватися так: SAE 10W-40, АРІ SH/CF-4, АСЕА А3-96/В3-96, BMW “Special Oils”, VW 500.00, VW 505.00, VW 501.01/505.00. Замість позначення фірмових специфікацій може бути приведений перелік фірм, які видали допуск на використання

ня даної оливи і внесли її марку в інструкцію з експлуатації машини.

Споживач моторних олив із запропонованого асортименту повинен вибрати той продукт, який відповідає специфікації фірми-виробника двигуна. Тільки при відсутності на ринку оливи, яка відповідає фірмовій специфікації, слід використовувати таку, що відповідає базовим вимогам класифікацій. При цьому для техніки американського виробництва перевага надається оливам, які сертифіковані за класифікацією API, а для європейського виробництва – ACEA.

Оскільки класифікації API, ACEA, ILSAC різняться за вимогами до олив і методами випробувань, можна зробити висновки про приблизну відповідність, а не про ідентичність олив тих чи інших класів. Приблизну відповідність класів моторних олив, призначених для двигунів різних типів за класифікаціями API, ACEA та ILSAC наведено у табл. 7.9.

Таблиця 7.9 - Орієнтовна відповідність експлуатаційних класів за API, ACEA та ILSAC

Класифікація	Оливи для бензинових двигунів			Оливи для важконавантажених дизелів				
	A1-98	A2-96 issue2	A3-98	E1-96 issue2	E2-96 issue2	E3-96 issue2	E4-98	E5-99
API	–	SH	SI	CD	CD	CF-4	CG-4	CH-4
ILSAC	–	GF-1	GF-2	–	–	–	–	–

Крім класу в'язкості, рівня експлуатаційних властивостей, інформації про наявність енергозберігаючих характеристик, а також переліку фірмових специфікацій або офіційних допусків виробників техніки, фірми, які виготовляють оливи, повідомляють споживачам своєї продукції типові значення деяких фізико-хімічних показників якості оливи.

Це найчастіше такі показники, як кінематична в'язкість при 40 і 100°C, індекс в'язкості, температура спалаху, лужне число, сульфатна зольність та ін. Така інформація потрібна споживачеві не тільки для оцінки якості оливи і придатності до подальшого використання, але й для діагностування двигунів.

Наприклад, якщо дві оливи мають практично однакову в'язкість при 100°C, а при 40°C їхня в'язкість відрізняється, то перевага надається тій оливі, у якої остання нижче, бо у неї вище індекс в'язкості. Для всесезонних не загущених олив високий індекс в'язкості свідчить про те, що олива, отримана шляхом глибокого очищення з нафти, сприятливого складу.

Температура спалаху оливи пов'язана з її фракційним складом і структурою молекул базових компонентів. При інших рівних умовах оливі, у якої температура спалаху вище, надають перевагу. Температура спалаху таких олив суттєво знижується у порівнянні з початковим значенням, якщо у про-

цесі роботи вона розріджується паливом внаслідок несправностей двигуна. За температурою спалаху і в'язкістю визначається ступінь розрідження оливи, яка працює у двигуні. Це дозволяє оцінити технічний стан систем паливopодачі, запалювання або карбюратора.

Сульфатна зольність обмежується верхньою межею і визначається нормативною документацією на виробництво моторних олив, а також класифікаціями (не повинна бути вище допустимої). Це обумовлено тим, що надмірна зольність оливи може призвести до передчасного займання робочої суміші внаслідок утворення відкладень у камері згоряння, а також несприятливо впливати на працездатність свічок запалювання. Сульфідна зольність може також викликати підвищене зношування деталей внаслідок абразивної дії на тертьові поверхні. Базові оливи практично беззольні. Підвищена сульфатна зольність моторних олив, в основному обумовлена наявністю у їх складі миючих присадок, які містять в собі метали.

Лужне число є умовною мірою здатності оливи нейтралізувати кислі продукти неповного згоряння палива і продукти окислення олив. Процес спрацьовування лужного запасу присадок пов'язаний з нейтралізацією кислот, з одночасним диспергуванням забруднень. Він у значній мірі залежить від вмісту сірки у паливі. Зниження лужного числа під час роботи двигуна призводить до погіршення експлуатаційних властивостей оливи і, як наслідок, до підвищеного зношування його деталей. При цьому зростає нагаротворення і утворення лакових відкладень на них. Лужне число має допустимі межі, при досягненні яких олива вважається непрацездатною. Тому за інших рівних умов перевага віддається тій оливі, у якої лужне число вище.

Слід зазначити, що досить складно вибрати на підставі класифікації або специфічних вимог оливу із числа повністю взаємозамінних. При розгляді асортименту олив перевагу слід надавати тим маркам, які за фізико-хімічними характеристиками ближче відповідають марці, що змінюється. Особливу увагу слід звернути на відповідність таких характеристик олив, як температура спалаху і застигання, які є найбільш загальними і важливими характеристиками експлуатаційних властивостей. Також слід уникати і еквівалентних замін, при яких олива-замінник за рівнем експлуатаційних властивостей суттєво перевищує сорт, який заміняється. Крім фактора вартості застосування такої оливи може привести до відмов двигунів внаслідок занадто високого вмісту хімічно-активних присадок у оливі.

Асортимент моторних олив. Бензинові двигуни використовуються у легкових та вантажних автомобілях, автобусах, міні-тракторах та іншій техніці. Вони характеризуються, як правило, швидкісними і навантажувальними, а значить і температурними режимами, які змінюються у процесі роботи. Це ставить підвищені вимоги до здатності оливи запобігати утворенню як високо-, так і низькотемпературних відкладень, а також до їхніх антиокислювальних властивостей. За фізико-хімічними і

експлуатаційними показниками ці оливи повинні відповідати вимогам і нормам ГОСТ 10541–78, які наведені у табл. 7.10. і 7.11.

Таблиця 7.10 - Фізико-хімічні показники олив моторних універсальних і для бензинових двигунів (ГОСТ 10541–78)

Найменування показника	Норма для марки			
	М-6 ₃ /12Г ₁	М-5 ₃ /10Г ₁	М-8В	М-6 ₃ /10В
В'язкість кінематична, мм ² /с, при 100°С	≥12	10-11	7,5-8,5	9,5 - 10,5
Індекс в'язкості, не менше	115	120	93	120
Масова частка механічних домішок, % не більше	0,015	0,015	0,015	0,02
Температура спалаху у відкритому тиглі, °С, не нижче	210	200	207	190
Температура застигання °С, не вище	-30	-38	-25	-30
Корозійність на пластинках із свинцю, г/м ² , не більше	відсутня	5,0	10,0	4,0
Миючі властивості по ПЗВ, бали, не більше	0,5		–	4,0
Лужне число, мг КОН на 1г оливи, не менш	7,5	5,0	4,2	5,5
Зольність сульфатна, %, не більше	1,3	0,9	0,95	1,3
Масова частка активних елементів, %, не менш: кальцію цинку фосфору	0,23 0,10 –	0,20 0,12 –	0,16 0,09 0,09	– – –
Густина при 20°С, кг/м ³ , не вище	900	900	905	890

Сучасні дизельні двигуни характеризуються великою різноманітністю типів, конструкцій та умов експлуатації. Тому асортимент олив для дизельних двигунів охоплює всі групи експлуатаційних властивостей від А до Е, передбачених класифікацією. Особливістю дизельних олив є підвищені вимоги до рівня миюче-диспергуючих та антикорозійних властивостей. Основою дизельних олив є дистилатні, залишкові або компаундовані базові оливи селективної очистки, які одержують з малосірчистих або сірчистих нафт. У всі дизельні оливи вводять багатофункціональні присадки або композиції присадок. Показники якості олив для швидкохідних дизелів, комбайнів та автомобілів наведено у табл. 7.11.

7.4.2 Трансмiсійні оливи

Специфічні умови, у яких працює трансмісійна олива, характеризуються трьома основними особливостями: високими питомими контактними навантаженнями в зоні зачеплення шестеренних передач, підвищеними швидкостями відносного ковзання тертьових поверхонь зубів та широким інтервалом робочих температур.

Виходячи з особливостей умов роботи змащувальних матеріалів у сучасних трансмісіях, загальною для всіх трансмісійних оливо є вимога надійно і протягом заданого ресурсу роботи розділяти контактуючі зуби шестерень та охороняти поверхні тертя від зносу, пітингу, заїдання та інших пошкоджень, а також знижувати до мінімуму втрати на тертя. Крім того, олива повинна відводити тепло від поверхонь тертя, знижувати дію ударних навантажень, шум та вібрацію шестерень, з'єднань та вузлів силових передач.

На правильний вибір трансмісійних оливо впливають такі фактори:

- конструкція і компоновка, передаюча потужність, швидкість, співвідношення ковзання і колової швидкості, передаточне число, матеріал зубчатих коліс, однорідність цього матеріалу;
- технологія виробництва—прецизійність виготовлення шестерень, клас обробки поверхонь шестеренних передач, термічна обробка, твердість поверхні;
- коробка передач—жорсткість, теплові деформації, об'єм оливи;
- умови роботи—швидкість ковзання, навантаження, вібрації, температура, нагрів зовні;
- сумісність з матеріалами—чорними, кольоровими і легкими сплавами, пластиками, матеріалами сальників, лакофарбовими покриттями.

В агрегатах трансмісії автотракторної та сільськогосподарської техніки середньоексплуатаційна температура, що встановилась за час роботи трансмісії, складає 60...90 °С. При обкатці та деяких важких режимах роботи машин, наприклад, при буксировці, температура масла підвищується до 120 °С. Фактична температура масла в зоні контакту зубів шестерен значно вище температури масла в об'ємі на 150...250 °С. Помітно впливає на температуру швидкість ковзання на поверхні зубів у зоні їх контакту та в'язкість оливи.

Швидкості ковзання та питомі тиски на поверхні зубів шестерень є важливими характеристиками, що визначають можливість застосування оливи в шестеренчастій передачі. При збільшенні навантаження змащувальна плівка, що розділяє поверхні тертя, може руйнуватися, що приводить до безпосереднього контакту металевих поверхонь, їх заїданню та катастрофічного спрацювання. Зі збільшенням швидкості ковзання навантаження, при якому починається заїдання, знижуються. Фактичні швидкості ковзання в циліндричних та конічних передачах складають на вході в зачеплення 1,5...3,0 м/с, у деяких агрегатах вони досягають 9...12 м/с. Для гіпоїдних передач швидкості ковзання складають 15 м/с, а для черв'ячних редукторів на лінії зачеплення — 20...25 м/с.

Внаслідок лінійного контакту зубів шестерень на їх поверхні виникають високі питомі навантаження, що ускладнює здійснення гідродинамічного режиму

мащення. Напруженість зубчастих передач залежить від їх типів та взаємного розташування осей. У циліндричних, конічних і черв'ячних передачах питомі навантаження в полюсі зачеплення складають звичайно 500...1500 МПа, досягаючи в деяких випадках 2000 МПа. У гіпоїдних передачах вони в 2 рази вище. Під впливом таких навантажень в'язкість оливи в тертьовому контакті різко зростає й умови для гідродинамічного режиму мащення погіршуються.

Виходячи з особливостей умов роботи змащувальних матеріалів у сучасних трансмісіях, загальною для всіх трансмісійних олив є вимога надійно і протягом заданого ресурсу роботи розділяти контактуючі зуби шестерен і охороняти поверхні тертя від зносу, пітингу, заїдання та інших пошкоджень, а також знижувати до мінімуму втрати на тертя. Крім того, олива повинна відводити тепло від поверхонь тертя, знижувати дію ударних навантажень, шум та вібрацію шестерень, сполучень та вузлів силових передач.

З трибологічної точки зору найбільш сприятливою вважається класифікація зубчастих передач за взаємним розташуванням осей. Основні типи шестеренних передач схематично представлені в таблиці 7.12.

Таблиця 7.12 - Основні типи зубчастих передач

Назва передачі	Схема	Тип контакту
Циліндричні зубчасті колеса (паралельні осі)		Лінійний контакт (кочення і ковзання перпендикулярно або під кутом до лінії контакту)
Конічні шестерні (перетинні осі)		
Черв'ячні передачі (перетинні осі, зачеплення по осям)		Лінійний контакт (переважає ковзання)
Гіпоїдні передачі (перетинні осі, зачеплення по зовнішнім осям)		Точковий контакт (переважає ковзання)

З ростом питомого навантаження і швидкості ковзання зростають вимоги до несучої здатності трансмісійних олив. У випадку використання конічних зубчастих коліс з перетинними осями ковзання здійснюється в площині евольвентного зачеплення, при використанні гіпоїдних передач має місце додаткове тертя ковзання в зоні ніжок зубів із-за взаємного розташування осей.

Критеріями вибору трансмісійних оливо служить в'язкість, температури застигання і спалаху. Основні вимоги до якості оливо визначаються здатністю впливу на швидкість зношування, навантаження заїдання, коефіцієнт тертя і припрацювальні властивості. До допоміжних показників якості оливо відносять: в'язкісно-температурні, низькотемпературні, антикорозійні властивості, агресивність до неметалів, спінювання, окислювальна стабільність, деаерація, сумісність з ущільнювальними матеріалами.

У трансмісіях автомобілів, тракторів та сільськогосподарських машин використовують оливи широкого асортименту, починаючи від дистилатів та залишків без присадок або з м'якими протизносними присадками, і закінчуючи гіпоїдними з високоефективними протизадирними присадками.

Різноманітність вимог до трансмісійних оливо, залежно від галузей застосування, та численність марок визначили необхідність класифікувати їх за в'язкістю та за найважливішими експлуатаційними ознаками, прийнятими у міжнародній практиці.

За класифікацією (ГОСТ 17479.2–85), залежно від рівня в'язкості, трансмісійні оливи поділяють на 4 класи (табл. 7.13.)

Таблиця 7.13 - Класифікація трансмісійних оливо за в'язкістю

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при температурі 100°C, мм ² /с	Температура, при якій динамічна в'язкість не перевищує 150 Па·с, °C, не вище
9	6,0–10,99	– 35
12	11,0–13,99	– 26
18	14,0–24,99	– 18
34	25,0–41,0	–

У кожному класі встановлені допустимі межі кінематичної в'язкості при 100°C та мінісових температурах, при яких ще забезпечується надійна робота трансмісій, бо динамічна в'язкість при цій температурі не перевищує 150 Па·с.

Залежно від експлуатаційних властивостей та рекомендованих галузей застосування оливи для трансмісій автомобілів, тракторів та іншої мобільної техніки віднесені до 5 груп (табл. 7.14.)

Групу трансмісійних оливо за експлуатаційними властивостями встановлюють за результатами оцінки їхніх властивостей і випробувань з визначенням трібологічних характеристик за ГОСТ 9490-75 (табл. 7.15).

Згідно з ГОСТ 17479.2–85 передбачена також система позначень (маркування) оливо для трансмісій. Трансмісійні оливи маркують групою знаків, перша з яких – літери ТМ (трансмісійна олива); друга група знаків позначається цифрами і характеризує належність трансмісійної оливи до тієї чи іншої групи за експлуатаційними властивостями; третя – позначається цифрами, які характеризують клас в'язкості при температурі 100°C. При наявності загущуючої присадки позначення додатково має індекс “з”.

Таблиця 7.14 - Класифікація трансмісійних олив за експлуатаційними властивостями

Група олив	Склад олив	Рекомендована область застосування
ТМ-1	Нафтові (мінеральні) оливи без присадок	Циліндричні, конічні та черв'ячні передачі, які працюють при контактних напруженнях від 900 до 1600 МПа та температурі оливи у об'ємі до 90°C.
ТМ-2	Мінеральні оливи з проти-зносними присадками	Те ж, при контактних напруженнях до 2100 МПа та температурі оливи у об'ємі до 130°C.
ТМ-3	Мінеральні оливи з проти-задирними присадками помірної ефективності	Циліндричні, конічні, спірально-конічні та гіпоїдні передачі, які працюють при контактних напруженнях до 2500 МПа і температурі оливи у об'ємі до 150°C.
ТМ-4	Мінеральні оливи з проти-задирними присадками високої ефективності	Циліндричні, спірально-конічні та гіпоїдні передачі, що працюють при контактних напруженнях до 3000 МПа і температурі оливи у об'ємі до 150°C.
ТМ-5	Мінеральні оливи з проти-задирними присадками високої ефективності і багатофункціональної дії, а також універсальні оливи	Гіпоїдні передачі, які працюють з ударними навантаженнями при контактному тиску більше 3000 МПа і температурі оливи у об'ємі до 150°C.

Таблиця 7.15 - Трібологічна характеристика трансмісійних олив

Показники	Експлуатаційна група				
	ТМ-1	ТМ-2	ТМ-3	ТМ-4	ТМ-5
Навантаженням зварювання, Н, не менше	2700		2760	3000	3280
Протизносна властивість за показником зношування (D_3) при осьовому навантаженні 392 Н, температурі $20 \pm 5^\circ\text{C}$ протягом однієї години, мм, не більше	0,5		–	–	0,4

Наприклад, позначення оливи ТМ-3-18 свідчить: трансмісійна олива 3-ї експлуатаційної групи (з протизадирними присадками помірної ефективності), класу в'язкості 18 при 100°С. У позначенні трансмісійної оливи ТМ-5-12 (рк) аббревіатура (рк) означає, що олива одночасно є робочо-консерваційною.

Асортимент трансмісійних олив. Сьогодні, коли багато нафтовиробників випускають продукцію з фірмовими назвами, визначення трансмісійних олив за ГОСТ треба розглядати з точки зору належності їх до певної класифікаційної групи.

Найбільше розповсюдження в Україні мають трансмісійні оливи, які випускаються згідно з ГОСТ 23652–79 (таблиця 7.16).

Таблиця 7.16 - Основні характеристики деяких трансмісійних олив

Показники	TE _п -15 (ТМ-2-18)	TC _п -10 (ТМ-3-9)	(TA) _п -15B (ТМ-3-18)	TC _п -15K (ТМ-3-18)	TC _п -14 _{тнн} (ТМ-5-9)	TAД-17И (ТМ-5-18)
Кінематична в'язкість при 100 °С, мм ² /с.	15±1	≥10	15±1	≥16,0	≥14,0	≥17,5
Індекс в'язкості ІВ, не менш		90		90	85	100
Температура спалаху у відкритому тіглі, °С, не менш	185	128	185	185	215	200
Температура застигання, °С, не більше	-18	-40	-20	-25	-25	-25
Масова частка механічних домішок, % не вище	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	відсутня
Зольність, %	≥0,3	–	–	–	–	≥0,3
Масова частка активних хімічних елементів. %:						
фосфору	≥0,06	–	–	–	–	≥0,1
хлору	–	–	–	–	≥0,5	–
сірки	≤3,0	≤1,6	1,2	–	–	2,7-3,0
Трібологічні характеристики (ГОСТ9490):						
індекс задиру, (I ₃) не менш	–	48	50	55	60	58
навантаження зварювання, (Р зв), Н, не менш	–	3479	3283	3479	3920	3687
показник зношування (Д ₃) при навантаженні 392 Н, (20±5°С, 1год), мм, не більш	0,55	–	–	0,50	–	0.40
Густина при 20°С, кг/м ³ , не вище	950	915	930	910	910	907

Зарубіжна класифікація трансмісійних олів. Провідна роль у розробці трансмісійних олів за рубежом належить США. Практично всі розвинуті країни та країни, що розвиваються, користуються олівами, які випускають американські фірми, або самі виробляють трансмісійні оліви, пристосовуючи їх до вимог специфікацій США.

Трансмісійні оліви, як і моторні, поділяють на різні сорти, залежно від їхньої в'язкості (класифікація SAE J306) та призначення (класифікація API). Згідно з класифікацією SAE оліви для трансмісій поділяють на зимові з індексом W (70W, 75W, 80W, 85W) та літні (90, 140 та 250). Крім того, класифікують всесезонні трансмісійні оліви (75W-90, 80W-90, 85W-140), у маркуванні яких після SAE спочатку вказують показник зимової оліви, а потім літньої (табл.7.17).

Таблиця 7.17 - Класи в'язкості SAE J306 автотракторних трансмісійних олів

Показник	Класи в'язкості						
	70W	75W	80W	85W	90	140	250
Кінетична в'язкість при 100°C, мм /с: мінімальна максимальна	4,1 –	4,1 –	7,0 –	11,0 –	13,5 <24	24 <41	41 –
Температура при якій динамічна в'язкість не перевищує 150 Па·с, °C, не менш	– 55	– 40	– 26	– 12	–	–	–

Орієнтовна відповідність в'язкісних класів трансмісійних олів SAE і ГОСТ (табл. 7.18.)

Таблиця 7.18 - Відповідність в'язкісних класів SAE і ГОСТ 17479.2–85

ГОСТ 17479.2–85	9	12	18	34
Класифікація SAE	75W	80W/85W	90	140

Відповідно до класифікації API трансмісійні оліви, за рівнем експлуатаційних властивостей, поділяють на шість груп у залежності від конструкції агрегатів, трансмісій та умов їхньої експлуатації (табл. 7.19).

Більшість автомобільних фірм Західної Європи для оцінки експлуатаційних властивостей трансмісійних олів використовують також армійські специфікації США MIL-L-2105D або MIL-L-2105C.

Таблиця 7.19 - Класифікація API для автотракторних трансмісійних олив

Група	Призначення і склад оливи	Рекомендована га-лузьвикористання
GL-1	Оливи, придатні до застосування в агрегатах з циліндричними, черв'ячними і спірально-конічними зубчастими передачами в умовах низьких швидкостей і навантажень. Мінеральні оливи без присадок або з антиокиснювальними, протизносними, антикорозійними і антипінними присадками без протизадирних компонентів	Механічні коробки передач з ручним перемиканням, головні передачі ведучих мостів зі спірально-конічними і черв'ячними шестернями
GL-2	Призначені для мащення черв'ячних передач, що працюють в умовах як і оливи групи GL-1, але до них висуваються більш високі вимоги до антифрикційних властивостей. На відміну від олив GL-1 вони можуть містити антифрикційні присадки	Головні передачі ведучих мостів вантажних автомобілів з черв'ячними зачепленнями
GL-3	Оливи, призначені для звичайних трансмісій зі спірально-конічними зубчастими передачами, що працюють у помірно складних умовах за швидкостями і навантаженнями. Вони мають більш високі протизносні і протизадирні властивості в порівнянні з оливами GL-2, але більш низької якості, ніж оливи GL-4	Головні передачі ведучих мостів автомобілів зі спірально-конічними зубчастими колісьми, деякі механічні коробки передач з ручним переключенням
GL-4	Для автомобільних трансмісій з гіпоїдною передачею, що працюють в умовах великої швидкості при малих крутних моментах, і малих швидкостях при високих крутних моментах. Такі умови вимагають обов'язкової наявності в оливах вискоефективних протизадирних присадок	Головні передачі ведучих мостів легкових автомобілів з гіпоїдними зубчастими колесами, деякі механічні коробки передач, установлені на вантажних автомобілях
GL-5	Оливи, призначені для автомобільних гіпоїдних передач, що працюють в умовах великих швидкостей і малих крутних моментах, а також при наявності ударних навантажень на зубах коліс при високих швидкостях ковзання. Умови роботи більш жорсткі, ніж в оливі GL-4, тому в них рекомендується вводити більшу кількість сіркофосфорвмісних присадки	Головні передачі ведучих мостів легкових і вантажних автомобілів з гіпоїдними зубчастими колесами; деякі механічні коробки передач
GL-6	Оливи для автомобільних гіпоїдних передач з підвищеним вертикальним зміщенням осей зубчастих коліс, що утворюють умови для досягнення високих крутних моментів при підвищених швидкостях і ударних навантаженнях. Рекомендовано вводити в оливу більшу кількість сіркофосфорутримуючої протизадірної присадки, ніж в оливі GL-5	Головні передачі ведучих мостів автомобілів з гіпоїдними зубчастими колесами, котрі характеризуються більшим зсувом осей (більше 50 мм або до 25% діаметру веденої шестерні)

7.4.3 Оливи для гідромеханічних передач

В сучасній автотракторній техніці все більше розповсюдження отримують гідромеханічні передачі (ГМП), що об'єднують в одному агрегаті гідропривід, механічну коробку передач, складну систему автоматичного регулювання. У ГМП, як і в механічних трансмісіях, умови роботи оливи характеризуються широким інтервалом робочих температур, високими навантаженнями й швидкостями ковзання у місцях контакту зубів шестерень. Динамічні навантаження на трансмісію у машин з ГМП в 1,5...3 рази менші, ніж у машин з механічними коробками передач (завдяки відсутності жорсткого зв'язку між двигуном і трансмісією), а температура оливи в літній період може досягати до 150 °С.

Швидкість надходження оливи в гідротрансформатори становить 80...100 м/с, а якщо знімається потужність більша, ніж це потрібно для подолання робочих зусиль, надлишкова потужність витрачається на внутрішнє тертя оливи, що ще більше підвищує її температуру. Це дає підставу вважати, що ГМП є найбільш теплонапруженим вузлом з усіх видів трансмісії.

Створення в гідротрансформаторі високошвидкісних потоків оливи призводить до інтенсивної аерації, посиленого піноутворення, що створює умови для підвищеного окиснення оливи.

Через конструктивну складність і наявність різноманітних за призначенням та умовами роботи вузлів до якості змащувальних матеріалів для ГМП ставлять складні та суперечливі вимоги, що значно відрізняються від вимог до звичайних трансмісійних оливи. Перш за все це стосується в'язкісних, протизносних, фрикційних, антиокиснювальних та інших властивостей.

При виборі оливи для ГМП в'язкість є однією з найважливіших експлуатаційних характеристик. Це обумовлено перш за все необхідністю одержання високого коефіцієнта корисної дії (ККД) гідротрансформатора у великому інтервалі можливих робочих температур. Для створення умов нормальної роботи ГМП з найбільшим ККД та коефіцієнтом трансформації, оливи повинні мати якомога меншу в'язкість. При використанні малов'язких оливи також поліпшується паливна економічність і робота автоматичної системи керування. З іншого боку, для забезпечення високої змащувальної властивості й для запобігання витокам оливи через ущільнення олива повинна бути відносно в'язкою.

Оливи для ГМП повинні мати також високий індекс в'язкості. Вимоги до низькотемпературних властивостей оливи обумовлені необхідністю забезпечення можливості запуску двигуна й зрушення з місця при низьких температурах навколишнього повітря.

Внаслідок того, що в гідромеханічній трансмісії є навантаженні вузли тертя (зубчасті передачі, підшипники кочення, муфти вільного ходу, плунжерні пари й інші тертьові деталі), необхідно використовувати оливи з ефективним протизносними присадками.

Однак для гідромеханічних передач, що мають фрикційні диски, розробка олив з добрими протизносними властивостями ускладнена.

Це викликано тим, що надійна робота фрикціонів може бути забезпечена лише оливою з необхідними фрикційними властивостями, які забезпечують контактування дисків з відносно високим коефіцієнтом тертя (від 0,1 до 0,2). Тому в деяких закордонних специфікаціях передбачається використання олив, що містять протизносними присадки або модифікатори тертя з вузькими межами значень коефіцієнта тертя. Висока температура оливи в ГМП, яка досягає 100... 120 °С й вище, при контакті з різноманітними каталітично активними металами та киснем повітря викликає інтенсивне його окиснення. Внаслідок накопичення в оливі продуктів окиснення порушується робота системи автоматики, фрикційних дисків, підвищується спрацювання деталей гідромеханічної передачі. Для запобігання окиснення й відкладання осадів на деталях ГМП в оливи поряд з антиокиснювальними присадками вводять додатково миюче-диспергуючі присадки.

Поряд з високою окиснювальною стабільністю оливи для ГМП повинні мати добрі антикорозійні й антипініні властивості, бути сумісними з різними ущільнювальними матеріалами.

Оливи для гідромеханічних передач виробляють з малов'язких фракцій сірчистих парафінистих нафт шляхом їх селективної очистки, глибокої депарафінації й загушують в'язкісними присадками.

Асортимент олив для ГМП включає три марки олив: **A** і **P** (ОСТ 38 01434–87) та **МГТ** (ТУ 38 101103-87) Їх одержують загушенням малов'язких фракцій сірчистих парафінових нафт селективного очищення після глибокої депарафінації.

Олива марки **A** має в'язкість при температурі 40°С (v_{40}) 17...22 мм²/с, а при –20°С (v_{-20}) ≤ 100 мм²/с. Її використовують для всесезонної експлуатації в гідротрансформаторах та в автоматичних коробках передач автомобілів при температурі не нижче 30...–35°С.

Олива марки **P** (v_{40} =17...22 мм²/с, v_{-20} ≤ 1300 мм²/с) призначена для системи гідропідсилювача керма і гідрооб'ємних передач;

Оливу **МГТ** (v_{40} = 6...7 мм²/с, v_{-50}) використовують в гідромеханічних коробках передач і гідросистемах націпного обладнання при температурі +50... – 50 °С.

Зарубіжні оливи позначаються класифікаціями Type A, Suffis I Dexron/

7.4.4 Гідралічні оливи

Широке застосування у автотракторному та сільськогосподарському машинобудуванні гідроприводів на сьогодні визначилось як один з основних напрямів підвищення технічного рівня машин.

Сучасні трактори та сільськогосподарські машини оснащуються роздільно-агрегатними гідронаціпними системами, об'ємними гідроприводами трансмісії та рульового керування, гідроприводами активних робочих органів тощо. З роз-

ширенням і ускладненням функцій, які виконують гідроприводи, особливо актуальною є проблема використання гідравлічних олиव, що забезпечують заданий рівень працездатності в умовах експлуатації машинно-тракторного парку.

Гідравлічна олива у гідроприводі виконує функції робочого тіла, тому її називають робочою рідиною. Основною функцією гідравлічної оливи є передача механічної енергії від її джерела до виконавчих органів із забезпеченням зміни величини або напрямку прикладеної сили. Одночасно вона є змащувальним та охолоджуючим середовищем для тертьових поверхонь гідроприводу.

З підвищенням потужності і компактності сучасних гідравлічних систем умови роботи оливи стали більш жорсткими. Тиск робочої рідини у гідроприводах тракторів і сільськогосподарських машин досягає 40 МПа. Робоча температура у гідросистемах, як правило, на 40...50 °С вище за температуру навколишнього середовища і може перевищувати 100°С. Робочі рідини контактують з різними матеріалами, а також дроселюються з великим перепадом тиску через малі робочі зазори, зазнають дії високих питомих тисків на поверхнях трібосистем.

Специфічні умови роботи сільськогосподарської техніки (запиленість, велика вологість, широкий діапазон температур навколишнього середовища, високий рівень вібрації тощо) ставлять жорсткі вимоги до якості робочих рідин. Перш за все вони повинні мати оптимальний рівень та високий індекс в'язкості, низьку температуру застигання.

Вибір в'язкості робочої рідини залежить від пускових та робочих характеристик гідравлічної системи. В'язкість оливи не повинна бути нижче певного рівня, щоб звести до мінімуму втрати від витоків з різних з'єднань і ущільнень гідравлічної системи та забезпечити необхідну змащувальну здатність оливи. Підвищена в'язкість робочої рідини призводить до збільшення її опору рухові у напірних магістралях, особливо при низьких температурах. Для гідроприводів, які працюють у широкому діапазоні температур, в'язкість робочої рідини при максимально можливій температурі не повинна бути нижче 8 мм²/с, а при найнижчій – вище 1500 мм²/с. Оптимальною в усталених умовах роботи гідросистеми вважається в'язкість 30–40 мм²/с. В'язкість, як визначальний показник експлуатаційних властивостей, вказують у маркуваннях гідравлічних оливи.

Крім підвищених вимог до в'язкісних властивостей, гідравлічні оливи повинні характеризуватися такими показниками:

- мати добру змащувальну здатність і необхідні протизносними та протизадирні властивості;
- мати високі антиокиснювальні властивості, термічну та хімічну стабільність, що забезпечує тривалу роботу робочої рідини у гідравлічній системі;
- захищати чорні та кольорові метали від корозії в процесі експлуатації і під час тривалих перерв у роботі;
- бути стійкими до утворення емульсії з водою і до піноутворення;
- не мати шкідливого впливу на гуму, еластомери й інші ущільнювальні матеріали.

Як основу для гідравлічних олиव використовують добре очищені мінеральні оливи з відповідними в'язкісно-температурними характеристиками та задовільними низькотемпературними властивостями. Присадки, які поліпшують індекс в'язкості (вініполи, поліметакрилати та поліізобутилені) і додаються до гідравлічних олив, повинні мати високу стійкість до деструкції для збереження механічної стабільності олив протягом тривалого часу. Більшість олив для гідравлічних систем містять присадки, які поліпшують антиокиснювальні властивості, стійкість до корозії та спрацювання. Оливи містять також протипінні та деемульгуючі присадки. Для поліпшення низькотемпературних властивостей у гідравлічні оливи можуть бути введені депресорні присадки.

Вітчизняна класифікація гідравлічних олив. Гідравлічні оливи для мобільної техніки класифікують за в'язкістю та рівнем експлуатаційних властивостей. Вітчизняна класифікація олив за в'язкістю (ГОСТ 17479.3–85) відповідає в'язкісній градації робочих рідин, прийнятій міжнародною організацією зі стандартизації (ISO 3448–75). Згідно з ISO оливи поділяють на 18 класів. Кожному класу відповідає символ в'язкісної класифікації (VG) та число, яке характеризує кінематичну в'язкість оливи при температурі 40°C з допуском $\pm 10\%$. Для вітчизняних олив передбачено 10 класів в'язкості (табл. 7.20).

Таблиця 7.20 - Класифікація гідравлічних олив за кінематичною в'язкістю

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при 40°C, мм ² /с	Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при 40°C, мм ² /с
5	4,14–5,06	32	28,8–35,2
7	6,12 – 7,48	46	41,4–50,6
10	9,0–11,0	68	61,2–74,8
15	13,5–16,5	100	90–110
22	19,8–24,2	150	135–165

Залежно від експлуатаційних властивостей гідравлічні оливи поділяють на групи А, Б і В (табл. 7.21)

Згідно з ГОСТ 17479.3–85 передбачена система позначень гідравлічних олив, яка складається із знаків: перший з яких літерами МГ позначається — мінеральна гідравлічна, далі вказують клас в'язкості та належність до групи за експлуатаційними властивостями.

Наприклад, МГ-15-В – олива мінеральна гідравлічна (МГ), цифра 15, вказує на те, що ця олива має кінематичну в'язкість 13,5–16,5 мм²/с при температурі 40°C, за експлуатаційними властивостями відповідає групі В.

Таблиця 7.21 - Класифікація гідравлічних олиव за експлуатаційними властивостями

Група оливи	Склад оливи	Рекомендована галузь застосування
А	Нафтові оливи без присадок	Гідравлічні системи з шестеренними та поршньовими насосами, що працюють при тиску до 15 МПа та температурі оливи у об'ємі до 80 °С
Б	Нафтові оливи з антиокислювальними та антикорозійними присадками	Гідравлічні системи з насосами усіх типів, що працюють при тиску до 25 МПа та температурі оливи у об'ємі більше 80 °С
В	Добре очищені нафтові оливи з антиокислювальними та протизносними присадками	Гідравлічні системи з насосами усіх типів, що працюють при тиску вище 25 МПа та температурі оливи у об'ємі більше 90 °С

Позначення гідравлічних олив за ГОСТ 17479.3–85 та їхня відповідність раніше прийнятим показникам якості у нормативно-технічній документації (НТД) наведені в табл. 7.22.

Таблиця 7.22 - Позначення гідравлічних олив

ГОСТ 17479. 3–85	НТД
МГ-22-А	АУ (ТУ 38 1011232–89)
МГ-32-А	ЕШ (ГОСТ 10363–78)
МГ-10-Б	РМЦ (ГОСТ 15819–70)
МГ-15-Б	АМГ-10 (ГОСТ 6794–75)
МГ-22-Б	АУП (ОСТ 38 01364–84)
МГ-46-Б	МГ-30 (ТУ 38 10150–79)
МГ-15-В	ВМГЗ (ТУ 38 101479–74)
МГ-15-В	МГЕ-10А (ОСТ 38 01281–82)
МГ-22-В	Р (ТУ 38101179–71)
МГ-46-В	МГЕ-46В (МГ-30у) (ТУ 38 001347–83)
МГ-68-В	МГ-8А (М-8А) (ТУ 38 1011135–87)

Міжнародною класифікацією ISO 6074/4–1982 (Е) нафтові гідравлічні оливи поділяють на чотири якісні групи. Відповідність експлуатаційних груп вітчизняних гідравлічних олив класифікаційним групам ISO наведено нижче:

ГОСТ 17479.3–85	А	Б	В	В із загущеною присадкою
ISO 6074/4–1982 (Е)	HH	HL	HM	HV

Маркування олиव згідно з класифікацією ISO складається з символів якісної та в'язкісної класифікації, наприклад, HL VG-46 означає: гідравлічна (H) олива якісної групи, яка включає мінеральні оливи з антиокислювальними та антикорозійними присадками (L) з кінематичною в'язкістю при 40°C у інтервалі 41,4–50,6 мм²/с. (VG – 46).

Асортимент гідравлічних олив. Незважаючи на великий асортимент олив для різних гідравлічних систем, які випускаються нафтопереробною промисловістю, у сільському господарстві застосовується небагато з них.

Основні фізико-хімічні та експлуатаційні показники гідравлічних олив, що використовуються як робоча рідина в гідроприводах автотракторної та сільськогосподарської техніці, наведені в таблиці 7.23.

Таблиця 7.23- Характеристика гідравлічних олив

Марка оливи	Кінематична в'язкість, мм ² /с		Індекс в'язкості	Температура, °C		Галузь застосування
	при 50°C	при – 40°C (–50°C)		застигання, не вище	спалаху, не менш	
1	2	3	4	5	6	7
МГЕ–10А	≥ 10	(1500)	–	– 70	96	Гідравлічні системи автомобільної техніки, що працюють при температурі оливи від –50°C до +70°C
ВМГЗ	≥ 10	1600	130	– 60	135	Гідроприводи автотракторної техніки, що працюють при температурі оливи від –50°C до +50°C
АУ	12–14	1300	–	– 45	165	Гідравлічні системи різноманітних машин механізмів. Працездатна при температурі і оливи від – 30°C до +90°C
ЭШ	≥ 20	–	135	– 50	160	Гідрсистеми крокуючих екскаваторів та інших аналогічних машин. Працездатна у інтервалі температур від –45°C до +80÷100°C

Продовження таблиці 7.23

1	2	3	4	5	6	7
Г-30	27-33	4000 (при - 15°C)	85	- 30	190	Гідравлічні системи будівельних, підйомно-транспортних та інших машин з об'ємним гідроприводом і гідрокеруванням. Працездатна у інтервалі температур від - 20°C до +75°C
МГЕ-46В	≤6 (при 100° С)	100 (при - 15°C)	90	- 30	190	Гідрооб'ємні передачі сільськогосподарської техніки, які працюють при тиску до 35 МПа (короткочасно до 42 МПа). Працездатна при температурі оливи від -10°C до +80°C

7.4.5 Індустріальні оливи

Індустріальні оливи являють собою великий асортимент мастильних матеріалів, призначених для зменшення тертя, зношування та запобігання задиркам тертьових поверхонь різних машин та механізмів промислового обладнання: метало-та деревообробних верстатів, пресів, контрольно-вимірювальних приладів, насосів гідросистем тощо. Одночасно вони повинні відводити теплоту з трібосистеми, захищати деталі від корозії, очищувати тертьові поверхні від забруднення, служити ущільнюючим засобом, запобігати утворенню стійких емульсій з водою або мати здатність емульгувати, добре фільтруватися, бути нетоксичними, не мати неприємного запаху та ін.

В умовах застосування мастильних індустріальні оливи піддаються впливу високих температур і тисків, контактують з різними металами, повітрям, водою та агресивними середовищами. У результаті чого вони окислюються, що призводить до підвищення їхньої в'язкості, кислотного числа та корозійної агресивності, забруднення продуктами зношення. Внаслідок цього посилюється абразивне зношування у трібосистемах і погіршується фільтрування оливи. В оливах з'являються продукти деструкції, які викликають зниження в'язкості та температури спалаху, накопичується вода та ін. Індустріальні оливи, які застосовуються у трібосистемах, можна розглядати як свого роду конструкційний матеріал, властивості якого у ряді випадків впливають на працездатність поверхні тертя не менше, ніж властивості матеріалу, з якого виготовлені деталі, що змащуються.

Експлуатаційні властивості індустріальних олив істотно впливають на втрати потужності на тертя, зношення тертьових деталей, плавність руху при малих швидкостях ковзання, стабільність окиснення та корозії, емульгованість, піноутворення і деаерацію. Найважливішими з них є: мастильні властивості, здатність стабілізувати коефіцієнт тертя, забезпечуючи при цьому плавне стійке ковзання і демпфірування, антиокислювальну стабільність, захисні, деемульгуючі, протипінні, деаераційні, екологічні властивості. Умова тертя є визначальною при виборі оливи. Мастильні вузли та деталі, залежно обладнання, яке застосовується, значно відрізняються умовами роботи, температурними, навантажувальними та іншими характеристиками.

З метою уніфікації, поліпшення якості і розширення виробництва індустріальних олив для промислового обладнання передбачена єдина система класифікації та їхні позначення (ГОСТ 17479.4–87). Система класифікації враховує міжнародні класифікації індустріальних олив за в'язкістю (ISO 3448–75) та областями застосування.

Згідно з ГОСТ 17479.4–87, залежно від призначення, індустріальні оливи поділяють на чотири групи: Л, Г, Н і Т, у кожену з яких входить значна кількість олив з різними композиціями присадок (табл. 7.24)

Таблиця 7.24 - Класифікація індустріальних олив за призначенням

Група	Призначення олив	Присадки
Л	Для легконавантажених вузлів (шпинделі, підшипники та спряжені з ними з'єднання)	Антиокислювальні, антикорозійні, антифрикційні, протипінні
Г	Для гідравлічних систем	Антиокислювальні, антикорозійні, протизносні, протипінні, деаераційні, в'язкісні, депресорні, миюче-диспергуючі
Н	Для напрямних ковзання	Антиокислювальні, антикорозійні, протизносні, протизадирні, протистрибкові, миюче-диспергуючі
Т	Для важконавантажених вузлів (зубчастих та інших передач, підшипників і спряжених з ними з'єднань)	Антифрикційні, протизносність , протизадирні, антикорозійні, в'язкісні, депресорні

Крім того, стандартом передбачено розподіл індустріальних олив на п'ять підгруп: А, В, С, Д і Е залежно від складу оливи та рекомендованої гаулузі застосування (табл. 7.25).

В залежності від значення кінематичної в'язкості при температурі 40°C індустріальні оливи поділяють на 18 класів (табл. 7.26).

Відповідно до класифікації для позначень індустріальних олив виділяють чотири групи знаків розділених між собою дефісом.

Таблиця 7.25 - Класифікація індустріальних олиव за рівнем експлуатаційних властивостей

Підгрупа	Склад оливи	Рекомендована галузь застосування
А	Нафтові оливи без присадок	Шпindelі, підшипники, гідросистеми, напрямні ковзання, зубчасті передачі промислового обладнання, умови роботи яких не передбачають особливих вимог до антиокиснювальних та антикорозійних властивостей олив
В	Нафтові оливи з антиокиснювальними та антикорозійними присадками	Ті ж агрегати та вузли, умови роботи яких передбачають підвищені вимоги до антиокиснювальних та антикорозійних властивостей олив
С	Нафтові оливи з антиокиснювальними, антикорозійними та протизносними присадками	Ті ж агрегати та вузли з переважним тертям ковзання, а також трібосистеми, де використовуються антифрикційні сплави кольорових металів, умови роботи яких передбачають підвищені вимоги до антиокиснювальних, антикорозійних та протизносних властивостей олив
Д	Нафтові оливи з антиокиснювальними, антикорозійними, протизносними та протизадирними присадками	Елементи промислового обладнання з переважним тертям кочення і ковзання та термонавантажені трібосистеми з тертям кочення і ковзання, умови роботи яких передбачають підвищені вимоги до антиокиснювальних, антикорозійних, протизносних та протизадирних властивостей олив
Е	Нафтові оливи з протистрибковими присадками	Напрямні ковзання високоточних автоматизованих верстатів, умови роботи яких передбачають підвищені вимоги до антиокиснювальних, адгезійних, протизносних, протизадирних та протистрибкових властивостей

Таблиця 7.26 - Класи в'язкості індустріальних олив

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при 40°C, мм ² /с	Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при 40°C, мм ² /с
2	1,9–2,5	68	61–75
3	3–3,5	100	90–110
5	4–5	150	135–165
7	6–8	220	198–242
10	9–11	320	288–352
15	13–17	460	414–506
22	19–25	680	612–748
32	29–35	1000	900–1100
46	41–51	1500	1350–1650

Знак першої групи – літера И вказує на приналежність оливо до індустріальних; знаки другої групи (Л, Г, Н, Т) характеризують їхнє призначення (табл. 7.24).; знаки третьої групи (А, В, С, Д і Е) – призначення за експлуатаційними властивостями (див. табл. 7.25), знаки четвертої групи – цифри, які означають клас в'язкості (табл. 7.26).

Наприклад, з позначення оливи И-Л-А-10 слідує, що вона індустріальна (И), призначена для легконавантажених вузлів (Л), без присадок (А), належить до 10 класу в'язкості.

Асортимент індустріальних оливо включає понад 90 найменувань. Найбільш широке застосування у сільськогосподарському виробництві мають мало- та середньов'язкі оливи групи Л і Г (табл. 7.27)) без присадок.

Таблиця 7.27 - Характеристика окремих індустріальних оливо

Марка оливи	Кінематична в'язкість, мм ² /с		Температура, °С		Густина, кг/м ³
	при 40°С	при 50°С	спалаху, не нижче	застигання, не вище	
И-Л-А-7 (И-5А)	6–8	4–5	140	– 18	870
И-Л-А-10 (И-8А)	9–11	6–8	150	– 15	880
И-Л-А-15 (И-12А)	19–25	10–14	170	– 30	880
И-Г-А-32 (И-20А)	19–35	17–23	200	– 15	890
И-Г-А-46 (И-30А)	41–51	28–33	210	– 15	890
И-Г-А-68 (И-40А)	61–75	37–45	220	– 15	900
И-Г-А-100 (И-50А)	90–110	47–55	225	– 15	910

Оливи И-Л-А-7 і И-Л-А-10 застосовують для мащення найбільш розповсюджених високошвидкісних вузлів та механізмів, замаслювання волокон і у виробництві оливо різного призначення. Їх використовують також у гідравлічних системах різних будівельних машин.

Олива И-Л-А-15 застосовується для змащування шпинделів металорізальних верстатів, які працюють з частотою обертання до 5000 хв⁻¹, підшипників малопотужних електродвигунів з кільцевою системою мащення. Цю оливу застосовують також у гідросистемах верстатів та механізмах деяких сільськогосподарських машин. Використовується ця олива як базова для виготовлення оливо з присадками та пластичних мастил.

Оливи И-Г-А-32, И-Г-А-46, И-Г-А-68, И-Г-А-100 застосовують як робочі рідини у гідравлічних системах верстатного обладнання, для мащення легко- та середньонавантажених зубчастих передач, пресів, напрямних кочення та ковзання верстатів та інших механізмів, де не потрібні спеціальні оливи.

У зв'язку із застосуванням у гідравлічних системах сучасного промислового обладнання фільтрів тонкого очищення вказані оливи замінюють леґо-

ваними мастильними матеріалами, які відповідають їм за в'язкістю.

Оливи И-Г-С-32 (ИГП-18), И-Г-С-46 (ИГП-30), И-Г-С-68 (ИГП-38, ИГП-49) призначені для гідравлічних систем верстатів, автоматичних ліній, пресів. Використовують їх також для змащування високошвидкісних коробок передач, мало- та середньонавантажених редукторів і черв'ячних передач, варіаторів, електромагнітних і зубчастих муфт та інших вузлів та механізмів із збільшеним у 2–4 рази терміном заміни оливи. При необхідності можуть використовуватися у гідравлічних системах сільськогосподарської техніки.

Особливу групу індустріальних оливи представляють мастильні матеріали для напрямних ковзання високоточних металорізальних верстатів, умови роботи яких відрізняються високими навантаженнями і можливістю дуже низьких швидкостей руху. Тому мастильні матеріали для напрямних металорізальних верстатів містять так звані антифрікційні присадки, які знижують тертя при відносно низьких швидкостях руху.

Оливи И-Н-Е-68 (ИНСп-40), И-Н-Е-100 (ИНСп-65), И-Н-Е-220 (ИНСп-110). застосовують для змащування напрямних ковзання (швидкість переміщення 0,016–3,3 мм/с) та кочення металорізальних верстатів, ходових передач гвинт-гайка, верстатів високої точності та інших, де потрібна рівномірність повільних переміщень без ривків, а також для змащування пневматичного бурильного інструменту

Оливи И-Т-Д-68 (ИРп-40), И-Т-Д-100 (ИРп-75) та И-Т-Д-220 (ИРп-150) використовують для зубчастих та черв'ячних передач, коробок передач, редукторів, мотор-редукторів, зубчастих муфт, які працюють при середніх та високих навантаженнях, у тому числі ударних, всіляких середньонавантажених елементів верстатного обладнання і автоматичних ліній. Крім того, ці оливи можна використовувати для змащування напрямних ковзання верстатів, за винятком верстатів високої точності, а також у циркуляційних системах мащення різноманітних механізмів, що працюють при підвищених навантаженнях.

Більшість індустріальних оливи з присадками відповідає вищій категорії якості, а за експлуатаційними властивостями – рівню кращих закордонних зразків.

Нафтопереробна промисловість має необхідний асортимент оливи з присадками для промислового обладнання. Збільшення обсягу виробництва таких оливи має першорядне значення. Технічний прогрес у виробництві оливи для промислового обладнання взаємозв'язаний з прогресом у машинобудуванні, металургії та інших сферах використання. Це є запорукою раціонального використання оливи з присадками.

7.5 Пластичні мастила

Загальні відомості. Пластичні мастила належать до особливої групи мастильних матеріалів. Вони являють собою складні колоїдні системи та містять: дисперсійне середовище – рідку змащувальну оливу; дисперсну фазу

– твердий загусник; модифікатори структури і домішки – присадки та наповнювачі. Загусник, який вводиться в оливу, утворює у її об'ємі структурний каркас. В середині каркасу рідина утримується силами взаємодії між молекулами дисперсної фази та дисперсійного середовища.

Наявність рідкого і твердого компонентів у мастилах визначає їхню основну особливість, яка полягає у тому, що мастила, залежно від умов роботи, мають механічні властивості, а також властивості притаманні як рідкому, так і твердому тілу. За певних температур, у відсутності або під впливом малих навантажень, мастила деформуються як пружне тверде тіло, а при критичних навантаженнях, що перевищують механічну міцність каркасу, вони набувають плинності. Для пластичних мастил також характерна властивість відновлення зруйнованої структури після зняття навантаження (тиксотропні властивості).

Таким чином, загальною ознакою всіх пластичних мастил, крім залежності від складу і умов виготовлення, є наявність межі міцності, аномальної плинності та здатності до тиксотропного відновлення зруйнованої структури.

Властивості пластичних мастил залежать від властивостей компонентів, які входять до їхнього складу – оливи, загусника та інших речовин, передбачених рецептурою. У пластичних мастилах 70–95% маси, звичайно, припадає на частку дисперсійного середовища. Для виготовлення мастил використовують переважно нафтові мастильні оливи. Синтетичні і деякі рослинні оливи використовуються значно рідше і лише для виробництва спеціальних мастил.

Вид базової оливи залежить багато важливих властивостей пластичних мастил: структурна стабільність, в'язкісно-температурна характеристика, загущуюча властивість та інші. Одним із важливих показників, за яким добирають змащувальну оливу для виготовлення мастил, є в'язкість. Застосування оливо з підвищеною в'язкістю знижує втрати мастила на випаровуваність, поліпшує адгезійні та антикорозійні властивості, водостійкість. Разом з тим, збільшення в'язкості погіршує низькотемпературні властивості. Для одержання низькотемпературних мастил використовують загущені оливи з високим індексом в'язкості. Для виготовлення мастил, які працюють при температурах 200°C і більше, використовують синтетичні рідини (полісілоксани, складні ефіри тощо). Від антиокислювальних властивостей оливної основи залежать працездатність при підвищених температурах та термін служби мастила. Хімічний склад впливає на формування структури мастила та сумісність його з еластомірними ущільнюючими матеріалами.

Найважливішим компонентом пластичних мастил є загусник. Загусник, як правило, складає 5–30% маси, але його тип і концентрація у значній мірі визначають основні показники якості мастила: міцність, водостійкість, теплостійкість тощо. Відповідно до типу загусника мастила поділяють на: мильні, вуглеводневі, на органічних та неорганічних загусниках. Як загусники найбільше розповсюдження при виробництві мастил одержали мила. На частку пластичних мастил загущених милами припадає більша частина всіх мас-

тил, які випускаються в Україні та за рубежом.

Мильні загусники являють собою солі жирних кислот, одержані в результаті їхньої нейтралізації лугами. За типом катіона молекули мила мастила поділяють на кальцієві, натрієві, літієві, барієві та ін. Залежно від складу жирів, які застосовують для виготовлення мильних загусників, розрізняють мастила на синтетичних, технічних жирних кислотах і природних жирах. Від типу катіона мила залежить загущуюча властивість, водостійкість і температура плавлення мастила. У зв'язку з різноманітністю умов застосування пластичних мастил для загущення однієї і тієї ж оливи використовують різні загущуючі речовини. З метою поліпшення експлуатаційних властивостей і розширення сфери застосування мастил для їхнього виготовлення використовують різноманітні мильні загусники у поєднанні один з одним або з загусниками іншої природи.

Крім мильних загусників, під час виробництва пластичних мастил застосовують також тверді вуглеводні загущуючі речовини (парафін, церезин, петролатум, озокерит і воски). Оскільки ці загусники мають слабку загущуючу властивість, їх вводять у оливу в значній кількості (20–30%). Загущені вуглеводними пластичні мастила мають хороші тиксотропні властивості, не розшаровуються, хімічно стабільні і вологостійкі, що дозволяє використовувати такі мастила як найбільш ефективний консерваційний матеріал.

Як загущуючі речовини використовують також деякі органічні сполуки (різноманітні пігменти) з високою температурою плавлення. Мастила на органічних загусниках мають підвищену хімічну та термічну стабільність.

До групи неорганічних загусників належать силікагель, бентонітові глини, порошки металів та їхніх оксидів, технічний вуглець. Найбільше розповсюдження одержали пластичні мастила з силікагелевими загусниками. Мастила на неорганічних загусниках характеризуються високою хімічною стабільністю, хорошими змащувальними та високотемпературними властивостями. За захисною властивістю вони значно поступаються мильним мастилам.

Для поліпшення різноманітних функціональних властивостей пластичних мастил у них вводять стабілізатори й модифікатори колоїдної структури, присадки та наповнювачі.

Як правило, у пластичних мастилах застосовують ті ж присадки, що й у змащувальних оливах: протизносні антиокиснювальні, інгібітори корозії та ін. З метою поліпшення протизносних та протизадирних властивостей пластичних мастил як наповнювачі використовують графіт, дисульфід молібдену, дисульфід вольфраму тощо. На відміну від присадок, наповнювачі нерозчинні у дисперсійному середовищі. Домішки, що вводять до складу мастил, не тільки поліпшують окремі показники їхньої якості, але й часто надають їм таких властивостей, які не можуть бути забезпечені іншими способами (герметизуюча дія, струмопровідні та інші властивості).

Основні функції, які виконуються пластичними мастилами, ті ж, що й під час використання рідких мастильних матеріалів, а саме: зниження спра-

цювання та енергетичних втрат на тертя, запобігання заїданню тертьових деталей, захист металевих поверхонь від корозії, ущільнення зазорів між спряженими деталями. Крім того, залежно від призначення і умов використання мастила можуть виконувати роль електроізоляційних або струмопровідних матеріалів, підвищувати коефіцієнт тертя, забезпечувати роботу твібосистем вузлів тертя в умовах вакууму тощо.

Пластичні мастила відзначаються високою працездатністю при малих швидкостях ковзання і високих тисках, під час дії ударних і знакозмінних навантажень, при змінному режимі швидкостей. Наявність межі плинності дозволяє мастилам необмежено довго утримуватися на похилих і вертикальних площинах, у негерметизованих трібосистемах та в спряженнях з великими зазорами. Вони не витікають під впливом сили ваги і інерції. Ця властивість мастил сприяє також захисту змащованого вузла від потрапляння в нього пилу, води та інших речовин. У порівнянні з рідкими оливами пластичні мастила мають більш високий ресурс працездатності, значно менше витрачаються, забезпечують невеликі витрати на обслуговування трібосистем. До недоліків мастил відносять низьку охолоджуючу здатність, більш складну подачу до трібосистем і складність під час використання в централізованих системах.

Завдяки різноманітності властивостей пластичні мастила застосовують у різних умовах експлуатації машин і механізмів, які не можуть бути вирішені використанням рідких олів з технічних та економічних причин. Основними об'єктами застосування мастил є важкодоступні, відкриті і негерметизовані трібосистеми. Використання пластичних мастил у добре герметизованих вузлах дозволяє забезпечувати тривалу роботу агрегатів без зміни і поповнення мастила до капітального ремонту, а в деяких випадках – на весь період існування трібосистем.

Можливості використання пластичних мастил у тих чи інших умовах залежать від основних їхніх властивостей. Як і всі мастильні матеріали, пластичні мастила оцінюються змащувальними, захисними та протикорозійними властивостями, а також властивостями, характерними лише для цього виду мастильних матеріалів: об'ємно-механічними (межа міцності на зсув і в'язкість), здатністю тиксотропних перетворень (механічна стабільність), температурою краплепадіння, пенетрацією, колоїдною, термічною, хімічною стабільністю й іншими показниками.

Межа міцності на зсув. Межею міцності пластичного мастила називають мінімальне напруження, при якому починається руйнування структурного каркасу мастила внаслідок зсуву одного його шару відносно іншого. Цей показник характеризує межу переходу мастила від стану спокою до пластичної течії. Межа міцності мастила залежить від швидкості навантажування і температури. За величиною межі міцності оцінюють здатність мастила надходити до робочих вузлів, утримуватися на рухомих деталях, не стікати по похилих і вертикальних поверхнях.

Стандартні методи випробувань передбачають визначення межі міцності

мастила на зсув у капілярних та ротаційних пластометрах. Найпоширенішим методом є оцінка міцності мастил на пластометрі К-2 за ГОСТ 7143–73. Цей метод оснований на визначенні тиску, при якому при заданій температурі відбувається зсув мастил у капілярах пластометра. Для більшості пластичних мастил межа міцності при температурі 20°C становить 100–1000 Па.

В'язкість. За аналогією з рідкими змащувальними оливами, для яких відношення напруження зсуву (τ) до градієнта швидкості зсуву (D) характеризується динамічною в'язкістю, вказана залежність при усталеній течії пластичних мастил названа їх ефективною в'язкістю:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (7.15)$$

Однак між ефективною в'язкістю мастил і динамічною в'язкістю рідин є суттєва різниця. На відміну від рідких мастильних матеріалів в'язкість пластичних мастил не є постійною величиною при даній температурі, а суттєво залежить від швидкості зсування шарів. В'язкість пластичних мастил різко знижується при підвищенні температури і градієнта швидкості зсуву, асимптотично наближаючись до в'язкості базової оливи. Тому ефективну в'язкість мастил оцінюють при заданому градієнті швидкості та постійній певній температурі. В'язкісні властивості пластичних мастил характеризують криві залежності в'язкості від градієнта швидкості зсуву, які одержані в робочому інтервалі швидкостей деформації та температур. Аналітично в'язкісно-швидкісну характеристику мастила визначають як відношення величин в'язкості при мінімальній та максимальній швидкостях деформації і постійній температурі. Про вплив температури на в'язкість пластичних мастил судять за в'язкісно-температурною характеристикою, яка являє собою відношення в'язкості при мінімальній та максимальній температурах і постійному градієнті зсуву.

Механічна стабільність. У процесі експлуатації пластичні мастила зазнають механічного впливу, що призводить до руйнування їхніх структурних елементів. Як правило, це викликає зменшення межі міцності і в'язкості мастила. Після припинення деформації (відпочинку мастила) об'ємно-механічні властивості відновлюються до певного рівня. Рівень зміни цих властивостей при механічному руйнуванні та в процесі наступного відпочинку характеризує механічну стабільність пластичних мастил, яку оцінюють на спеціальних приладах—тиксометрах за ГОСТ 19295–73. Суть оцінки полягає у визначенні зміни межі міцності на розрив після інтенсивного руйнування мастила у зазорі між ротором та статором тиксометра і при наступному тиксотропному її відновленні.

Критеріями механічної стабільності є індекси руйнування мастила K_p та тиксотропного відновлення K_v :

$$K = \frac{\sigma_n - \sigma_3}{\sigma_n} \quad (7.16)$$

$$K = \frac{\sigma_B - \sigma_3}{\sigma_n} \quad (7.17)$$

де, σ_n , σ_3 , σ_B — межа міцності на розрив відповідно початково-го, зруйнованого та відновленого мастила.

Температура краплепадіння. Мінімальна температура, за якої відбувається падіння першої краплі розплавленого мастила під час його нагрівання із заданою швидкістю в спеціальному приладі, називається температурою краплепадіння. Цей стандартний показник (визначається за ГОСТ 6793–74) є одним з критеріїв переходу пластичних масил у плинний стан при підвищенні температури. Залежно від температури краплепадіння мастила поділяють на низько-, середньо- та тугоплавкі. Для деяких масил температура краплепадіння є оціночним показником верхньої температурної межі працездатності.

Пенетрація. Цей показник служить для оцінки консистенції (густоти) пластичних масил. Його найчастіше використовують під час виробництва масил для контролю додержання рецептури і технології. Згідно з ГОСТ 5346–78 вимірювання пенетрації полягає у визначенні глибини (у десятих частках мм) занурювання у досліджуване мастило стандартного конусу за 5 секунд при температурі 25°C під дією маси 150 г.

Колоїдна стабільність. Під час експлуатації та зберігання під впливом температури, тиску або інерційних сил можливе виділення дисперсійного середовища з мастила. Внаслідок цього погіршуються експлуатаційні властивості масил. Тому пластичні мастила повинні характеризуватися якомога більшою колоїдною стабільністю. Колоїдна стабільність характеризує здатність масил утримувати рідку фазу – оливу і не розшаровуватися. Вона залежить від стану та властивостей загусника і дисперсійного середовища, їхнього співвідношення та наявності поверхнево-активних речовин тощо. Колоїдна стабільність визначається на приладі КСА при заданих навантаженнях, часі і температурі за ГОСТ 7142–74. Метод визначення оснований на вимірюванні об'єму оливи, відпресованої з мастила. Цей показник виражається у відсотках.

Термічна стабільність. Деякі види пластичних масил при використанні в умовах навіть короточасних підвищених температур можуть змінювати об'ємно-механічні та фізико-хімічні властивості. Здатність мастила зберігати свої властивості і перш за все не зміцнюватися під короточасним впливом високих температур називається термічною стабільністю. Внаслідок термозміцнення утруднюється надходження мастила до тертьових поверхонь, погіршуються його адгезійні властивості, а отже, і змащувальна властивість. Як правило, термічну стабільність масил оцінюють за зміною їхніх властивостей після нагрівання без механічного впливу. За ГОСТ 7143–73 схильність мастила до термозміцнення визначають на приладі СК шляхом вимірювання зміни меж міцності внаслідок годинної витримки мастила при 120°C.

Хімічна стабільність. Характеризується здатністю пластичних мастил зберігати властивості під впливом різноманітних хімічно активних речовин (кисню, кислот, лугів тощо). Звичайно, під цією характеристикою мають на увазі здатність мастил протистояти окисленню. Під час окислення мастил відбуваються зміни об'ємно-механічних властивостей, знижується колоїдна стабільність, накопичуються корозійно-агресивні речовини. Тому в умовах підвищених температур (вище 100°C) і в хімічно агресивних середовищах необхідні мастила з підвищеною стійкістю до окислення. Ця властивість особливо важлива для мастил, що є незамінними і працюють тривалий час. Хімічна стабільність пластичних мастил залежить від стійкості до окислення базової оливи, загусника, наявності присадок та інших факторів. Менше інших на окислювальні процеси впливають вуглеводневі загусники (парафін, церезин). Тому загущені цими продуктами мастила мають високу хімічну стабільність. Визначення хімічної стабільності виконують за ГОСТ 5734–76. Згідно з стандартом оцінюється кількість органічних кислот, які утворюються під час нагрівання мастила, нанесеного шаром товщиною 1 мм на мідну пластинку.

Класифікація пластичних мастил. Промисловість випускає широкий асортимент пластичних мастил різноманітного призначення, які відрізняються складом і властивостями.

Відповідно до ГОСТ 23258–78 “Смазки пластичные. Наименование и обозначение” класифікаційне позначення мастил складається з 5 літерних і цифрових індексів, розташованих у порядку, який вказує: групу (підгрупу) відповідно до призначення; загусник; рекомендований (умовний) температурний інтервал застосування; дисперсійне середовище; консистенцію мастила.

Згідно з вказаним стандартом за призначенням пластичні мастила поділяють на 4 групи – антифрикційні, консерваційні, канатні і ущільнювальні.

Антифрикційні мастила призначені для зниження тертя і зношування тертьових деталей. У свою чергу їх ділять на 12 підгруп, які позначають індексами: С – загального призначення (солідоли) для звичайних температур (до 70°C); О – загального призначення для підвищених температур (до 110°C); М – багатоцільові, працездатні від – 30°C до + 130°C в умовах підвищеної вологості; Т – термостійкі для робочих температур 150°C і вище; Н – морозостійкі, працездатні нижче –40°C; И – протизадирні і протизносні, призначені для підшипників кочення при контактних напруженнях вище 2500 МПа і підшипників ковзання – вище 150 МПа; Х – хімічно стійкі для трібосистем, контактуючих з агресивними середовищами; П – приладові для трібосистем приладів і точних механізмів; Т – редукторні (трансмісійні); Д – приробіткові (дисульфідмолібденові, графітні та інші пасти) для полегшення складання, запобігання задирам і прискоренню приробітку; У – вузькоспеціалізовані (галузеві); Б – брикетні для тертьових поверхо́нь з використанням мастил у вигляді брикетів.

Група консерваційних мастил, яка позначена індексом З, призначена для запобігання корозії металевих поверхонь під час зберігання, транспортування і експлуатації.

Канатні мастила мають індекс К. Їх використовують для запобігання зносу і корозії сталевих канатів.

Ущільнювальні мастила призначені для герметизації зазорів; полегшення складання і розбирання арматури; сальникових пристроїв; різьбових, рознімних і рухомих з'єднань. Цей вид мастила позначається індексами: А – арматурні для використання в арматурах і сальникових пристроях; Р – різьбові; В – вакуумні для рухомих та роз'ємних з'єднань вакуумних систем. Загусник позначається першими двома літерами металу, який входить до складу мастила: Ка – кальцієве; На – натрієве; Ли – літєве; Ли-Ка – змішане літєво-кальцієве тощо. Комплексне мило позначається малою літерою “к”, після якої вказується індекс відповідного мила кКа, кВа і т. д.

Рекомендований температурний діапазон застосування мастила вказують дробом: у чисельнику – зменшену у 10 разів мінімальну температуру (без знака мінус), у знаменнику – зменшену у 10 разів максимальну температуру. Наприклад, індекс “3/12” відповідає температурному діапазону застосування від – 30° до + 120°С. За мінімальну температуру застосування приймають температуру, при якій в'язкість мастила складає 2000 Па·с.

Тип дисперсійного середовища і наявність твердих домішок позначають малими літерами російського алфавіту: “у” – синтетичні вуглеводні; “к” – кремнійорганічні рідини; “г” – домішка графіту; “д” – домішка дисульфїду молібдену. У мастилах, виготовлених на нафтовій основі, індекс “н” не вказують. Його використовують лише у позначеннях мастил, виготовлених на суміші нафтового або іншого масла.

Залежно від значення penetрації мастила мають дев'ять індексів класу консистенції(табл. 7.28).

Приклад класифікаційного позначення літєвого мастила Литол 24: МЛи 4/13-3 – мастило антифрикційне, багатощільове (М) загущене літєвим милом (Ли), працює при температурах від – 40°С до + 130°С (4/13). Відсутність індексу дисперсійного середовища вказує, що мастило виготовлене на нафтовій основі. Остання цифра 3 характеризує консистенцію мастила (межі penetрації при 25°С становлять 220–250).

Таблиця 7.28 - Класи консистенції пластичних мастил (ГОСТ 5346-78)

Індекс класу консистенції	Пенетрація при 25°С	Індекс класу консистенції	Пенетрація при 25°С
00	400–430	4	175–205
0	335–385	5	130–160
1	310–340	6	85–115

2	265–295	7	нижче 70
3	220–250		

Використання і вибір пластичних мастил. При виборі пластичних мастильних матеріалів необхідно домагатись повної відповідності їх властивостей умовам роботи в обладнаннях, які вони повинні змащувати. Оскільки пластичні оливи використовуються переважно для змащування підшипників (головним чином, підшипників кочення), то більш за все приходиться вирішувати проблеми підбору мастила для цих вузлів.

Підбір мастила в підшипниках здійснюється з врахуванням строку служби, частоти обертання, робочої температури, положення підшипника, початкового крутного моменту, ущільнення

Спосіб використання мастила в підшипниках кочення впливає на коефіцієнт тертя і строк служби підшипників. Для виконання основних трибологічних функцій мастило повинно завжди бути присутнім в трибосистемі. Кількість пластичного мастила в багатьох трибосистемах поповнюється періодично. В інших трибосистемах воно виконує свої функції протягом всього строку служби змащувального пристрою без поповнення.

У випадках підшипників кочення з покриттям і ущільненими дисками оптимальні експлуатаційні характеристики досягаються при заповненні підшипника мастилом на 30% об'єму. Якщо вони повністю заповнені мастилом, надлишок його швидко витискується з зони тертя в свобідне середовище підшипника в залежності від частоти обертання.

Під час роботи мастила зазнають механічні, термічні і хімічні навантаження. Вони поглинають частки зносу та інші механічні домішки – пил, воду, агресивні гази і розчинники.

Зовнішні дії (навантаження, швидкість, температура) на трибосистему, а отже на пластичне мастило, руйнують його структуру, що призводить до змінення механічних і реологічних властивостей мастила. Температурні змінування можуть призвести до руйнування колоїдної структури і виділенню дисперсійного середовища (оливи). В результаті погіршується змащування, а залишений загусник може склеювати трибосистему.

Збільшення температури вище температури плавлення компонентів мастила призводить до витікання його з трибосистеми, що може спричинити задир тертьових поверхонь. Механічні дії викликають зрізання волокон загусника, їх фрагментацію, розділення агрегатів, які утворюють просторову структуру, розкручування волокон і та ін. В результаті змінюється в'язкість мастила, межа текучості, пенетрація та інші властивості, пов'язанні з його структурою. При втраті 50% оливи внаслідок випаровування або синерезису корисний строк служби мастила в підшипниках знижується.

Основними параметрами роботи підшипників є навантаження, температура, швидкість обертання. Навантаження і швидкість належать до зовнішніх факторів. Температура в підшипнику залежить від температури оточуючого

середовища і процесів виділення теплоти в результаті тертя. Несуча здатність підшипників характеризується динамічною вантажопідіймністю C (Н) і граничною частотою обертання $n_{гр}$ (c^{-1}). Частіше використовують відносні показники C/P і $n/n_{гр}$, де P – еквівалентне навантаження на підшипник у відповідності з блоком навантаження, n – частота навантаження. Температура роботи підшипника – це температура, яка встановилась в результаті рівноваги між кількістю теплоти, підведеної до підшипника зовні, і кількістю теплоти, яка виділяється в результаті процесів тертя, з кількістю теплоти, що відводиться в оточуюче середовище.

Середня робоча температура більшої частини підшипників знаходиться в межах $30...80^{\circ}C$. В цьому діапазоні температур можуть робити практично усі пластичні мастила без негативного впливу на міцність їх структури. При температурі вище за $100^{\circ}C$ деякі мастила (звичайні кальцієві, натрієві, алюмінієві) не здатні працювати. При температурі до $120...150^{\circ}C$ можуть використовуватися мастила, загущені літєвими милами, комплексні мастила (Ca, Na, Al) і мастила, загущені неорганічними і органічними загусниками.

Проблеми змащування підшипників при негативних температурах пов'язана з зимовою експлуатацією машин і механізмів або їх експлуатацією в холодних кліматичних зонах. Хоча при низьких температурах ($-20^{\circ}...30^{\circ}C$) збільшується в'язкість дисперсної фази і мастило твердіє, опір обертанню підшипника залишається невеликим. В цих умовах нормальне змащування забезпечують усі мастила, за виключено тих, що виготовленні на оливах з великою в'язкістю. При температурі нижче ($-30^{\circ}...50^{\circ}C$) використовуються низькотемпературні мастила на оливах з невеликою в'язкістю і кількістю загусника.

При виборі пластичних мастильних матеріалів враховують також вплив частоти обертання підшипників. Збільшення кутової швидкості і зсуву мастила руйнує його структуру і в значній мірі зменшує в'язкість. Враховуючи, що адгезія до поверхні тертя має обмежену величину, кутова швидкість має великий вплив на ефективність мащення. Потрібно також мати на увазі, що в умовах високих швидкостей і навантажень збільшується температура в підшипнику з можливістю теплової деструкції мастила і виникненню задиру і заїданню. Тому при зростанні навантаження кутову швидкість необхідно зменшувати. Щоб температура в контакті не перевищувала допустимих значень (звичайно при $C/P \leq 10...5$ кутова швидкість обмежується до 75% максимальної швидкості).

Враховуючи, що при даній частоті обертання на колову швидкість впливають розміри підшипників, для характеристики умов роботи мастила, використовують показник nd , де d – внутрішній діаметр підшипника. Приблизні значення цього показника для різних видів підшипників, що змащуються, приведені в таблиці 7.29.

Для підшипників, які працюють з частотою обертання <3000 об/хв. і $nd \leq 150000$ мм-об/хв можна використовувати будь-який вид мастила, при частоті обертання >5000 об/хв використовують високоякісні мастила з великою

міцністю структури: літєві, комплексні (Ca, Al, Li) і полімерні. При великих частотах обертання краще працюють мастила на оливах з малою в'язкістю, але з високим класом консистенції – більш тверді.

Таблиця 7.29 - Приблизні максимально допустимі значення nd для підшипників

Тип підшипника	$nd, \cdot 10^4$ мм·об/хв
Кульковий	16...40
Роликовий	12...40
Конічний	10...25
З бочкоподібними роликами	80...22
Упорний кульковий	6...15

Сумісність використання пластичних мастил. Взаємна сумісність мастил залежить від загусників і присадок, вміщених в них. Несумісність проявляється в структурних змінах, особливо після короточасного помірному нагріву суміші, впливаючого на penetрацію після перемішування, сінерезису, температури краплепадіння і т. ін. Зміну властивостей викликану зміненнями в композиції, точно прогнозувати неможливо навіть при використанні однакових мил і олив. Мастила з однаковим типом мил звичайно взаємно сумісні. Літєві мастила несумісні з натрієвими, кальцієві – з комплексними натрієвими (в деяких пропорціях компонентів змішування). Для виключення цих проблем старе мастило при її заміні необхідно повністю вилучати з трібосистем.

Несумісність пластичних мастил може бути обумовлена декілька факторами: кальцієві мастила стабільні в слабо підкислених середовищах, кальцієві комплексні – в лужних середовищах. Введення невеликої кількості кальцієвого мила в комплексне мастило не викликає змінення властивостей індивідуальних компонентів, тоді як добавка невеликої кількості комплексного кальцієвого мастила в кальцієву змазку змінює рН суміші, звичайно достатньої для значних структурних змінень. Введення мильних мастил в немильні призводить до обмінних реакцій між катіонами мил, присадками і іонами четвертинного амонію глини, в результаті яких руйнується структура гелю системи і внаслідок цього пом'якшується змазка.

Полурідкі антифрикційні мастила займають проміжне положення між оливою і пластичним мастилом. Вони звичайно являють собою мильні мастила з довгими волокнами на базі високов'язких олив. З одного боку це структуровані системи, хоча і з низькою концентрацією загусника (2...4%), подібно пластичним. З другого – подібно оливам, вони течуть під дією власної ваги. Завдяки більшій високій в'язкості вони мають кращу несучу і демпфуючу здатність, ніж оливи, на базі яких вони виготовлені. Для покращення несучої здатності і адгезії, зниження зносу і запобігання задирів в ці мастила вводять присадки в незначній кількості (менш 2%), оскільки хімічно активні присадки перешкоджають форму-

ванню оптимально колоїдної структури і погіршують контактну витривалість металу при жорстких режимах експлуатації трібосистем.

Перевага полурідких мастил над трансмісійними оливами полягає в їх ущільнюючих властивостях, малих втратах на втечі, високих адгезійних характеристиках, які особливо добре проявляються в режимі граничного мащення при запуску механізму.

Полурідкі мастила використовують для змащування тихохідних редукторів різного призначення (Трансол–100, –200, –300, Циатим–208 СТП–Л, СТП–З та ін.).

Недоліком полурідких мастил є поганий тепловідвід від тертьових деталей, а також великі енергетичні втрати в порівнянні з оливами при підвищенні частоти обертання. Це обмежує колову швидкість зубчастих пар, змащених полурідкими мастилами (6 м/с).

Асортимент пластичних мастил. Промисловість випускає широкий асортимент пластичних мастил різноманітного призначення, які відрізняються складом і властивостями. Асортимент за призначенням та галузі використання антифрикційних мастил наведено в таблиці 7.30.

7.6. Тверді мастильні матеріали

7.6.1. Призначення, характеристика і властивості

У деяких трібосистемах, які працюють у специфічних умовах, коли можливості використання рідких олив і пластичних мастил надто обмежені або взагалі недопустимі, єдиним способом змащування є застосування твердих мастильних матеріалів (ТММ).

Вони використовуються для змащування трібосистем кочення і ковзання при високих питомих навантаженнях на поверхні кочення і при дуже низьких швидкостях ковзання (що є в зонах з дуже малою часткою гідродинамічного режиму мащення), а також для змащування електропровідних контактів високоточних механічних приладів, які вимагають дуже низьких коефіцієнтів тертя при пуску і для яких недопустиме забруднення оливою або пластичним мастилом в процесі експлуатації. Сучасні тверді мастильні матеріали створюються також переважно для використання в екстремальних умовах – глибокому вакуумі, при впливі радіації, дуже низьких (-240°C) і дуже високих (до 900°C і вище) температур. Використання ТММ доцільне у трібосистемах, працюючих в умовах вібрацій і ударних навантажень. Вони невибагливі у контакті із забрудненнями й самі не забруднюють деталі. Під час їх експлуатації не утворюються відходи, які вимагають утилізації. В цьому аспекті ТММ є по суті конструкційним матеріалом самої деталі.

Тверді мастильні матеріали можуть також не належати ні до одного з елементів тертьових деталей (наприклад, у вигляді порошку), можуть входити як наповнювач композиційного матеріалу або покриття одного або двох елементів трібосистеми. Крім того можна виділити суміші ТММ з сполученими, які полегшують їх нанесення на робочу поверхню, і нові антифрикцій-

ні мастила, головними представниками яких є металографічні матеріали.

У наш час застосовують різноманітні природні та штучні тверді мастильні матеріали. їх умовно поділяють на 2 групи:

- неорганічні: шаруваті (графіт, дисульфід молібдену, дисульфід вольфраму WS_2 , диселеніди молібдену та вольфраму $MoSe_2$, WSe_2 , нітрид бору BN , фторирований графіт $(CF_x)_n$ та ін.); нешаруваті (фториди й хлориди метилів CaF_2 , BaF_2 , $ZrCl$, окисли та ін.); м'які метали (Pb , Sn , In та ін.);

- органічні полімерні матеріали (політетрафторетилен, поліініди тощо).

У таблиці 7.31 приведені показники щільності, коефіцієнту тертя і гранично припустима температура експлуатації деяких ТММ (сульфідів, селенідів і телуридів металів).

Таблиця 7.31 - Характеристика твердих мастильних матеріалів

З'єднання	Тип кристалічної ґрати	Щільність, г/см ³	Коефіцієнт тертя	Гранично допустима температура експлуатації, °С	
BiS_3	Ромбічна	7,40	0,07...0,14	500	–
CuS	Гексагональна	4,28	0,17...0,41	520	–
Cu_2S	Гексагональна	5,60	0,18	450	–
MoS_2	Гексагональна	4,8...5,16	0,02...0,30	1100	400
NbS	Моноклина	5,9...6,0	0,04	1300	400
PbS	Кубічна	7,50...7,59	0,37	410	500
Ta_2S_2	Гексагональна	7,16	0,06	1500	–
WS_2	Гексагональна	7,50...7,63	0,03...1,60	1400	500
$NbSe_2$	Гексагональна	6,25	0,06...0,17	1350	350
$TaSe_2$	Гексагональна	–	0,08	900	575
$MoSe_2$	Гексагональна	6,90	0,03...0,22	1350	400
WSe_2	Гексагональна	9,0	0,02...0,18	1350	350
$MoTe_2$	Гексагональна	7,80	0,10...0,34	1240	400
WTe_2	Ромбічна	9,44	0,27...0,49	1020	–

Важливою перевагою твердих змащувальних матеріалів перед іншими видами є зменшення зносів трібосистемах машин і механізмів при їх пуску і зупинці, а також при можливому виникненні так званого ефекту "оливого голодування" (наприклад, при запуску в умовах низьких температур).

Головним фактором забезпечення змащувальної дії в контакті твердих тіл є формування плівки з малим опором зсуву. При цьому шорсткості поверхні

твердих тіл сприймають механічне навантаження на невеликій частки номінальної площини, а зсув реалізується в плівці, тому опір ковзання в цих умовах набагато нижче ніж у випадку відсутності плівки в зоні контакту.

Плівка твердозмашувальної речовини крім антифрикційної дії має також протизносні властивості. Оскільки в її присутності знижується імовірність розриву когезійних зв'язків в контактуючих тілах, знижується і імовірність зносу. Дуже важливо, що присутність твердого змашувального матеріалу зменшує і можливість появи між тертьовими поверхнями твердих часток зношування, що мають абразивну дію. Перелічувані фактори призводять в результаті до зниження інтенсивності адгезійного і абразивного зношування.

Недоліком твердих мастильних матеріалів є більш низьке відведення тепла від поверхонь тертя, а також відносно низький строк служби.

До найпоширеніших твердих мастил у автотракторному та сільськогосподарському машинобудуванні відносять графіт, нітрид бору дисульфід молібдену, політетрафторетилен.

Графіт є найбільш сталою кристалічною модифікацією вуглецю з яскраво вираженою шаруватою структурою. (рис 7.14)

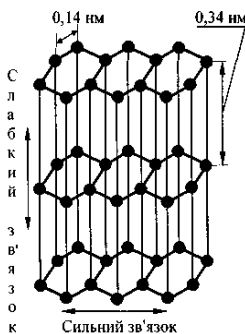


Рис 7.14 Схема кристалічних ґрат графіту

В гексагональних кристалічних ґратах графіту розташовані атоми вуглецю, зв'язані уздовж ліній шестикутників ковалентними силами. Зв'язок між кристалічними площинами, відстані між якими здійснюється за рахунок слабких Ван-дер-Ваальсових взаємодій, енергія котра на 3...4 порядки нижче, ніж у ковалентних. Тому зсувна міцність графіту в напрямку, рівнобіжним заповненими атомами вуглецю кристалічним площинам, набагато менше, ніж у напрямках, що відповідають розриву ковалентних зв'язків.

Величина енергії зв'язку між структурними шарами графіту залежить від адсорбції сторонніх речовин. Пара води, кисень, вуглеводні, проникаючи в міжплощинні простори графіту, збільшують відстань між його шарами й знижують тим самим енергію зв'язку між ними. Тому мастильні властивості графіту слабо виявляються у вакуумі і при температурі більш 100° С.

Найбільш сприятливі мастильні властивості графіту виявляються в присутності вологи. Ефект мастильної дії графіту визначається тим, що молекули води, що утримуються в повітрі, сорбуються в міжплощинних проміжках і ще більше послабляють міжплощинні зв'язки. Під час втрати адсорбційних шарів води внаслідок нагрівання або зниження атмосферного тиску антифрикційні властивості графіту погіршуються. При відсутності вологи коефіцієнт тертя поверхонь, розділених графітовим прошарком, досягає 0,3, у той час, як при наявності сорбованої вологи він складає приблизно 0,05. Ця обставина обмежує використання графіту. Однак у загальному машинобудуванні графіт знайшов широке застосування для мащення сухих нарізних сполучень, канатів як добавку в трансмісійні оливи і т. ін.

Гарна змащувальна властивість графіту за нормальних умов забезпечується завдяки здатності міцно зчіплюватися з поверхнею чавуну, сталі, хрому та інших конструкційних матеріалів. При дуже високих температурах поява оксидного шару на поверхні графіту може поліпшувати його мастильні властивості. Цьому сприяє хороший зв'язок графітових плівок з оксидами металів, що беруть участь у терті.

Хороші мастильні властивості графіту виявляються під час змащення сталевих та мідних поверхонь, схильних до окислювання. З підвищенням температури міцність і модуль пружності графіту зростають. Тому графіт не лише термостійкий, а й не схильний до повзучості під час сильного нагрівання. Він має високу температуру плавлення (3000°C), непогану електропровідність, пластичним він стає при температурі 2000°C . Тому графіт є добрим високотемпературним мастилом й дуже ефективний для використання в щітках та інших ковзких електроконтактах. Необхідно відзначити також такі властивості графіту, як малу хімічну активність, стійкість до дії більшості кислот і лугів, практичну інертність до радіоактивного випромінювання.

Графіт добре використовується як у складі компонента різних антифрикційних матеріалів: чавуна, композицій на полімерній основі, графітовмісних змащувальних матеріалів.

Нітрид бору в модифікації, близький до графіту, має також гексагональну структуру з відстанню між атомами в площині базису, рівним $2,5\text{\AA}$, між площинами базису – 5\AA .

На відміну від графіту площини спайності нітриду бора складаються з різних атомів (бор і азот). Механізм дії нітриду бора при терті схожий з графітом, однак значення коефіцієнта тертя більш високі. Це мабуть пов'язано підвищеною в порівнянні з графітом міцністю між поверхнями кристалітів. У високотемпературних умовах роботи трібосистеми (до 900°C) гарні результати дає використання суміші графіту з нітридом бора. Графітні плівки забезпечують мащення до температури 500°C , а нітрид бора – в інтервалі температур $500\dots 900^{\circ}\text{C}$. Трібологічні характеристики графіту і нітриду бора наведені в таблиці 7.32.

Таблиця 7.32 - Характеристики графіту і бора

Матеріал	Коефіцієнт тертя		Ва- куум, Па
	на повітрі	у вакуумі	
Графіт:			
природний	0,19	0,44	$6 \cdot 10^{-7}$
паралітичний	0,18	0,50	$6 \cdot 10^{-7}$
Нітрид бора	0,25	0,70	$2 \cdot 10^{-7}$

Нітриду бора забезпечує низький коефіцієнт тертя (0,15 при 600°C) в умовах високих температур.

Гарні трибологічні властивості має також дисульфід молібдену MoS_2 – природний мінерал (молібденіт), можливе також використання синтетичного дисульфиду молібдену

Дисульфід молібдену (MoS_2), як і графіт має шарувату гексагональну кристалічну структуру (рис 7.15.)

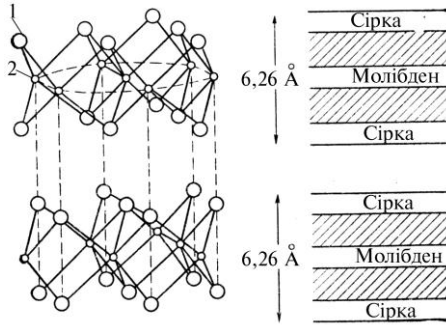


Рис. 7.15 Кристалічна гексагональна структура дисульфиду молібдену:
1 – молібден; 2 – сірка

Шари сірки, які утворюють поверхні кристала MoS_2 , забезпечують сильну адгезію до поверхні металу. Крім того, змащувальна дія дисульфиду молібдену так само, як і графіту, заснована на його кристалічній структурі з дуже малою поверхневою енергією базисних площин. Відстань між атомами сірки, що знаходяться в різноманітних шарах кристалу, значно більша, ніж всередині шарів. Тому слабкі зв'язки між шарами сірки забезпечують вільне переміщення шарів відносно один одного. З другого боку, всередині шару діють сильні ковалентні зв'язки між Mo і S , забезпечуючи високу міцність базисних шарів. Вказана анізотропія (розщеплення шарів у певній площині) у будові кристалічної решітки MoS_2 виражена тим сильніше, чим чистіша речовина. Тому найбільш ефективно мастильні властивості MoS_2 виявляються в умовах вакууму. На відміну від графіту, при наявності води коефіцієнт тертя MoS_2 та спрацьовування збільшуються.

Дисульфід молібдену може сприймати статичні навантаження до $3 \cdot 10^3$ МПа і динамічні-до 10 МПа, тобто він практично працездатний до тисків, рівних границі текучості багатьох металів. Для підвищення довговічності антифрикційних покриттів на основі дисульфиду молібдену до нього добавляють сульфіди деяких металів в якості модифікаторів.

Вважається також перспективним використання MoS₂ разом з графітом в різних пропорціях в залежності від вимог до ТММ.

До недоліків дисульфиду молібдену слід віднести те, що він легко окислюється. При підвищених температурах MoS₂ окислюється до триоксиду молібдену, що негативно впливає на мастильні властивості й адгезію дисульфиду молібдену до поверхні металу.

Дисульфід молібдену найбільш ефективний у різноманітних вузлах тертя ковзання (шарніри, важелі, шліцьові та різьбові з'єднання, ланцюгові та зубчасті передачі та ін.).

Достоїнствами графіту і дисульфиду молібдену є те, що вони часто зустрічаються в природі у вигляді мінералів, що добуваються промисловими способами.

В якості протекторних механічних мастил широко використовують безперервні полімерні покриття із термопластичних і термоактивних пластмас. До полімерів, що використовують в якості ТММ, відносять поліетилен, нейлон, капрон і політетрафторетилен.

Політетрафторетилен (ПТФЕ) являє собою термопластичний матеріал, який має унікальні антифрикційні властивості. Молекули цього полімеру являють собою міцні вуглецеві ланцюги з елементарним кільцем у вигляді – CF₂– з надзвичайно слабкими міжмолекулярними зв'язками. ПТФЕ створює поверхні з дуже малою енергією, що забезпечує ефективну змащувальну дію. Висока хімічна інертність полімеру та його нездатність сорбувати вологу дозволяють використовувати ПТФЕ у найрізноманітніших умовах, включаючи вакуум, різні газові середовища, підвищені та низькі температури.

В процесі тертя молекули ПТФЕ переносяться на відповідну деталь і орієнтуються в напрямі ковзання. При помірних навантаженнях і швидкостях ПТФЕ перевищують усі ТММ, однак в умовах підвищених навантажень і швидкостей зношування і тертя цього полімерного покриття різко збільшується. Крім того, ПТФЕ має низьку теплопровідність, недостатню механічну міцність, великий коефіцієнт лінійного розширення і незначну адгезією до покритої поверхні.

Ефективність використання твердих мастильних матеріалів залежить від конструкції трибосистеми, підготовки його поверхні й способу нанесення. Тверді мастильні матеріали наносять: у порошкоподібній формі, у вигляді суспензії, пасти, лакових покриттів, металевої плівки з м'якого металу й хімічних покриттів із солей металів. Тверді мастильні матеріали можуть бути використані також як домішки, які суттєво підвищують ефективність рідких олив і пластичних мастил. Суспензії з твердими мастильними матеріалами

можна вводити в моторні, трансмісійні, гідравлічні оливи й мастильно-охолодні рідини для поліпшення їх антифрикційних властивостей.

7.6.2 Методи і технологія нанесення

У промисловості застосовують методи і технології нанесення покритть у залежності від умов експлуатації трібосистем (навантаження, швидкості ковзання, температура) і необхідного технічного ресурсу. Усі методи можна розділити на три групи.

Перша група. Нанесення покритть із суспензій, що складаються з антифрикційного наповнювача, що зв'язує речовини і розчинника. Суспензії наносяться напилюванням з пульверизатора з наступним сушінням і отвердінням, можливе нанесення пензликом або зануренням деталі. Такі технології застосовують при нанесенні покритть, призначених для роботи на повітрі, у вакуумі і середовищі інертних газів при малих і середніх тисках, помірних температурах і швидкостях ковзання. У якості сполучних використовують органічні (фенольні, епоксидні, кремнійорганічні смоли) і неорганічні типу ВНИИ НП (ВНИИ НП-209, ВНИИ НП-212, ВНИИ НП-213 і ін.).

Друга група. Нанесення покритть механічним (натирання, галтівка, вібкат натрію, фосфати і борати металів), фізичним (катодний, іонний, плазмовий, детонаційний, газо-термічний, пневматичний та ін.), електрофізичним (електрофрез) і хімічним способами.

Механічні методи нанесення покритть забезпечують зчеплення часток, наприклад, часток MoS_2 , завдяки їхній адгезії до металу і впровадження в поверхневий шар при механічних процесах натирання, галтівки, віброгалтівки і т. ін.

Третя група. Нанесення покриття методами дифузійної хіміко-термічної обробки металевих деталей деякими газами (сірководнем, сірководнецем і ін.). Відміною рисою покритть, які наносяться цим методом, є наявність у покритть синтетичного MoS_2 значної товщини (до 100 мкм) і збереження працездатності у вакуумі в широкому інтервалі температур (-200...850° С). Цей метод дозволяє одержати більш міцне зчеплення покриття з поверхнею деталі, тому що в цьому випадку має місце не адгезія або механічне впровадження часток, а їхній хімічний зв'язок з металом.

Досвід застосування таких покритть досить різноманітний. Так, наприклад, поряд з моношаровими застосовують багатошарові покриття, наприклад, покриття з м'якою металевою підкладкою. Підкладку одержують електrolітичними методами, напилюванням у вакуумі та ін.

У найбільш відповідальних випадках, наприклад, в роз'ємних електроконтактів, використовують багатошарові металеві покриття, що забезпечують плавне наростання зсувного опору в міру поглиблення в поверхню.

Як полімерні покриття звичайно використовують термопласти: капрон, нейлон, фторопласт та ін. Часто в полімер додають у якості наповнювача графіт або дисульфід молібдену. Однак покриття на основі термопластів експлуатується лише в слабко навантажених вузлах, оскільки при експлуатації

виявляються наступні недоліки: різке падіння міцності з ростом температури, плин під навантаженням, слабка адгезія до деталі.

Досить ефективні покриття у виді м'яких хімічних сполук, сформованих на поверхні хімічним шляхом за рахунок обробки реагентами, що містять хлор, йод, сірку, фосфор. При цьому на поверхні утворюються тонкі, міцно зв'язані з основою плівки хлоридів, йодидів, сульфідів, фосфатів.

Досить доцільно використовувати прийоми поповнення покриття у міру зношування. До числа таких прийомів відноситься ротапринтний метод поповнення запасу покриття на робочій поверхні.

На рис. 7.16 показані деякі варіанти ротапринтного методу

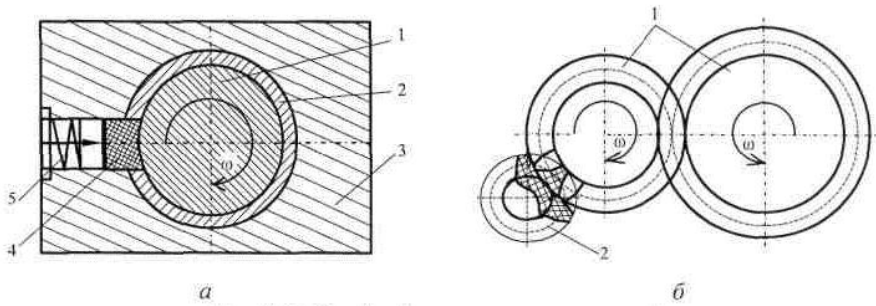


Рис 7.16 Ротапринтний метод поповнення покриття

На схемі, рис. 7.16 а, показаний спосіб подачі мастильного матеріалу в підшипник ковзання. Вал 1 обертається у втулці 2, встановленої в корпусі 3. До поверхні вала постійно притиснутий вкладиш 4 із покриття за допомогою пружини 5. На схемі, рис. 7.16, б, зубчаста передача 1 постійно змазується за рахунок шестірні 2, виготовленої з армованого покриття.

Починаються спроби керування мастильною дією покриття. При обробці поверхонь, покритих шаром покриття (графіт, дисульфід металів та ін.), пучком прискорених іонів можна домогтися різкого зниження коефіцієнта тертя (аномально низьке тертя).

Цікавий прийом застосування покриття у поле постійних магнітів. Тут покриття змішують з колоїдно-дисперсним феромагнітним порошком. Наприклад, на тертьових поверхнях у зоні зачеплення шестірень розміщується пара магнітів, які створюють магнітне поле. Порошкова суміш подається в зону зачеплення і утримується там магнітним полем, забезпечуючи постійне мащення контакту зубів. Шорсткуваті лускаті частки феромагнітику механічно утримують частки покриття.

Таблиця 7.11 - Фізико-хімічні показники олив для дизельних двигунів (ГОСТ 8581-78)*

Показник	М-10В ₂	М-8Г ₂	М-10Г ₂	М-8Г _{2к*}	М-10Г _{2к*}	М-8ДМ	М-10ДМ
В'язкість кінематична, при 100°C, мм ² /с	11±0,5	8±0,5	11±0,5	8±0,5	11±0,5	8–8,5	≥11,4
Індекс в'язкості, не нижче	85	85	85	95/90	95/85	102	90
Масова частка механічних домішок, не більш	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,020	0,025
Температура спалаху у відкритому тиглі, °С, не нижче	205	200	205	210/200	220/205	195	220
Температура застигання, °С, не вище	–15	–25	–15	–30	–18/–15	–30	–18
Корозійність на пластинках із свинцю, г/м ² , не більше	10	20	10	відсутня	відсутня	відсутня	відсутня
Миючі властивості по ПЗВ, бали, не більш	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
Лужне число, мг КОН на 1г оливи, не менш	3,5	6,0	6,0	6,0	6,0	8,5	8,2
Зольність сульфатна, %, не більш	1,3	1,65	1,65	1,15	1,15	1,5	1,5
Масова частка активних елементів, %, не менш:							
кальцію	0,08	0,15	0,15	0,19	0,19	–	0,15
барію	0,18	0,45	0,45	–	–	–	–
цинку	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	–	0,04
фосфору	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	–	–
Густина при 20 °С, г/см ³ , не більш	0,905	0,905	0,905	0,905	0,900/0,905	0,897	0,905

* В чисельнику – показники вищої категорії якості, в знаменнику першої категорії

Таблиця 7.30 - Призначення і галузь використання антифрикційних пластичних мастил

Підгрупа мастила	Область використання	Марка
Мастила загального призначення: для звичайних температур для підвищених температур	Трібосистеми, які працюють при температурі до 70°C. Трібосистеми, які працюють при температурі до 110°C	Солідол С, Прес-солідол С, Солідол Ж, графітна, 1-13, консталін, Литин-2
Багатоцільові мастила	Трібосистеми, які працюють при температурі до -30...30°C в умовах підвищеної вологості; в достатньо потужних механізмах забезпечується працездатність сполучень до -40°C	Литол-24, Литол-24 РК, ФІОЛ-1, ФІОЛ-2, ФІОЛ-2М, БНЗ-3, Алюмол, ЛКМтранс-2
Термостійкі мастила	Трібосистеми, які працюють при температурі, вище 150°C	ЦИАТИМ-221, Уніол-2М/1, ВНИИНП-207, -210, -231, -233, -235, -246, -247, графітол, Аерол, Силикол, Полимол, Маспол, БНЗ-4, БНЗ-5, ПФМС-4с
Низькотемпературні мастила	Трібосистеми, які працюють при температурі, нижче -40°C	ЦИАТИМ-203, ГОИ-54п, Ли-га, Зимол
Хімічно стійкі мастила	Трібосистеми, які контактують з агресивними середовищами	ЦИАТИМ-205, ВНИИНП-279, -280, -282, -294, -295, -298, Кригель
Приборні мастила	Трібосистеми приладів і точних механізмів	ЦИАТИМ-201, ОКБ-122-7, ВНИИНП-223, -228, -257, -258, -260, -270, -271, -274, -286, -293, -299, Протон
Редукторні (полуридкі) мастила	Зубчасті і в'їтові передачі усіх видів	ЦИАТИМ-208, Шахтол-У, Шахтол-К, СТП-Л, СТП-3, Трансол-100, Трансол-200, Трансол-300, Редуктол М, СКП-М, ЛЗ-ПЖЛ-00
Вузькоспеціалізовані (галузеві) мастила	Трібосистеми, мастила, які задовольняють спеціальним вимогам: автомобільні для електричних машин	Литинг-2, АМ-кардана, Литол-459/2, ЛСЦ-15, ШРБ-4, ШРУС-4, Фиол-2У, №158, ЛЗ-31, КСБ, ДТ-1, Дисперол-1,0, МЗ-10 ВНИИНП-242, ДДС-1, ЛДС-3, ЕШ-176, СВЕМ

8 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ҐРУНТІВ НА ЗНОС ҐРУНТОРІЗУЮЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

8.1 Характеристика ґрунтів

За своїм генезисом ґрунти України належать до типів середньої смуги Європейської частини СНД і являють собою нейтральні чорноземи і сіроземи, що розвиваються головним чином на лісовидних суглинках. Вони мають підвищений зміст іонів Ca^{++} і Mg^{++} , однакове число pH і порівняно невеликий процентний уміст гумусу.

Петрографічний склад фракцій механічного складу для всіх ґрунтів якісно однорідний (табл. 8.1). Виключення складає ґрунт №5, у фракції $1,00\pm 0,25$ мм, у якій утримуються 30% черепашкового вапняку.

Таблиця 8.1-Петрографічний склад фракцій $1,00\pm 0,25$ мм (у %)

№ ґрунту	Мінерали				
	Кварц	Польовий шпат	слюда	вапняк	інші
1	94,50	3,60	1,60	-	Інше
2	94,00	4,23	1,37	-	-/-
3	95,55	3,20	1,05	-	-/-
4	93,75	4,05	2,00	-	-/-
5	65,05	4,00	0,80	29,95	-/-

Стосовно форми часток окремих фракцій механічного складу, за даною ознакою всі ґрунти майже однакові. Виключення складає той же ґрунт № 5, коефіцієнт закругленості кварцових зерен P якої (табл. 8.2) дорівнює 2,76, тоді як для інших 2,54.

Таблиця 8.2-Коефіцієнт округлення зерен кварцу фракції $1,00\pm 0,25$ мм

	Ґрунт				
	№1	№2	№3	№4	№5
Значення P	2,53	2,54	2,51	2,58	2,76

Коефіцієнт закругленості кварцових зерен інших фракцій у даній роботі не визначається, однак відомо, що зерна кварцу фракцій $0,25\pm 0,05$ мм і $0,05\pm 0,01$ мм окатані значно менші і коефіцієнт закругленості їх (за шкалою Кабакова) дорівнює 1,0.

Характеристики ґрунтів України подані в табл. 8.3.

Таблиця 8.3-Характеристика ґрунтів

Параметри	№ ґрунту				
	1	2	3	4	5
Повне найменування ґрунту (за класифікацією М.М. Сібирцева)	Темно-сірий слабоопідзолений, середньглинистий на лісовидном суглинку	Чорнозем звичайний супіщаний на глинистому піску	Чорнозем легкий легкопластичний на карбонатному лісовидному суглинку	Темно-сірий слабоопідзолений, середньглинистий на лісовидном суглинку	Чорнозем луговий важкосуглинний на еллювіальному піску
Питома вага твердої фази ґрунту в г/см ³	2,70	2,66	2,67	2,64	2,61
Верхня межа пластичності E , %	55,0	23,0	66,5	50,0	62,5
Число пластичності	10,5	2,49	7,30	7,73	5,07
Ємність поглинена у мг-екв. на 100м абсолютно сухого ґрунту	30,50	13,97	38,59	26,39	35,64
Поглинені катіони мг/екв/100г абсолютно сухого ґрунту					
Ca^{++}	23,28	8,30	30,26	18,17	-
Mg^{++}	4,95	2,08	6,08	2,46	-
Na^{+}	0,46	0,20	0,49	0,42	0,71
K^{+}	0,50	0,23	0,39	0,54	0,26
Водна витяжка мг-екв/100г абсолютно сухого ґрунту					
Ca^{++}	5,00	3,99	4,34	4,36	11,03
Mg^{++}	1,22	0,57	1,08	0,80	2,66
Na^{+}	0,03	0,015	0,025	0,055	0,17
K^{+}	0,01	0,012	0,005	0,025	0,017
CO_3	немає	-/-	-/-	-/-	-/-
KCO_3^{-}	0,47	0,31	0,45	0,46	1,29
Cl	0,01	0,01	0,01	0,02	0,015
pH	7,48	7,35	7,49	7,52	7,03
% гумусу на 100м абсолют. сухого ґрунту	3,22	1,87	4,92	2,10	3,90
Примітка	Скипає з HCl				

8.2 Вплив вологості ґрунту на знос органів машин

Як особливість ґрунтового зношування насамперед необхідно відзначити те, що ваговий знос зразків у машині тертя при лабораторних випробуваннях (а також і лемешів у польових умовах) зростає за законом прямої, підкорюючись лінійній залежності наступного виду:

$$y = \varphi x, \quad (8.1)$$

де y - ваговий знос;

x - шлях тертя (час);

y – постійний коефіцієнт, що підлягає визначенню в кожному окремому випадку.

Така залежність дійсна для всіх значень вологості ґрунту, при яких можлива її обробка. На рис.8.1,а ця залежність надана для декількох значень вологості ґрунту №2, а на рис.8.1,б – для всіх п'яти ґрунтів при вологості їх, рівній 20%.

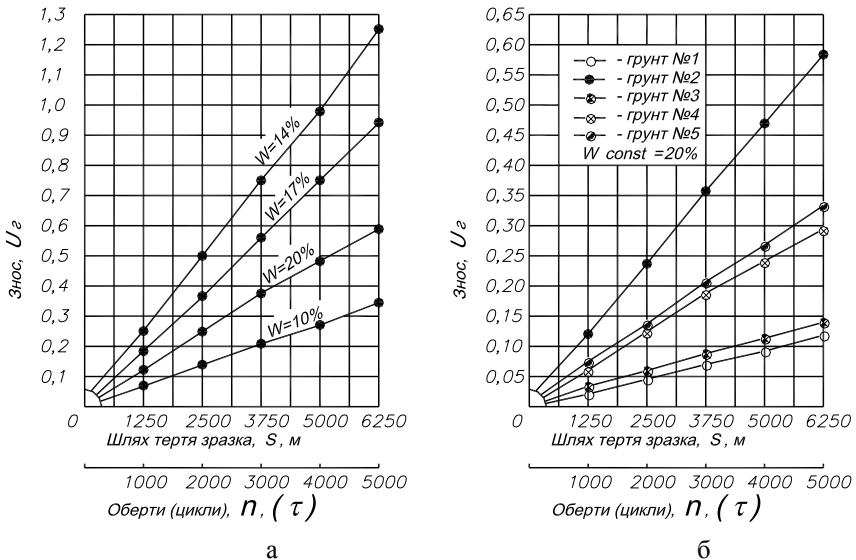


Рис. 8.1 Залежність наростання вагового зносу зразків від шляху тертя при зношуванні: а) на ґрунті № 2; б) на всіх ґрунтах

При випробуваннях нижня межа вологості для всіх ґрунтів була прийнята рівній 10%..

У результаті досліджень була отримана залежність зношуваної здатності

досліджених ґрунтів від вологості (рис. 8.2).

Досліджувати зношувану здатність ґрунтів при більш низьких значеннях вологості на машині тертя КР-1, як і на інших установках подібного типу, не є можливим через те, що пересохлий ґрунт швидко подрібнюється в машині до пилоподібного стану, при якому він не піддається ущільненню.

Як видно з рис. 8.2, зі збільшенням вологості, виходячи з «нижньої» межі, вплив ґрунту на знос також збільшується до визначених значень (відповідного кожному ґрунті), після якого різко зменшується.

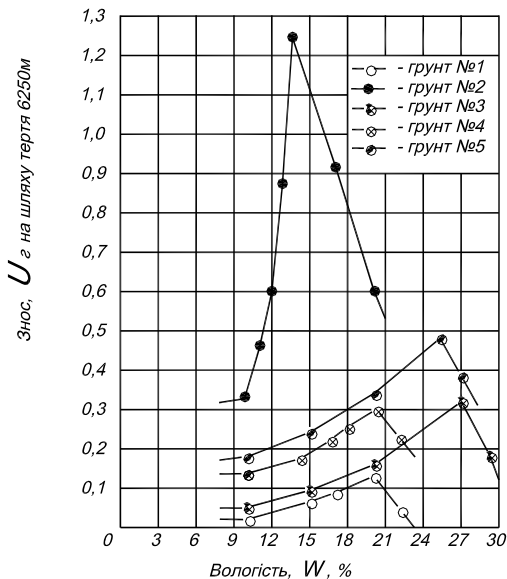


Рис. 8.2 Залежність зношеної здатності ґрунтів від вологості

Відзначимо, що ця «нижня» межа для кожного зв'язного ґрунту (ґрунту № 1, 2, 3, 4 і 5) відповідає 0,4 від значення верхньої межі пластичності (порів. дані табл. 8.3 і рис. 8.2).

Незважаючи на те, що ущільнення ґрунту відбувалося і надалі, збільшення його зношеної здатності з підвищенням вологості від зазначеної межі, все ж таки не спостерігалось.

Пояснення цьому явищу можна знайти в дослідженні В.І. Бирулі, у якому доведено, що зв'язні ґрунти при вологості здатні нести значні навантаження й ущільнюються лише до визначеного «порога». Значення цього «порога» дорівнює $\approx 0,4$ від верхньої межі пластичності.

У зазначеному інтервалі (від «нижньої» до «верхньої» межі) ця залежність (рис. 8.2) у загальному виді може бути представлена як:

$$U = ae^{nw}, \quad (8.2)$$

де U - знос зразка в машині (шлях тертя 6250м в г);

w - вологість ґрунту абсолютна в %;

a і n - постійні параметри, які необхідно визначити для кожного ґрунту окремо.

Математична обробка результатів випробувань дозволила визначити значення постійних параметрів “ a ” і “ n ” для кожного ґрунту. Підставляючи ці значення в рівняння (8.2), одержали емпіричні формули для визначення вагового зносу для зразків у машині тертя КР-1 при шляху тертя 6250м в г у залежності від абсолютної вологості ґрунту:

$$U_1 = 0,00966 \cdot e^{0,29w} \quad \text{— для ґрунту № 1;}$$

$$U_2 = 0,0115 \cdot e^{0,332w} \quad \text{— для ґрунту № 2;}$$

$$U_3 = 0,01139 \cdot e^{0,122w} \quad \text{— для ґрунту № 3;}$$

$$U_4 = 0,06 \cdot e^{0,181w} \quad \text{— для ґрунту № 4;}$$

$$U_5 = 0,0968 \cdot e^{0,062w} \quad \text{— для ґрунту № 5;}$$

На рис. 8.3 показано вирівнювання в напівлогарифмічній координатній сітці кривих рис. 8.2, як свідчення відповідності рівнянню (8.2) вищевказаної залежності.

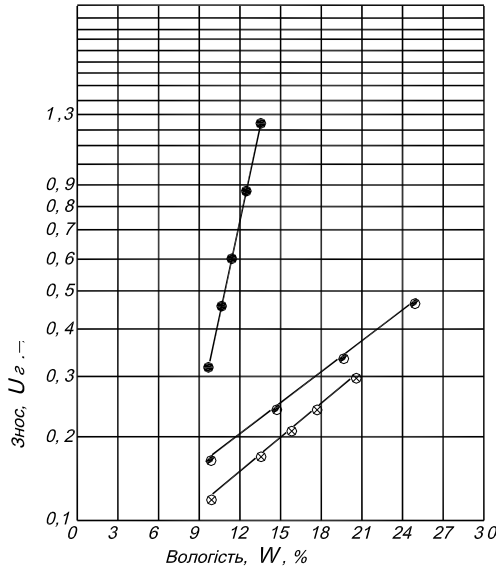


Рис. 8.3 Залежності зношеної здатності ґрунтів у залежності від вологості

—●— - ґрунт №2 —⊗— - ґрунт №4
 —●— - ґрунт №5

Збільшення впливу ґрунту на знос в інтервалі від “нижньої” межі до “верхньої” можна пояснити наступним. При недостатнім зволоженні опір різання ґрунту незначний; при цьому відсутні різкі коливання в зміні значення зусилля – вплив на знос ґрунту невелика.

Зі збільшенням вологості ґрунту при його ущільненні зв'язки між окремими складових ґрунту зростають, збільшується коефіцієнт відносного тертя часток, останні здобувають як би фіксоване положення, зусилля різання зростає, кварцові частки (унаслідок дифузії глинистих часток у дисперсійне середовище) оголені, вплив ґрунту на знос збільшується.

На рис. 8.4,а представлений характер інтенсивності зміни значень зусилля різання ґрунту №1 для різних значень вологості, а на рис. 8.4,б – та ж картина для всіх ґрунтів за найбільш характерними рівнями вологості, при яких коливання в значенні зусилля різання досягає свого максимуму (приблизно 30%).

Ці дані добре погодяться з результатами О.М. Зеленина [20], згідно з якими зусилля різання ґрунтів змінюються стрибкоподібно в ту й іншу сторону від номіналу (середнього значення) на 15-30%.

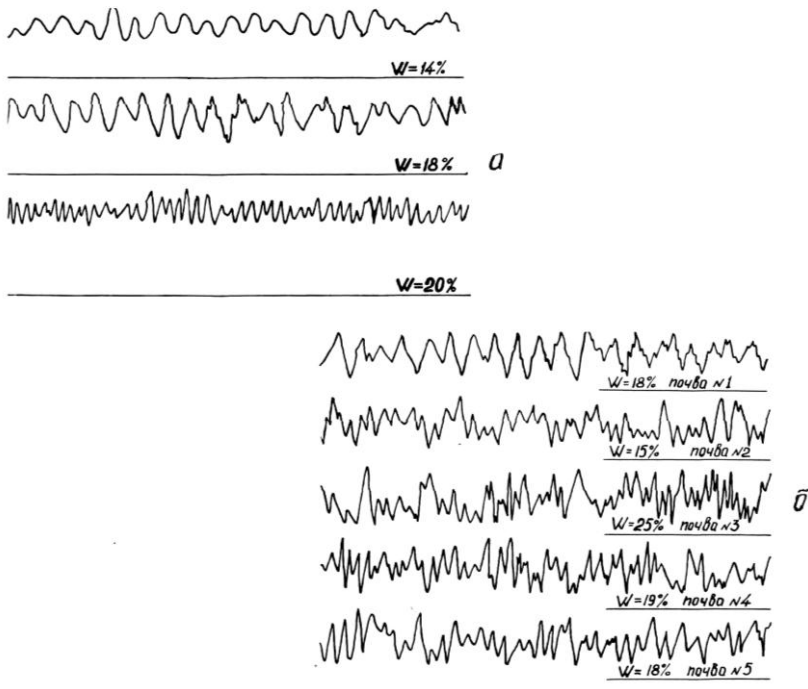


Рис. 8.4 Зміни зусилля різання ґрунтів різної вологості:
 а) ґрунту №1; б) усіх досліджених (копії динамограм, записаних на міліметрову стрічку)

Залежність зусилля різання від вологості, подана графічно на рис. 8.5, добре підтверджує дані про те, що зі збільшенням вологості і щільності ґрунту зусилля його різання зростають.

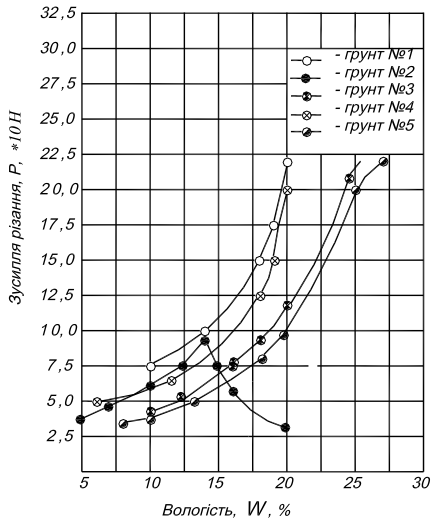


Рис. 8.5 Залежність зусилля різання ґрунтів від вологості

Ця залежність у загальному вигляді також може бути представлена показовою функціональною залежністю, подібною (8.2), що характеризує вплив ґрунту на знос ґрунторіжучих органів машин від вологості (від “нижньої” до “верхньої” межі).

Глинисті і суглинні ґрунти (за механічним складом) при вологості, що перевищує “верхню” межу, досить важко обробляти через сильне залипання ріжучих органів і ускладненого пересування енергосасобів. Супіщані і піщані ґрунти після досягнення вологості залишаються здатними до обробки.

Для визначення відповідності сприйманих лемешем і зразком зусиль наведено наступний приклад. Припустимо, що всі зусилля різання сприймаються в одному випадку лемешем, а в іншому випадку – зразком. При оранці ґрунту №4 вологістю 15,1% плуг П5-35М чинив опір у середньому 17600Н, тобто 3520Н на один леміш. Площа трапецієподібного лемеша дорівнює 560 см². Середній питомий тиск у даному випадку буде дорівнювати 0,063 МПа. При різанні зразком (площею 14 см²) у машині тертя КР-1 того ж ґрунту вологістю 15% ґрунт чинив середній опір 87,5Н (див. рис. 8.5). У даному випадку середній граничний тиск дорівнює 0,062 МПа:

Таким чином, питомий тиск, сприйманий зразком і лемешем, однаковий.

На рис. 8.6 представлена залежність впливу ґрунтів на знос від зусилля різання. У даному випадку зі збільшенням зусилля різання ваговий знос зразка наростає за законом прямої:

$$y = a + bx, \quad (8.3)$$

де y - ваговий знос, г;

x - зусилля різання, Н;

a і b - постійні коефіцієнти, що залежать від властивостей як ґрунту, так металу.

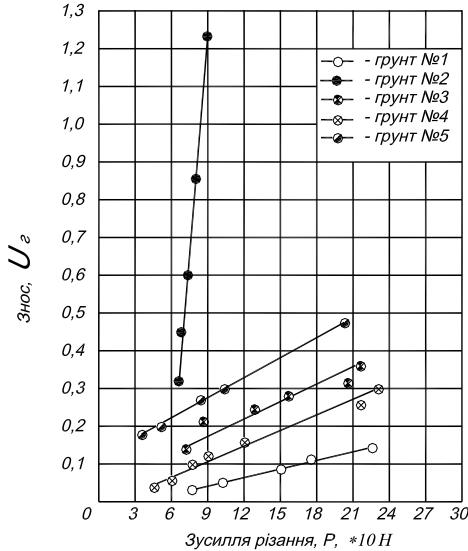


Рис. 8.6 Залежність вагового зносу зразків від зусилля різання ґрунтів

На рис. 8.6 видно, що значення (b) для різних ґрунтів відповідає тангенсові кута нахилу прямої.

І.С. Маяускас [33] також показав, що знос лемеша в ґрунті в залежності від зусилля різання збільшується пропорційно, підкоряючись законові прямої, і, що критерієм у цій залежності є тангенс кута нахилу прямих.

Таким чином, зі збільшенням вологості у визначених межах вплив ґрунту на знос ґрунторіжучих органів машин збільшується пропорційно зростанню зусилля різання.

Волога змінює не тільки властивості ґрунту, а і механічні властивості поверхні тертя металу. Під дією зусиль різання поверхневі шари металу деформуються, в результаті чого на поверхні тертя можлива поява мікротріщин.

Волога ґрунту, потрапляючи в ці мікротріщини, адсорбується на їхній поверхні, завдяки чому знижується поверхневий натяг і створюється додатковий тиск у мікротріщинах.

Адсорбційні шари створюють внутрішній, розклинюючий тиск у мікротріщинах, що сприяє концентрації напруг у їхніх вершинах, чим полегшується виникнення пластичних зрушень. Тиск адсорбційного шару еквівалентно збіль-

шенню зовнішнього зусилля, що може викликати руйнування металу.

Різде зменшення впливу ґрунту на знос органів машин після досягнення ним “верхньої” межі вологості можна пояснити тим, що надлишкова волога, що утвориться, зважує окремі агрегати, завдяки чому ґрунт приходить у консистентний стан. У даному випадку надлишкова волога створює на поверхні тертя метал-ґрунт шар мастильного матеріалу у вигляді плівки води, від чого зменшується: зусилля різання (див. рис. 9.5 для ґрунту №2); коефіцієнт тертя ковзання метал-ґрунт.

8.3 Вплив щільності та зв'язаності ґрунту на знос ґрунторіжучих органів машин

Залежність щільності ґрунтів від вологості при дослідженні їх у машині тертя КР-1 подана на рис. 8.7. Ця залежність виражається показовою функціональною залежністю, подібній (8.2).

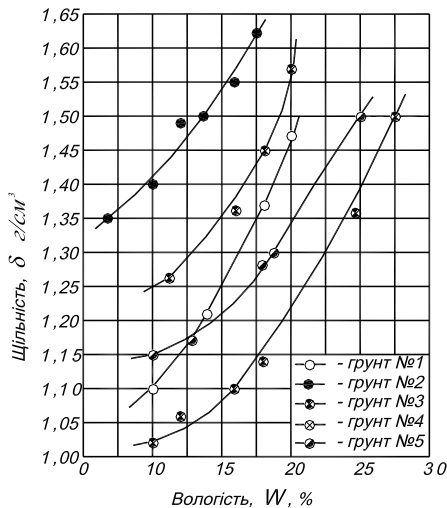


Рис. 8.7 Залежність щільності ґрунтів від вологості

Тім часом залежність вагового зносу зразків ґрунторіжучих органів сільськогосподарських машин від щільності ґрунтів підпорядковується лінійній залежності, подібній (8.3) (див. рис. 8.8). Вона характеризує наростання вагового зносу при зростанні щільності ґрунтів.

Щільність ґрунту визначає ступінь фіксації окремих твердих його часток. Чим вище щільність ґрунту, тим більш міцно закріплена тверда частка в м'якій основі, тим інтенсивніше вона зношує метал. Крім того, зі збільшенням щільності ґрунту зростає зусилля різання, що у свою чергу викликає збільшення зносу.

Зв'язність, як і щільність, великою мірою залежить від вологості ґрунту. Тому вплив зв'язності ґрунту на знос варто розглядати з урахуванням вологості.

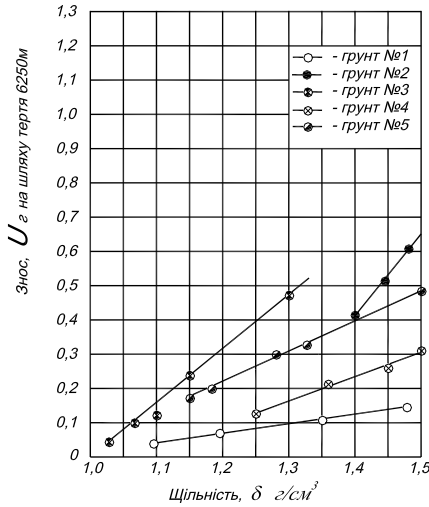


Рис. 8.8. Залежність вагового зносу зразків від щільності ґрунтів

Зі зменшенням вологості і збільшенням злежалості ґрунту зв'язність його зростатиме. На рис. 8.9 подана залежність зв'язності ґрунту, виражена тимчасовим опором на розрив (σ_e МПа), від вологості.

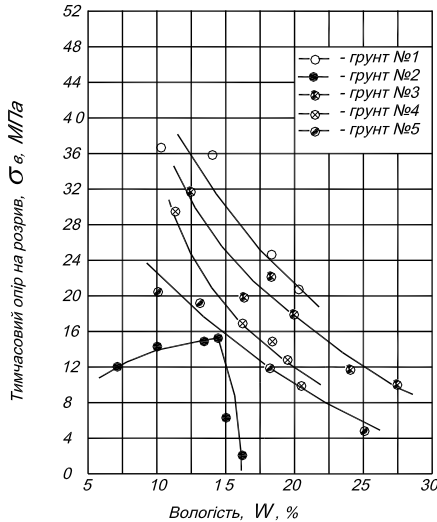


Рис. 8.9 Залежність зв'язності ґрунтів від вологості

Як видно з рис. 8.9, зі зменшенням вологості глинистих і суглинних (за механічним складом) ґрунтів зв'язність їх зростає. Пояснити це можна тим, що в цих ґрунтах утримується речовина у вигляді дрібних органічних часточок, а також у вигляді найтонших часточок глини (мулу).

Ця речовина зі зменшенням вологості ґрунту зв'язує окремі складові ґрунту між собою в єдине ціле. На руйнування такого ґрунту знадобиться велике зусилля. Зі збільшенням зусилля різання ґрунту збільшується і його вплив на знос.

Зв'язність же супіщаних або піщаних ґрунтів, у яких утримується дуже мало цементуючої (клеючої) речовини, зі зменшенням вологості збільшується лише до визначеної межі (на прикладі ґрунту №2, рис.8.9), після якого починає різко зменшуватися.

Це пояснюється тим, що в міру зменшення вологи в ґрунті окремі його частки наближаються і з великим зусиллям притягаються одна до одної за рахунок тонкого шару води на їхній поверхні. Подальше зменшення вологи призводить до порушення цих зв'язків, у результаті чого ґрунт перетворюється в сипучий ґрунт, що складається з окремих часток. На руйнування такого ґрунту, природно, потрібне невелике зусилля.

На підставі викладеного можна зробити висновок, що вплив ґрунтів на знос ґрунторіжучих органів сільськогосподарських машин знаходиться в прямій залежності від їх зв'язності і щільності.

8.4 Вплив мікроагрегатного складу ґрунту на знос органів машин

Структура ґрунту також має великий вплив на знос ґрунторіжучих органів сільськогосподарських машин.

Під структурою ґрунту розуміють його мікроагрегатну будову.

З рис. 8.10 видно, що встановити будь-яку залежність у досліджуваних групах агрегатів у даному випадку неможливо.

Однак структурні ґрунти менше зношують ріжучі органи, ніж безструктурні, не тільки внаслідок зменшення зусилля, затрачуваного на їх обробку, але і тому, що їх кварцові частки розміром, меншим за 0.25мм мають гострі грані, не беруть участь у різанні поверхні будівлі металу, тому що вони вкриті глинистими частками. Такі частки не можуть інтенсивно зношувати метал.

Порівняємо вплив на знос найбільш близьких (за механічним складом) ґрунтів. Це ґрунти № 1, 3 і 4.

На рис.8.11 представлені результати цього порівняння. Показано, що вплив на знос ґрунту № 4 майже в два рази більше ніж ґрунту № 1, хоча піщаних часток перша містить усього лише на 11,1 % більше другої.

Пояснити це можна тим, що в ємності поглинання ґрунту № 1 утримується 28, 23 мг-екв. іонів Ca^{++} і Mg^{++} і 3,22% гумусу (див. табл. 8.3 і рис. 8.11), тоді як у ґрунті № 4 іонів тільки 20,63 мг-екв. і 2,1% гумусу.

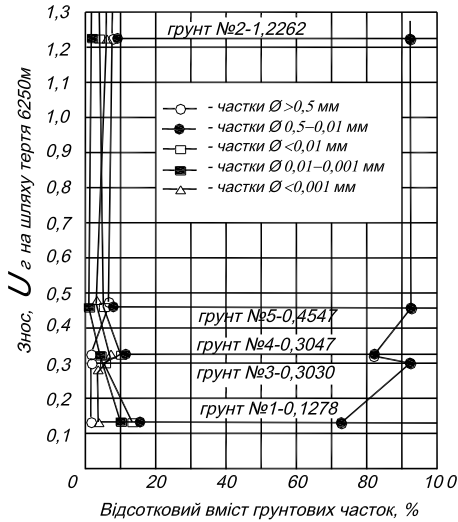


Рис. 8.10. Залежність зносу від змісту складових ґрунту

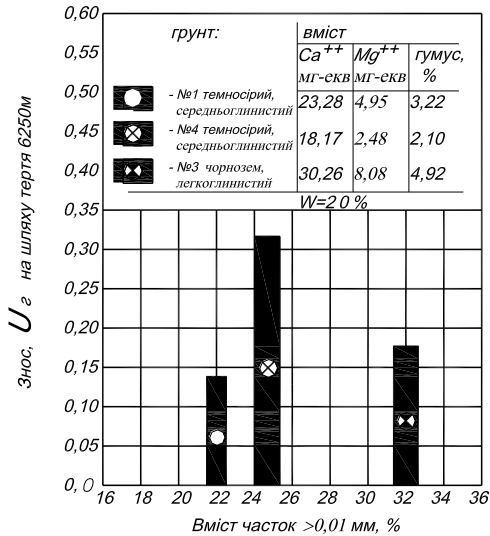


Рис. 8.11 Вплив на знос ґрунтів різної мікроагрегатної будови

Як відомо, наявність у ґрунті зазначених іонів і гумусу сприяє утворенню міцних мікроагрегатів. При недостатній кількості в ґрунті гумусу, (при оптимальній вологості) з'єднання що утворяться швидко руйнуються і кварцові частки, що оголилися, інтенсивно зношують ріжучий орган.

Ґрунт № 3 знаходиться в більш сприятливих умовах (у порівнянні з ґрунтами № 1 або 4) у частині утворення міцних маґроагрегатів (див. табл. 8.3 і рис. 8.11). У результаті вплив на знос його на 70% менше, ніж ґрунту № 4, хоча перший і містить більше піщаних часток.

З отриманих даних випливає, що вплив на знос структурних ґрунтів значно (на 70%) менше безструктурних.

Крім того, при незначному змісті в ємності поглинання ґрунту іонів Ca^{++} і Mg^{++} він має менш сприятливу структуру і при великому зволоженні переходить у консистентний стан, при якому його неможливо обробляти.

Так, ґрунт № 2 має ємність поглинання, рівну 13,97 мг-екв. (див. табл. 8.3), і «верхня» межа для нього відповідає 14% вологості (див. рис. 8.2). Ґрунти № 1 і № 4 мають невелику різницю в ємності поглинання – 30,53 і 26,39 мг-екв. відповідно і «верхня» межа (при якому ще можлива їхня обробка) для них – 20% вологості. Ґрунти №3 і № 5 мають ємність поглинання 38,59 і 35,54 мг-екв. відповідно і «верхня» межа – 27% вологості для ґрунту № 3 і 25% вологості для ґрунту № 5.

Ці дані добре узгоджується зі структурою ґрунту і його впливі на знос.

8.5 Тертя метал-ґрунт

При взаємодії металевої поверхні з ґрунтом коефіцієнт тертя визначається з рівняння:

$$\mu = \frac{F}{N},$$

де F – сила тертя, Н;

N – нормальне навантаження, Н

Відомо, що за інших рівних умов коефіцієнт тертя багато в чому залежить від чистоти поверхонь тертя. З поліпшенням якості поверхні (до визначеної межі) коефіцієнт тертя зменшується і між ними має місце пряма залежність.

При ґрунтовому зношуванні, коли відбувається тертя металу об сипуче тверде тіло – ґрунт, значну роль відіграє не тільки чистота поверхні, але і площа контакту тертьових тіл метал-ґрунт.

На рис. 8.12 наведена залежність коефіцієнта тертя ковзання метал-ґрунт (μ) від змісту в ґрунті часток «фізичної глини» (часток < 0,01 мм).

Як видно з рис. 8.12, чим більше площа контакту металу з ґрунтом (а вона збільшується з відносним зростанням у ґрунті часток < 0,01 мм), тим вище коефіцієнт тертя, причому залежність ця має лінійний характер і підкоряється законові прямої, що не проходить через початок координат.

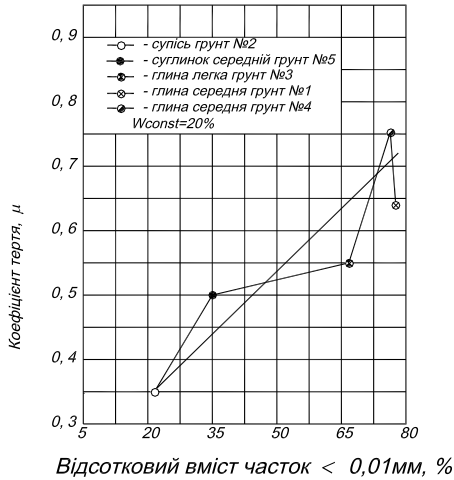


Рис. 8.12. Залежність коефіцієнта тертя ковзання метал-ґрунт від механічного складу ґрунту

Зі збільшенням вологості ґрунту коефіцієнт тертя метал-ґрунт також зростає. Ця залежність представлена на рис. 8.13. За своїм характером вона така ж, як і залежність між впливом на знос ґрунту і його вологістю, виражена рівнянням (8.2) (див. рис.8.2).

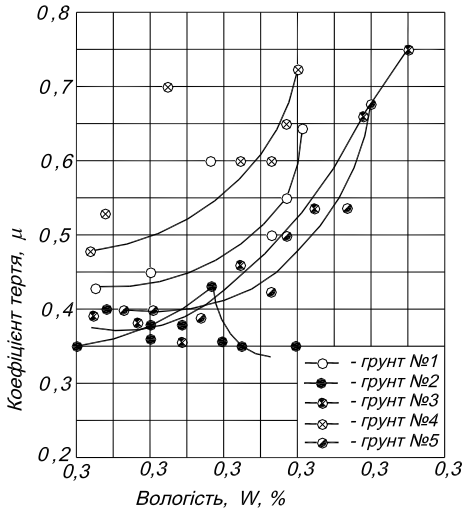


Рис. 8.13 Залежність коефіцієнта тертя ковзання метал-ґрунт від вологості ґрунту

Збільшення значення коефіцієнта тертя метал-грунт у даному випадку можна пояснити тим, що зі збільшенням вологості до визначеної межі (якою є в нашому випадку “верхня” межа) окремі частки її зближуються між собою, чим збільшують площу контакту та зростає роль адгезійної складової сили тертя. При подальшому зволоженні ґрунту коефіцієнт тертя метал-грунт буде зменшуватися через те, що створена при цьому надлишкова волога буде виконувати роль змащення в парі. Це добре ілюструє на рис.8.13 по ґрунті №2.

Природно, що зі збільшенням коефіцієнта тертя метал-грунт буде зростати зусилля різання ґрунту, а отже і знос металу.

На рис.8.14 надана залежність зусилля різання ґрунту від коефіцієнта тертя метал-грунт, що має лінійний характер.

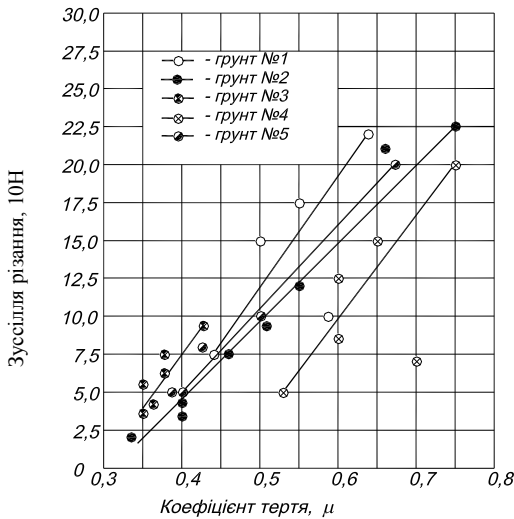


Рис.8.14 Залежність зусилля різання від коефіцієнта тертя ковзання метал-грунт

Зазначена залежність добре узгоджується з тим, що зі збільшенням зусилля різання ґрунту зростає знос зразків, підкоряючись при цьому лінійному закону (див. рис. 8.6).

На рис.8.15 надана залежність впливу на знос ґрунтів від коефіцієнта тертя метал-грунт, що має лінійний характер.

При розгляді тертя системі метал-грунт слід зазначити, що в самому загальному вигляді існує наступна залежність: чим більше в ґрунті великих твердих часток (супіщані і піщані ґрунти), тим менше коефіцієнт тертя метал-грунт і, навпаки, - чим більше в ґрунті дрібних (глинистих) часток, тим вище коефіцієнт тертя ковзання метал-грунт, що пов'язано з зростанням адгезії ґрунту до металу.

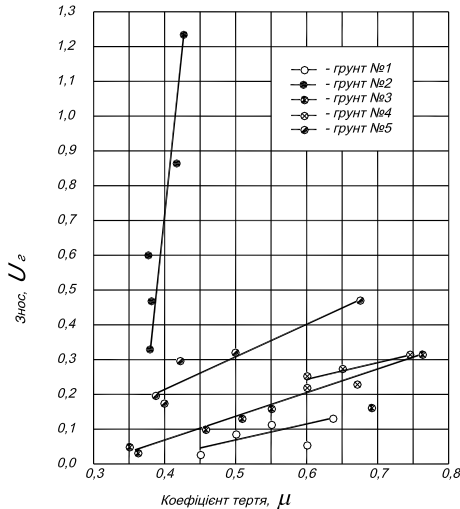


Рис.8.15 Залежність зношеної здатності ґрунтів від коефіцієнта тертя ковзання метал-ґрунт

8.6 Вплив форми, розміру і твердості піщаних часток ґрунту на знос органів машин

Раніше розглянуті залежності впливу вологості, щільності, зв'язності, структури ґрунтів на знос органів машин.

Дозволяють зробити висновок: чим більше в ґрунті піщаних часток усього сполучення і співвідношень фракцій механічного складу, тим вище знос органів машин.

Як впливає з рис.8.16, усі залежності характеризуються ламаними лініями і з підвищенням процентного вмісту кожної фракції вплив на знос ґрунту зменшується. Виключення складають фракції: 1,00-0,25 і 0,25 і 0,25-0,05мм, з підвищенням процентного вмісту їх у ґрунті вплив на знос зростає.

Видно (див. рис. 8.16), що залежність впливу на знос ґрунту від вмісту в ній фракцій розміром 1,00-0,25мм наближається до прямої.

Математично цю залежність можна виразити рівнянням:

$$U = a + bk, \tag{8.4}$$

де U - знос, м;

K - процентний вміст у ґрунті часток фракцій 1,00-0,25мм;

a і b - постійні коефіцієнти для даної групи ґрунтів, що підлягають визначенню.

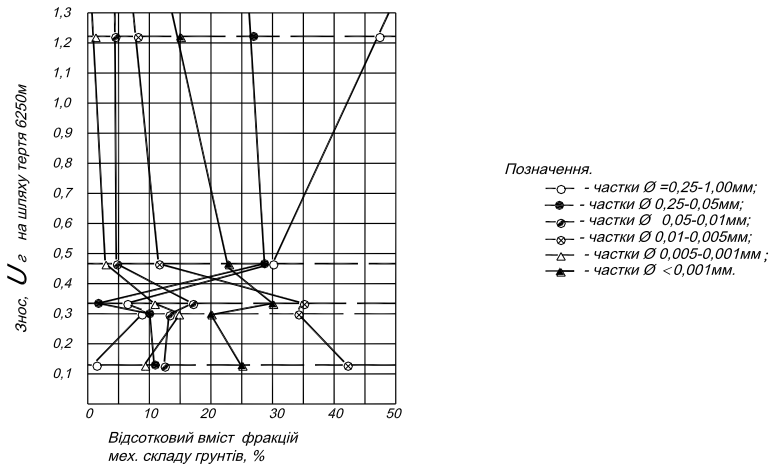


Рис. 8.16. Вплив на знос окремих фракцій механічного складу ґрунтів

Результати дослідів були методом найменших квадратів; знайдені значення постійних коефіцієнтів a і b для даної групи ґрунтів наступні: $a = 99,5$; $b = 25,38$.

Після підстановки значень a і b в рівняння (8.4) отримана емпірична формула для визначення зносу еталонних зразків різних груп ґрунтів. Оцінка зроблена в лабораторних умовах на машині тертя:

$$U_0 = 99,5 + 25,38k, \quad (8.5)$$

Для обчислення зносу зразків на машині тертя у формулу (8.5) замість (k) необхідно підставити процентний уміст часток фракцій 1,00-0,25мм, що утримуються в ґрунті.

Результати визначення зносу зразків дослідним і аналітичним шляхами представлені в табл. 8.4.

Таблиця 8.4 - Результати оцінки зносу

Спосіб визначення зносу	Знос зразків у з на шляху тертя 6250 м у ґрунтах				
	№1	№2	№3	№4	№5
Експериментальний	0,1278	1,2262	0,3030	0,3050	0,4548
Аналітичний	0,1277	1,2256	0,3148	0,2456	0,8184

Отримані двома методами оцінки результати добре співставленні між собою.

Невідповідність спостерігається лише для ґрунту №5. У цьому випадку величина зносу зразків, визначена аналітичним шляхом, у 1,8 рази більше, ніж оцінена експериментально. Пояснити це можна тим, що при фракції 1,00-0,25мм ґрунту №5 утримується 30% часток вапнякового походження (див. дані табл.8.1).

На рис.8.17, де представлені частки фракції 1,00-0,25мм ґрунту №5, видно наявність черепашкового вапняку серед кварцових часток. Такі частки зовсім не мають ріжучих властивостей через їх низьку твердість, що знаходиться в межах 200 НВ і за рідкісним винятком досягає 400 НВ.

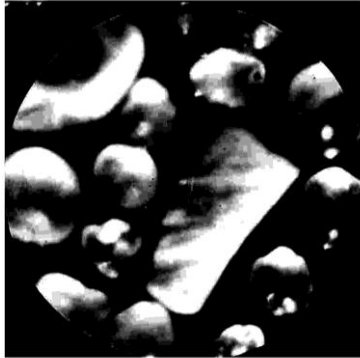


Рис. 8.17 Частки фракції 1,00-0,25мм ґрунту №5 (x40)

У роботах М.М. Хрущева і М.О. Бабічева [53] показано, що інтенсивно зношують метал мінерали, твердість яких перевершує твердість металу. Такими мінералами ґрунту є кварц, польовий шпат. Твердість кварцових часток на приладі ПМТ-3 склала H_{50} -1000-1100МПа.

Якщо з процентного вмісту часток фракції 1,00-0,25 мм ґрунту №5 відняти процентний уміст часток черепашкового вапняку й отримане значення підставити у формулу (8.5), то зазначена різниця (див. табл.8.4) значно зменшиться.

На рис. 8.18 наведені результати визначення зносу еталонних зразків з урахуванням викладеного. У даному випадку різниця між значеннями зносу, визначеними різними способами, зменшилася більш ніж у 5 разів.

Різницю, що залишилася, можна звести до мінімуму або навіть до нуля, якщо врахувати, що кварцові частки фракції 1,00-0,25 мм у ґрунті №5 округлені більш, ніж в інших ґрунтах (див. рис. 8.18 і дані табл. 8.2).

До подібної залежності (8.5) прийшов і ґрунтознавець О.О. Батурін при вивченні зносу лемешів на ґрунтах Саратовської області, з тією лише різницею, що в цих роботах розрахунковою була фракція 0,25-0,01 мм.

Пояснити це явище можна або розходженням у геологічній природі ґрунтів географічних районів України і Саратовської області, або різним ступенем структурності ґрунтів зазначених областей (що найбільше ймовірно), або зовсім різним співвідношенням фракцій механічного складу цих ґрунтів.

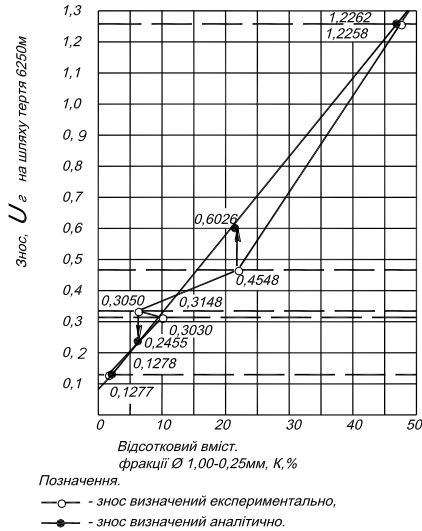


Рис. 8.18 Залежність зносу від частки фракцій

На основі результатів дослідів, близьких до реальних (польових) умов, встановлено, що питомий знос стандартних лемешів до першого ремонту при їх експлуатації на ґрунтах Лісостепу України, у залежності від процентного вмісту в цих ґрунтах кварцових часток істотно змінюється (рис. 8.19).

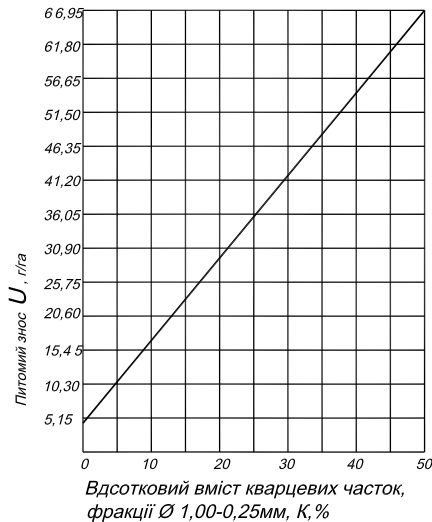


Рис. 8.19 Залежність питомого зносу лемешів від змісту в ґрунтах Лісостепу України кварцових часток (фракції 1,00±0,25 мм)

Знос лемешів може бути зростати у випадку обробки зазначених ґрунтів зниженої вологості і великої щільності або зменшуватись у випадку обробки їх при оптимальній вологості і малій щільності ґрунту. Тому дані питомого вагового зносу лемешів, визначені за допомогою залежності (рис. 8.19), необхідно вважати деякими усередненими, біля яких будуть коливатися дійсні значення питомого зносу лемешів протягом усього періоду оранки цих ґрунтів.

З огляду на механічний склад ґрунтів за допомогою залежності (див. рис. 8.19), легко визначити середній питомий знос лемешів при роботі на кожному з них. На підставі даних про питомий знос можна розрахувати необхідну кількість лемешів для виконання визначеного обсягу оранки в господарстві, з урахуванням того що при повному зносі леміш утрачає при обробці глинистих ґрунтів 1,3-1,7 кг (чим більше в ґрунті глинистих часток, тим менше втрачає леміш у вазі при повному зносі і навпаки), а при обробці піщаних – у середньому 2,0 кг ваги.

Середній питомий знос лемешів на цих ґрунтах можна визначити й аналітичним шляхом. Для цього у формулу (9.5) необхідно внести поправочний коефіцієнт, що враховує переходу від лабораторних досліджень зразків до польових умов зносу лемешів.

Величина цього коефіцієнта знайдена аналітичним і дослідним шляхами і дорівнює 0,0515. Після підстановки його у формулу (8.5) вона прийме наступний вид:

$$U_d = 0,0515(99,5 + 24,38k) \varepsilon / \varepsilon a, \quad (8.6)$$

де U_d - середній питомий ваговий знос лемеша (г/га);

k - те ж, що й у формулі (8.5).

При цьому залежність (8.6) дійсна тільки для випадку зносу стандартних лемешів до першого ремонту.

Спостереженнями за зносом у польових умовах встановлено, що лемеша в більшості випадків при першому, а також і наступних ремонтах не гартуються, а лише відтягаються і заточуються. Відремонтовані в такий спосіб лемеша мають термін служби в 1,5-3 рази менший, ніж нові. Тому, якщо відремонтовані лемеші не будуть відповідати за властивостями новим, то їх знос, отриманий аналітичним шляхом за формулою (8.6), повинен бути збільшений в 2 рази.

Характер зносу леза зразків на різних ґрунтах також залежить від їхнього механічного складу.

На рис. 8.20 представлений характер зміни геометрії леза зразків після зносу при випробуванні в умовах порівняно високої вологості і невеликої щільності досліджуваних ґрунтів ($w = 18-28\%$; $\delta = 1,2-1,4 \text{ г/см}^3$).

Дана картина зносу отримана шляхом суміщення профілю зразка до і після випробування за допомогою епідіаскопа.

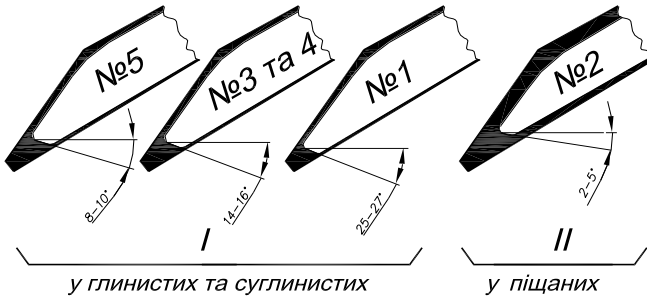


Рис. 8.20. Характер зносу леза зразків на різних ґрунтах

За цією ознакою досліджувані ґрунти варто розділити на 2 групи: а) глинисті і суглинні ґрунти, що містять до 30% часток $> 0,01$ мм; б) піщані і супіщані ґрунти, що містять цих часток більш 80%.

На ґрунтах першої групи знос зразків переважає в основному по лезу, утворити фаску з негативним кутом 8^0-27^0 (причому чим більше в ґрунті глинистих часток, тим більша величина цього кута (див. рис.9.20).

На ґрунтах другої групи знос має місце як на робочій поверхні зразків, так і на лезі з явищем самозагострювання.

При обробці зв'язаних ґрунтів (у даному випадку ґрунтів №1, 3, 4, 5) зниженій вологості і великій щільності характер затуплення леза не змінюється; зменшується лише величина негативного кута.

Відомо, що характер зносу леза в кожному окремому випадку залежить від характеру руху часток при різанні ґрунту, а також – від його стану (механічного складу, вологості і щільності).

Різний характер зносу леза лемешів на різних ґрунтах пояснюється, насамперед, різними фізичними властивостями цих ґрунтів. З механіки ґрунтів відомо, що піщані ґрунти не мають пластичності, тоді як вона властива глинистим.

На рис. 8.21 надана схема характеру руху часток різних ґрунтів при переміщенні в них клина.

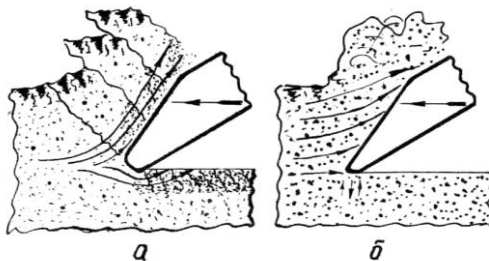


Рис. 8.21 Характер руху часток ґрунту: а) глинистого і суглинного; б) супіщаного і піщаного

При русі клина в зв'язаних ґрунтах (див. рис. 8.21а) інтенсивно зношується нижня грань його з утворенням негативної затиловочної фаски внаслідок значної напруженості нижнього ґрунтового шару. Цей шар утворюється від удавлення часток потоком обтікання нижньої крайки ріжучого органа. У піщаних ґрунтах струмінь, що обтікає, не викликає напруженого стану нижнього шару тому, що піщані частки мають велику рухливість і швидко ущільнюються до граничного стану (див. рис.8.21,б).

8.7 Польові випробування лемешів плуга

Для перевірки теоретичних передумов і результатів лабораторних досліджень з визначення впливу на знос ґрунтів були проведені контрольні польові дослідження. Їх проводили в період зяблевої оранки на тих же ґрунтах, зразки яких досліджувалися на зношувану здатність у лабораторних умовах. Лемеша встановлювали на справні тракторні плуги. Усього було випробувано 75 лемешів.

Характеристика механічного складу ґрунтів, на яких проводили контрольні дослідження, наведені в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 - Механічний склад ґрунтів, на яких проводили польові випробування

№ ґрунту	% фракцій на 100 м абсолютно сухого ґрунту					
	1,00-0,25 мм	0,26-0,05 мм	0,06-0,01 мм	0,02-0,005 мм	0,006-0,001 мм	менш 0,001 мм
1	1,20	10,39	11,00	41,34	10,19	24,38
2	45,98	26,95	5,47	6,42	3,15	12,03
3	9,05	9,45	13,95	35,04	13,95	18,56
4	6,10	1,75	16,73	34,97	11,35	29,10
5	21,12	33,15	11,24	10,96	3,54	21,99

За механічним складом ґрунти, досліджені в польових умовах, нічим не відрізняються від прийнятих у лабораторних умовах (випробування проводилися на машині КР-1). Вологість і щільність ґрунтів за час проведення польових досліджень змінювалися в широких межах (табл. 8.6).

Таблиця 8.6 - Вологість і щільність ґрунтів у період випробувань

Показники	Ґрунт				
	№1	№2	№3	№4	№5
Вологість (w , %)	7,5-23,0	4,5-17,0	7,8-28,5	8,1-23,0	7,3-27,2
Щільність ($\delta, \text{г/см}^3$)	1,8-1,2	1,6-1,3	1,8-1,2	1,8-1,3	1,75-1,2

Покриття ґрунтів були найрізноманітнішими – стерня скошеної пшениці,

жита, прибрані культури картопля, кукурудза й ін.

Попередньо відібрані лемехи ретельно очищалися від пилу і бруду, перевірялися на твердість, потім маркірували, зважувалися й обмірялися.

Всі лемехи були розбиті на 5 комплектів (А, Б, У, Г и Д – по 15 штук), кожний з яких випробувався на визначеному ґрунті (А - №1; Б - №2; У - №3; Г - №4; Д - №5). З трьох лемешів кожного комплекту виготовляли відбитки лез у м'якому сплаві Бб.

Вплив на знос ґрунтів визначалася за зношенням лемешів до першого ремонту, за яким визначається затуплення лемешів, що обумовлює підвищення питомого опору (на 20-30%) і погіршення якості оранки.

Результати контрольних випробувань на зношення, за зміною ваги лемешів при обробці ними різних ґрунтів у залежності від вологості, щільності і механічного складу наведені в табл. 8.7 і на рис. 8.22.

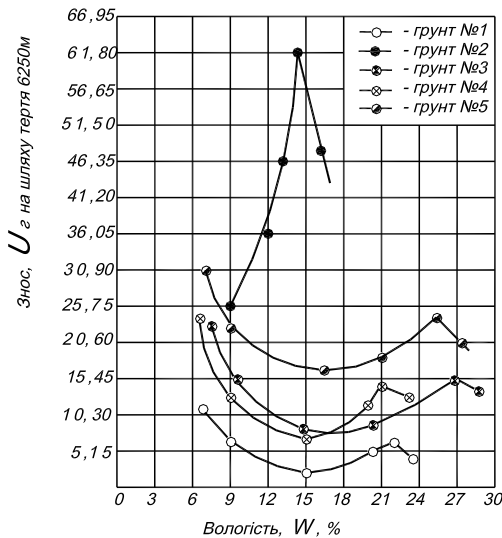


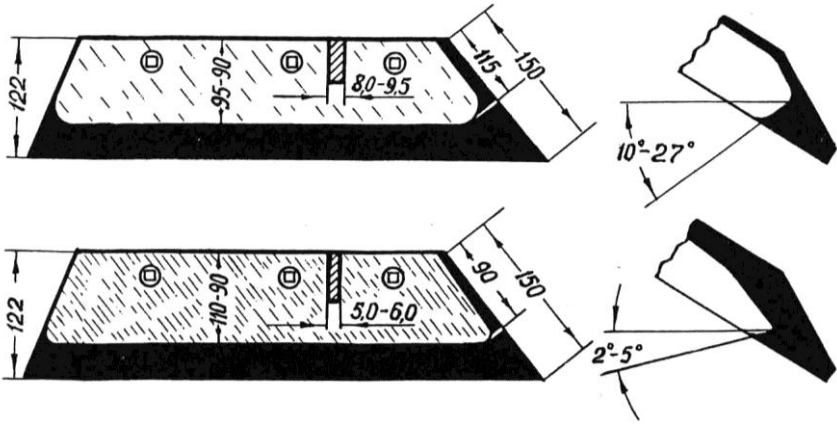
Рис. 8.22. Залежність зношеної здатності ґрунтів від вологості (за даними польових випробувань)

Надалі лемехи експлуатували без проміжного контролю до повного зносу (з контролем утрати ваги наприкінці). Ці дослідження дозволили визначити характер зносу лемешів на різних ґрунтах, а також установити критерій вибракування (ваговий).

На рис. 8.23 представлений характер зміни елементів геометрії лемешів у результаті їхнього повного зносу.

У табл. 8.8 наведені значення негативного кута фаски затуплення лез лемешів, отримані при обробці ґрунтів у різному стані.

На грунтах I групи



На грунтах II групи

Рис. 8.23 Характер зносу лемешів на різних грунтах Лісостепу України

Таблиця 8.8 - Значення негативного кута леза лемешів при обробці ґрунтів

На ґрунті №1

$w = 9,0\%$	$w = 15,0\%$	$w = 22,0\%$	$w = 7,5\%$
$\delta = 1,5 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,35 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,4 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,8 \text{ г/см}^3$
19^0-21^0	22^0-24^0	25^0-27^0	17^0-19^0

На ґрунті №3 і №4

$w = 7,8\%$	$w = 9,2\%$	$w = 15,1\%$	$w = 20,0\%$
$\delta = 1,8 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,4 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,32 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,3 \text{ г/см}^3$
8^0-9^0	12^0-13^0	14^0-16^0	14^0-15^0

На ґрунті №5

$w = 7,5\%$	$w = 9,3\%$	$w = 16,2\%$	$w = 25,3\%$
$\delta = 1,75 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,42 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,25 \text{ г/см}^3$	$\delta = 1,38 \text{ г/см}^3$
5^0-6^0	5^0-7^0	8^0-10^0	8^0-10^0

Структури поверхні тертя зразків до і після зношування представлені на рис. 8.24.

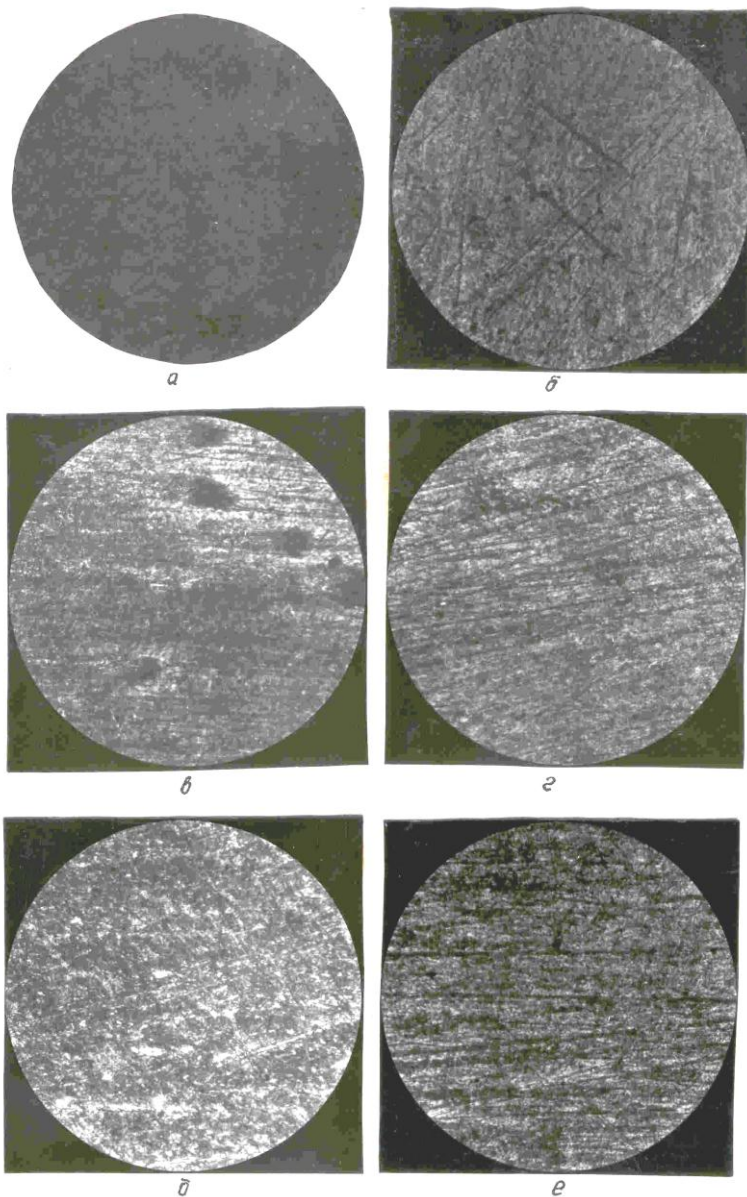


Рис. 8.24 Структура поверхні тертя зразків (x440) до і після зношування: а) вихідна; б) ґрунт №1№ в) ґрунт №2; г) ґрунт №3; д) ґрунт №4; е) ґрунт №5

При повному зносі кожен леміш утрачав: на ґрунтах першої першої групи від 1,3 до 1,7 кг, а на ґрунтах другий – у середньому 2,0 кг ваги.

На підставі результатів контрольних польових випробувань можна зробити наступні висновки:

1. Визначальним при впливу на знос ґрунту є механічний його склад. Чим більше в ґрунті кварцових часток, тим більше він зношує леміш.

2. Вплив на знос ґрунту одного й того ж самого механічного складу залежить від його вологості і щільності. В усіх випадках підвищення щільності ґрунту призводить до збільшення його впливу на знос.

3. Характер зносу робочої поверхні і леза лемешів залежить від механічного складу ґрунту.

При ґрунтовому зношуванні виявляється три види руйнування поверхні тертя.

Перший вид руйнування – “чисте” зношування шкрябання (або різання) поверхні металу – поданий на рис. 8.25,а. Лінія руху кварцової частки в даному випадку нагадує слід різця по поверхні різання, - вона рівна і чітка. Таке “різання” металу може бути у випадку гарної фіксації кварцових часток у масі ґрунту (механічна складова).

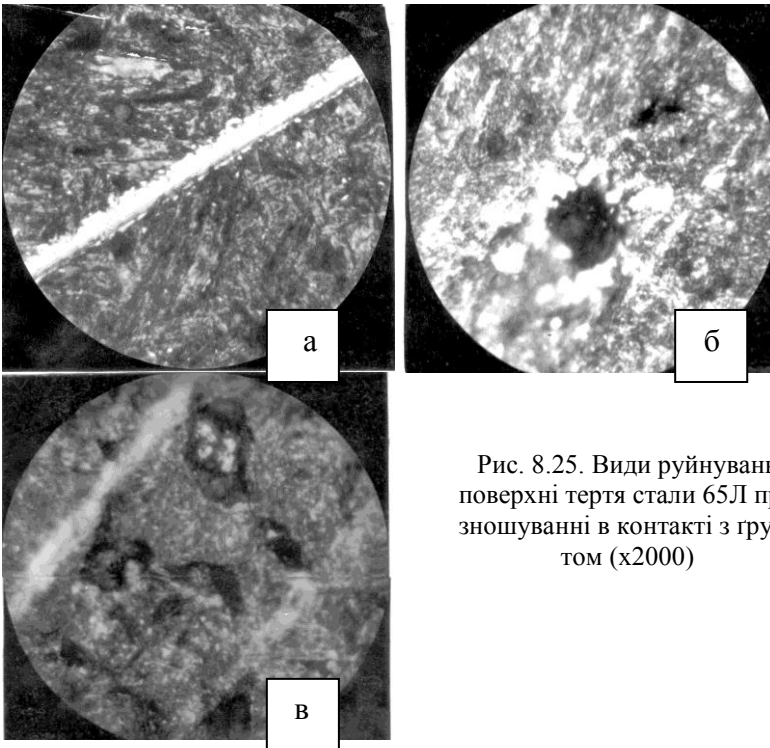


Рис. 8.25. Види руйнувань поверхні тертя сталі 65Л при зношуванні в контактi з ґрунтом (x2000)

Другий вид руйнування – шаржування поверхні тертя металу кварцовими

частками – поданий на рис. 8.25,б. Кварцові частки в даному випадку як би врізаються всередину, утворюючи навколо лунки напливи витиснутого металу. Надалі ця частка під дією інших витісняється з лунки, а утворений нею наплив зрізується або знімається вслід частками, що рухаються. Таке явище спостерігається у випадку слабкої фіксації кварцових часток у масі ґрунту, коли можливо їхнє відносне переміщення з великим ступенем свободи.

Наплив, що утворився навколо лунки або уздовж подряпини, має білий колір (див. рис. 8.25,б), хоча поверхня зразка була протравлена. Дослідження показало, що за своєю природою їх можна віднести до білого, що не травиться шару, який утворюється в результаті тертя і зносу (механічна складова).

Такий білий шар названий аустенітом тертя. Як видно з рис.9.26,б, білий шар має тріщини, що утворилися в результаті інтенсивного охолодження деформованого металу, чому в даному випадку сприяла волога ґрунту.

На рис. 8.25,в поданий третій вид руйнування – зняття з поверхні тертя металу, що спостерігається у випадку обробки важких глинистих ґрунтів. При цьому на поверхні тертя розвиваються високі питомі тиски, що призводять до порушення молекулярних зв'язків у поверхневому шарі, у результаті чого він відокремлюється від основної маси металу. Відбувається як би шелушення поверхні тертя, причому в даному випадку на початку руйнуються більш м'які складові структури, оголюючи при цьому карбіди, а потім і вони руйнуються під дією постійно виникаючих дотичних зусиль (адгезійна складова).

При зношуванні в умовах взаємодії з ґрунтовим середовищем прояв одного з трьох видів руйнування поверхні тертя металу в чистому вигляді мало ймовірно. Усі види, очевидно, протікають одночасно з перевагою одного з них у залежності від механічного складу і стану ґрунту.

На рис.8.26 наведені інтерферограми поверхні еталонних зразків до і після випробування на знос на різних ґрунтах. До зносу шорсткість поверхні тертя зразків відповідала Ra 0,16, а після зносу -Ra 0,08 на супіщаному ґрунті і Rz 0,1- Rz 0,05 на інших ґрунтах.

Як за характером руйнування поверхні тертя зразків, так і за зміною її шорсткості, досліджені ґрунти можна розділити на дві групи.

У першу групу входять глинисті і суглинні (за механічним складом) ґрунти, у другу – супіщані і піщані.

На ґрунтах першої групи зношування поверхні тертя металу відбувається з перевагою третього виду руйнування за рахунок адгезійної складовий.

На ґрунтах другої групи зношування поверхні тертя металу відбувається з перевагою першого виду руйнування, у результаті чого чистота поверхні в порівнянні з вихідної поліпшується досить незначно (механічна складова).

На рис.8.27 подана структура (а) і шорсткість (б) поверхні тертя лемеша зношеного на глинистому ґрунті (ґрунт №4), що нічим не відрізняються від показників при лабораторних випробуваннях.

Таким чином, розглядаючи картину зношування лемешів, можна припустити, що основну роль у визначенні впливу на знос ґрунту відіграють тверді

частки, що можуть здійснювати:

- а) різання поверхні;
- б) змінання поверхні тертя;

в) зрушення оксидних і адсорбованих плівок з поверхні тертя, що можуть виникнути під дією вологи ґрунту, кислот та інших факторів.

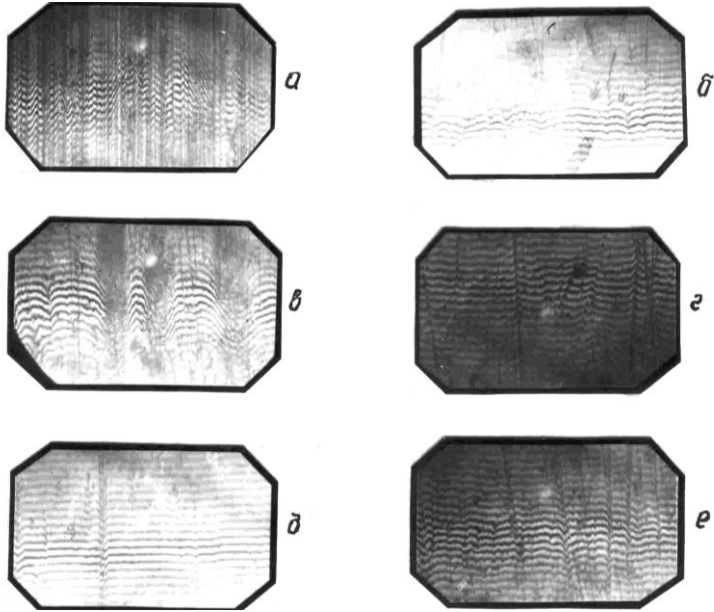


Рис. 8.26 Інтерферограми поверхні тертя зразків (х 440) до і після зношування а) вихідна; б) ґрунт №1 в) ґрунт №2; г) ґрунт №3; д) ґрунт №4; е) ґрунт №5

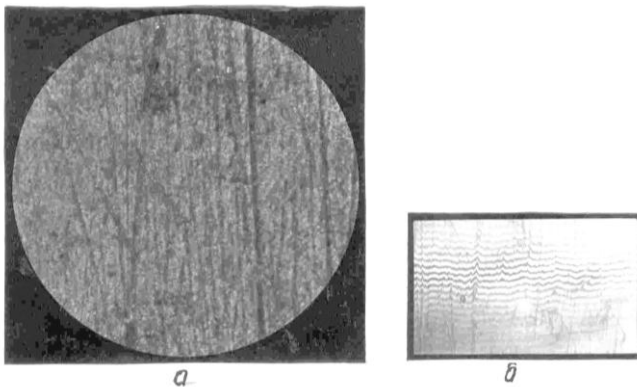


Рис. 8.27 Структура (а) і шорсткість (б) поверхні тертя лемеша, що працював на ґрунтах I групи

8.8 Рентгенографічні дослідження матеріалу лемеша плуга

Дослідженнями ставилася задача вивчення сталі 65Л, зношеної на різних грунтах. При цьому досліджували глибину пластичної деформації, її інтенсивність і наявність фазових перетворень у поверхневому шарі.

Випробуванню піддавали термооброблені еталонні зразки (загартовані з наступною відпусткою до твердості 56-58 HRC) і не термооброблені зразки після випробувань на знос як тих, так і інших на різних грунтах.

На рис.8.28 подані рентгенограми термооброблених і «сирих» зразків, зношених на різних грунтах, з яких виявляється, що має місце значне розмиття ліній, яке свідчить про наявність напруг II роду і подрібнювання кристалітів.

Рівноважний стан структури сталі 65Л звичайно не показує настільки значного розмиття ліній на рентгенограмах.

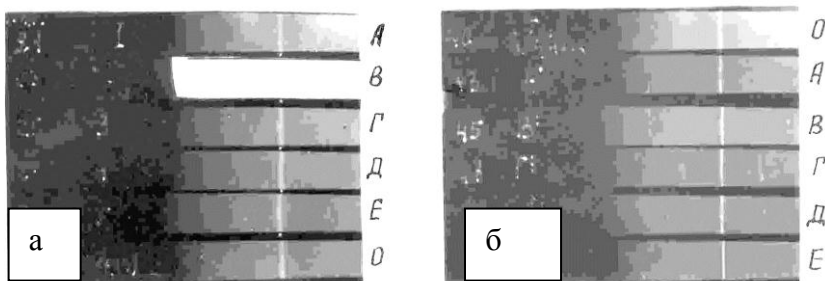


Рис. 8.28. Рентгенограми термооброблених (а) і «сирих» (б) зразків, зношених на: О - термооброблений і не піддавався випробуванням на знос; А- грунті №1; В - грунті №2; Г- грунті №3; Д - грунті №4; Е - грунті №5

На рис. 8.28 також можна бачити, що ступінь розмиття ліній на окремих рентгенограмах неоднаковий. Це свідчить про різну величину напруг II роду, що виникають у зразках після випробувань їх на знос в умовах різних грунтів.

Таким чином, виникає необхідність визначення напруг II роду різних зразків, зношених у різних ґрунтових середовищах.

Для визначення напруг II роду, що виникли в поверхневих шарах зразків, зношених на різних грунтах, зняті з них рентгенограми фотометризувалися на мікрофотометрі. Шлях тертя еталонних зразків був прийнятий рівним 1250 м. Результати цих досліджень представлені в табл. 8.9.

Таблиця 8.9 - Величина напруг II роду σ , МПа у поверхневому шарі зразків, зношених на різних грунтах *)

Ґрунт	№1	№2	№3	№4	№5
Напруги II роду	430	630	470	443	525

*)Напруги II роду: «сирого» зразка $\sigma=345,8$ МПа; термообробленого $\sigma=400$ МПа

Таким чином, напругу II роду, що виникає в поверхневому шарі зразків, зношених в умовах випробувань на різних ґрунтах, можна розташувати в такій послідовності: найменше – при зносі на ґрунті №1, більше – на ґрунті №3, потім на ґрунті №4, на ґрунті №5 і, нарешті, на ґрунті №2.

За даними цього експерименту побудована залежність інтенсивності протікання пластичної деформації в сталі 65Л від ґрунтового середовища (рис.8.29). На цьому графіку по осі абсцис відкладений процентний вміст у ґрунті кварцових часток фракцій 1,00 – 0,25.

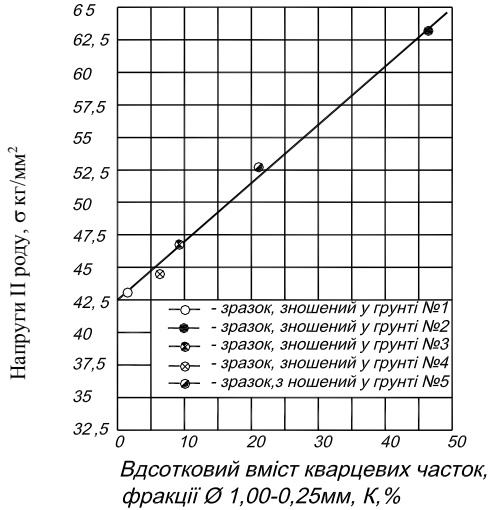


Рис. 8.29 Зміна пластичної деформації при зношуванні її на різних ґрунтах

Чим більше напруга другого роду, що виникає як наслідок пластичної деформації в поверхневому шарі зразка (лемеша), тим більше його знос, тому що знаходячись у напруженому стані, поверхневий шар металу, який бере участь у терті, швидко руйнується від прикладення зовнішньої сили, що впливає безупинно.

У даному випадку механічний склад ґрунту (а саме зміст кварцових часток фракцій 1,00 – 0,25 мм) визначає величину напруг у поверхневому шарі металу, а отже, його знос, що підтверджує раніше встановлену залежність (рис. 8.19).

Визначати напруги другого роду в зношених на різних ґрунтах зразках, що не пройшли термічної обробки, важко через їхню грубозернисту структуру, при якій лінії на рентгенограмі стають не суцільними (див. рис. 8.28,б). Розмір кристалитів у даному випадку досягає величини порядку 10 мкм.

Глибина проникнення пластичної деформації всередину зразків, зношених на різних ґрунтах, визначалася рентгенографічним методом і на приладі ПМТ–3.

Результати досліджень відбиті на табл. 8.10.

³⁾ Як еталон прийнятий «сирий» (нетермооброблений) і незношений зразок.

Таблиця 8.10 - Величина напруг II рід (σ , МПа) і твердості (H_v , МПа) у різних шарах поверхні тертя сталі 65Л при ґрунтовому зношуванні

Глибина від поверхні тертя (h мкм)	Напруги II роду	Твердість
На поверхні тертя (0,0)	625	65,0
20,0	400	66,0
60,0	370	64,0
80,0	350	63,0

Аналіз цих даних (табл. 8.10) дозволяє зробити висновок, що у випадку зношування в умовах взаємодії з ґрунтом сталі 65Л пластично деформується поверхневий шар лемеша на глибину 0,025-0,040мм.

8.9. Фазові перетворення в поверхневому шарі сталі 65Л в умовах взаємодії з ґрунтом

Для виявлення фізичної сутності перетворень у поверхневому шарі металу, що беруть участь у терті, робили кількісний фазовий аналіз. Результати цього аналізу потім перевіряли магнітним методом.

Як видно на рис.8.30 (при порівнянні "а" з іншими – б, в, г, д, е), у термообробленому незношеному зразку присутні дві фази – α – фаза з кубічними центрованими ґратами в стані мартенситу і – γ з кубічною граноцентованою решіткою – аустеніт. У зазначеному зразку (незношеному і термообробленому) присутні близько 10% залишкового аустеніту.

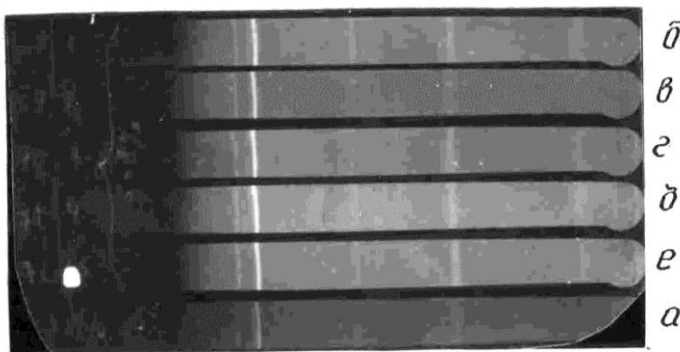


Рис. 8.30. Рентгенограма термооброблених зразків: а - незношеного; б – зношеного при ґрунті №1; у - ґрунті №2; м - ґрунті №3; д - ґрунті №4; е- ґрунті №5

У результаті зношування при впливі на сталь абразивних часток у поверхневому шарі виникають напруги, що сприяють перетворенню залишкового

аустеніту в мартенсит.

Кількість залишкового аустеніту в поверхневому шарі в результаті зносу зменшилося до 5-6%, причому ця величина не залежить від середовища випробувань. Практично можна вважати (оскільки різниця не уловлюється), що середовище, тобто ґрунт, на фазові перетворення в метали впливає у всіх випадках однаково. При порівнянні поверхневого шару і серцевини кількість залишкового аустеніту знову досягало, як і в незношеному зразку, приблизно 10%.

За результатами рентгенографічних досліджень, можна зробити наступні висновки:

1. Під впливом процесів тертя в поверхневому слою сталі 65Л при її ґрунтовому зношуванні залишковий аустеніт частково (з 10 до 5-6%) перетворюється в мартенсит.

2. Глибина проникнення пластичної деформації не залежить від типу ґрунтового середовища і коливається в межах 0,020-0,040 мм. Ґрунтове середовище не впливає і на характер фазових перетворень при випробуваннях на знос у поверхневому шарі сталі.

3. Чим більше в ґрунті кварцових часток, тим інтенсивний протікає пластичне деформування поверхневого шару сталі 65Л і його знос.

8.10 Вибір матеріалу для лемешів плуга

Аналізуючи процеси, що відбуваються в поверхневому шарі сталі при зношуванні в умовах взаємодії з ґрунтом, можна зробити висновок, що для підвищення зносостійкості лемешів матеріал для їхнього виготовлення повинний задовольняти вимогам з твердості і в'язкості. Ці характеристики повинні бути більш високими.

Ці вимоги продиктовані тим, що матеріал з такими властивостями буде добре опиратися: пластичному деформуванню, якому його піддають при експлуатації, і відділенню стружки з поверхні тертя кварцовими частками ґрунту. Крім того, такий матеріал добре буде працювати на вигин.

Лемеша вітчизняних плугів звичайно виготовляються з середньо - і високовуглецевих сталей, твердість яких в загартованому стані складає HRC55-60, що відповідає приблизно HV6,0-8,0 (стали 40Г, 45, 65М, 70М, Л53, Л65, 65Г).

Основними напрямками по підвищенню довговічності і зносостійкості лемешів є:

- термічна обробка лемеша гарячим вальцюванням;
- зміцнення леза методом наплавлення твердих матеріалів;
- розробка біметалічних матеріалів.

Найбільше розповсюдження отримали методи наплавлення твердих сплавів:

- газове наплавлення литими прутками ПР-С1 (тип металу У30Х28Н4С3, що наплавляється), ПР-С2 (У20Х12Н2), ПР-С27

(У45Х28Н2ВМ);

- дугове наплавлення електродами НЦ-29, Т-590, Т-620, ЕН-ИТС-01;
- наплавлення порошковими проволоками ПП-АН-105, ПП-АН-123, ПП-АН-125, ПП-АН-135, ПП-АН-192, ПП-АН-198 і порошковою стрічкою ЛС-У10Х7ГР;
- точкове наплавлення порошковим дротом ПП-Нп-80Х20Р35-Н-С-3,2;
- наплавлення на мороженні сплаву ФБХ-6-2;
- індукційне наплавлення сплавів типу «Сормайт», ПГ-С-ВУС-25, ФБХ-6-2;
- плазмове наплавлення сплаву ФБХ-6-2.

Слід звернути увагу на те, що наплавлення твердих сплавів на лезо лемеша припускає збереження ріжучих властивостей за рахунок створення умов самозаточування. Це явище для певних умов роботи заданого профілю леза лемеша можливо тільки в певному стані твердості шарів. У лемеша плуга це співвідношення лежить в межах НВ1/НВ2=2,6-2,9 у випадку, якщо співвідношення твердості менше оптимального значення, відбувається затуплення леза. Коли співвідношення твердості більше оптимального значення, відбувається надмірне загострення леза, в результаті зменшується кут заточування, що приводить до обломлення кінчика леза. Твердість наплавлених твердих сплавів звичайно знаходиться в межах HRC50-66, а ресурс напавленого лемеша в 1,3-3,0 рази більше виготовлених без наплавлень, що зміцнюють.

Останніми роками в нашій країні і за кордоном для підвищення зносостійкості лемешів плугів сталі застосовувати кераміку. При цьому застосування кераміки як зносостійкий матеріал стримувалося в основному вартістю пластин і недоліками методів кріплення їх на поверхні лемеша. В даний час відношення до кераміки дещо змінилося через розробку нових зносостійких матеріалів з високими фізико - механічними властивостями і низькими вартісними характеристиками що привело до широкого застосування наступних конструкційних керамічних матеріалів: карбідів і нітридів бору, карбідів вольтфраму, карбідів і нітридів кремнію, діоксиду цирконію і оксиду алюмінію.

Методи кріплення керамічних пластин на поверхні лемеша розвивалися в двох напрямках - клейові з'єднання і паяння.

Зміцнення лемешів здійснювалося за технологією склеювання в системі оксид алюмінію - сталь високоміцними клеями. При цьому приклеювалася корундова кераміка на основі матеріалу НТК (низькотемпературна кераміка, шихта якої складається з промислового глинозему марки ГН-1 і високодисперсної добавки титана марганцю). Розміри приклеєних керамічних пластин 35х25х2,5мм. Випробування лемешів з приклеєними пластинами проводилися на суглинних, суглинок - супіщаних і чорноземних ґрунтах, порівняно з серійними лемешами виготовленими за традиційною технологією. В результаті встановлено що зносостійкість випробовуваних лемешів з приклеєними керамічними пластинами 3-5 разів вище, ніж у серійних, при однакових показниках якості виконання технологічного процесу і енергетичних показниках.

Окрім цього проводилися експерименти по підвищенню зносостійкості робочих органів плуга нанесенням клейової композиції на основі клею ВК-36 і порошку електрокорунду.

Паяння металокерамічних пластин на леміш дозволяє значно підвищити міцність з'єднання «металокераміка - леміш» в порівнянні з клейовими з'єднаннями. Випробуваннями лемешів з металокерамічними пластинами, що напаяли, із сплаву ВК-8 показали, що зносостійкість зміцнених лемешів на середньосуглинистих ґрунтах 4,6-5.0 рази вище ніж у серійних (рис.8.31).

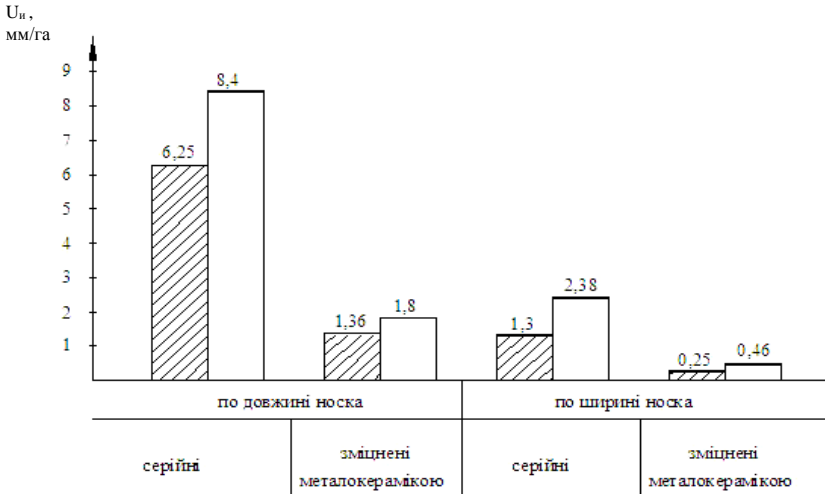


Рис.8.31 Швидкість зносу лемешів на:

▨ - середньосуглинистому ґрунті; □ - легкосуглинистому ґрунті

Не залежно від вище перерахованих способів зміцнення лемеша плуга, в даний час проводяться роботи по зміні конфігурації і геометричних розмірів лемеша.

Більшість плугів провідних західних фірм застосовують складені лемеша, такі, що складаються із змінного вістря (так званого “долота”) і власне лемеша. Долото може накривати леміш (накладне долото) або встановлюватися поряд з лемешем, в одній площині з ним. Товщина долота і його міцність вищі, ніж у шкарпетки лемеша. За даними зарубіжних оглядів до повного зносу лемеша використовується в середньому 2,25-3 змінних долота. Як показує досвід долото необхідне на кам'янистих ґрунтах.

Подальше підвищення ресурсу робочих органів ґрунторіжучих машин може бути досягнуте тільки за рахунок застосування перспективних зносостійких матеріалів і оптимальної конфігурації поверхні цих органів на базі вивчення процесів що протікають в трібосистемі “робочий орган - ґрунт”.

Таблиця 8.7 Середній знос лемешів (г/га)

Позначення лемешів	На ґрунті №1					
	А	$w = 7,5\%$ $\delta = 1,8г / см^3$	$w = 9,0\%$ $\delta = 1,5г / см^3$	$w = 15,0\%$ $\delta = 1,35г / см^3$	$w = 20,0\%$ $\delta = 1,24г / см^3$	$w = 22,0\%$ $\delta = 1,37г / см^3$
10,5		6,6	2,75	4,2	6,0	5,05
На ґрунті №2						
Б		$w = 9,0\%$ $\delta = 1,38г / см^3$	$w = 16,0\%$ $\delta = 1,52г / см^3$	$w = 12,0\%$ $\delta = 1,48г / см^3$	$w = 12,8\%$ $\delta = 1,5г / см^3$	$w = 14,1\%$ $\delta = 1,55г / см^3$
	-	25,7	46,6	36,0	46,6	61,7
На ґрунті №3						
В	$w = 7,8\%$ $\delta = 1,8г / см^3$	$w = 9,2\%$ $\delta = 1,4г / см^3$	$w = 14,9\%$ $\delta = 1,2г / см^3$	$w = 20,0\%$ $\delta = 1,2г / см^3$	$w = 26,4\%$ $\delta = 1,48г / см^3$	$w = 28,5\%$ $\delta = 1,28г / см^3$
	22,2	15,0	9,1	9,15	14,7	13,1
На ґрунті №4						
Г	$w = 8,1\%$ $\delta = 1,8г / см^3$	$w = 8,6\%$ $\delta = 1,7г / см^3$	$w = 15,1\%$ $\delta = 1,3г / см^3$	$w = 19,7\%$ $\delta = 1,33г / см^3$	$w = 21,0\%$ $\delta = 1,53г / см^3$	$w = 21,0\%$ $\delta = 1,43г / см^3$
	24,1	13,4	8,5	11,9	14,6	12,9
На ґрунті №5						
Д	$w = 7,3\%$ $\delta = 1,75г / см^3$	$w = 9,3\%$ $\delta = 1,47г / см^3$	$w = 16,2\%$ $\delta = 1,20г / см^3$	$w = 21,9\%$ $\delta = 1,21г / см^3$	$w = 25,3\%$ $\delta = 1,38г / см^3$	$w = 27,2\%$ $\delta = 1,3г / см^3$
	30,8	23,0	16,2	18,5	27,3	20,4

9 ВИПРОБУВАННЯ НА ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

9.1 Призначення і мета лабораторних випробувань на тертя та зношування

Ще два десятиліття тому запуску машин в серію передували тривалі стендові та експлуатаційні випробування дослідних зразків, протягом яких виявлялися і усувалися помилки, допущені при проектуванні різних компонентів цих машин, зокрема трібосистем. Сучасні умови виключають настільки трудомісткі і дорогі експерименти, тому конструктори повинні приймати остаточні рішення на стадії проектування. Для правильного вибору трібосистем необхідні попередні випробування цих трібосистем або їхніх моделей. Мета дослідника в першу чергу полягає в коректному виборі методу і умов випробувань на лабораторних машинах і стендах, що дозволяють оцінити протизносні, протизадирні і антифрикційні характеристики трібосистем проектованої машини. Методи проведення таких експериментів реалізуються на лабораторних установках, названих машинами тертя або трібометрами. Машина тертя – це пристрій, що відтворює трібологічний процес в контрольованих умовах і забезпечує оцінювання вихідних параметрів. Трібологічний процес здійснюється між зразками з досліджуваних матеріалів, що мають задану форму.

Машина тертя складається з приводу, що переміщає контактуючі зразки, пристроїв для установлювання цих зразків, навантаження трібосистем тертя, пристроїв контролю вихідних параметрів і ряду додаткових пристроїв (для подачі мастильних матеріалів у фрикційний контакт, нагрівання (або охолодження) елементів трібосистем тощо).

Під засобами для трібологічних випробувань ми розуміємо не тільки випробувальні стенди і машини тертя (трібометри, тріботехнічні комплекси), але і все те, що належить до інфраструктури таких випробувань. Насамперед це інструменти і прилади, що дозволяють контролювати зміну лінійних розмірів, маси, температури, сили, частоти обертання, твердості. Крім того, розвинуто одержали всілякі сучасні засоби оцінювання якості поверхні тертя (шорсткості, хвилястості, мікротвердості) і дослідження зміни структури, напруженого стану, акустичних властивостей. Розглянемо тільки серійні засоби проведення тріботехнічних випробувань і супутніх їм вимірювань, які необхідно виконувати зі строго регламентованою похибкою. Аналіз причин похибок і відшукування їхніх абсолютних значень є самостійною досить складною задачею, у повному обсязі вирішується тільки щодо засобів, які серійно випускаються.

Не зупиняючись на численних класифікаціях машин тертя, відзначимо, що поряд зі спеціалізованими для випробувань за заданою схемою контактування у відповідності зі стандартом в останні десятиліття з'явилися універсальні машини тертя, створені як у СНД, так і за кордоном (Шимадзу, Японія;

АТ "Точприбор", Росія; Вольпер-Амслер, Німеччина та ін.). Конструктивні рішення таких машин передбачають застосування від трьох до восьми змінних кінематичних схем випробувань і універсальні вимірювальні реєструючі прилади. Універсальні машини тертя належать до найбільш широко представленого класу машин стаціонарного тертя. Вони не дозволяють відтворювати перехідні (нестационарні) процеси. Однак при використанні таких машин не виникає особливих проблем з підбором вимірювальної реєструючої апаратури, тому що до неї не висуваються жорсткі вимоги, пов'язані з забезпеченням мінімальної інерції.

Сучасні серійні машини тертя забезпечують широкий діапазон зміни умов випробувань трибологічних властивостей матеріалів. Так, можуть бути відтворені тертя кочення, кочення з проковзуванням, вертіння (відповідно до кінематики досліджуваного трибологічного процесу). Відносний рух тертьових тіл може бути безперервним або переривчастим. За характером відносно-переміщення відтворюють або поступальний, або зворотно-поступальний рух. Можливі інші комбінації різних видів руху, наприклад, тертя між обертовим валом і осцилюючим за утворюючій валу колодкою, або зворотно-обертальний рух. Тертя може бути відтворене при ударі, у різних середовищах, у широкому інтервалі температур – від криогенних до сотень градусів Цельсія.

Різні режими трибологічного процесу реалізуються на машинах тертя з різними схемами контакту трибоелементів. Знайшли застосування багато різновидів номінального фрикційного контакту: рис. 5.1, схеми 1, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 15, 19, 21, 23, 24, 25, 26.

Контакт поверхонь тертя по площі. Торцевий контакт обертового і нерухомих кілець (рис. 5.1, 1) застосовується в серійних машинах тертя ИМ-58 і триботехнічних комплексах типу "Унітриб" (УМТ-1, 2168 УМТ) та ін. Широко використовується при реалізації методу оцінювання фрикційної теплотійкості (ГОСТ 23.210–80). У цьому випадку нерухоме і обертове кільця притискаються одне до одного торцями заданим осьовим зусиллям, а температура фрикційного розігріву східчасто підвищується шляхом збільшення частоти обертання нерухомого трибоелемента. При кожній з температур розігріву оцінюють фрикційні характеристики і зносу спряження.

Контакт торця нерухомого циліндричного зразка і обертового диска (рис. 5.1, 10) застосовується так само в комплексах "Унітриб" (2168 УМТ) і в серійній польській машині Т-01М. В іншому варіанті цієї схеми з обертовим диском контактує поступально циліндричний зразок, що переміщається; траєкторія при цьому являє собою спіраль Архімеда. Така схема використовується в машинах для випробувань на зношування об закріпленій абразив. Найбільш відома машина Х4-Б, що дозволяє оцінити відносну зносостійкість твердих тіл при терті по шліфувальній шкірці (ГОСТ 17367–71).

Контакт плоских зразків, один із яких робить зворотно-поступальне переміщення (рис. 5.1, 9) відбувається в машинах тертя 77 МТ, 2168 УМТ, а

також є однієї зі схем тертя, реалізованих у вібротрибометрі фірми Оптимоль (ФРН). У цьому випадку осцилює верхній зразок, а нижня пластина нерухома.

Схема тертя вал – підшипник (рис. 5.1, 6) реалізується в серійних машинах тертя і комплексах: УМТ-1, 2168 УМТ, СМТ-1, СМЦ-2, ИИ 5018 та інших установках. У різних варіантах може здійснюватися або зворотно-обертвий рух, або обертальний.

Схема тертя вал – частковий вкладиш (рис. 5.1, 8) використовується в машині ИИ 5018, у ряді ранніх моделей цієї машини (СМТ-1, СЦМ-2, МИ-1м), у машині тертя фірми Амслер. Використовується, зокрема, при лабораторних випробуваннях з метою оцінювання відносного припрацювання і стійкості до заїдання антифрикційних матеріалів і покриттів на металевій основі при терті в режимі змішаного мащення за ГОСТ 23.215–84. Частота обертання від 50 до 1500 об/хв.

Лінійний контакт тертьових поверхонь. Схема тертя обертаючий вал – прямокутний брусок (рис. 5.1, 19) – одна з найбільш розповсюджених схем у трибології. Використовується в машині тертя фірми Тімкен, а також у ряді методик, реалізованих на машинах тертя, що здійснюють обертальний рух вала (машини Шкода-Савіна, МИ-1м, Т-05).

На машині Тімкен при частоті обертання вала-ролика 800 хв^{-1} (або при 3600 хв^{-1} за методикою фірми Форд) методом східчастого навантаження оцінюються протизадирні властивості мастильних матеріалів (за ASTM D 2509 – пластичних мастильних матеріалів, за ASTM D 2782 – індустріальних і редукторних олів) або в широкому інтервалі зміни частоти обертання вала і навантажень на трібосистему досліджують протизносні властивості олів.

Схема тертя вал – два вкладиші (рис. 5.1, 5). Діаметр вала трохи менший, ніж діаметр отвору у вкладишах, так що в подібній схемі здійснюється початковий лінійний контакт. Ця схема застосовується у відомій машині Алмен-Віланд (діаметр вала 6,35 мм, діаметр отвору на 0,178 мм більший). Випробування на цій машині проводять при східчастому підвищенні навантаження на трібосистему до реалізації заїдання.

Схема тертя сфера – кільце (рис. 5.1, 15). Обертюва куля контактує з контртілом по сферичній поверхні у вигляді паска. Ширина паска дуже мала (звичайно 0,2 мм), тому контакт у першому наближенні може розглядатися як лінійний. Така схема передбачена температурним методом оцінювання мастильної здатності олів (ГОСТ 23.221–81), яка реалізується на машинах тертя КТ-2 і МАСТ-1.

Схема контакту – обертювий валик обтискується з двох сторін торцями пластин (рис. 5.1, 20). Така схема застосована в машині тертя фірми "Фалекс". Валик має діаметр 6,35 мм, зразки навантажуються гідравлічною системою.

Схема тертя – два обертюві циліндри (рис. 5.1, 23). Якщо розглянути вище схеми контакту призначені для відтворення тертя ковзання, то це може здійснюватися як ковзанням, так і коченням з проковзуванням у залежності

від напрямку і величини кутових швидкостей ω_1 і ω_2 . Вона широко застосовується при моделюванні тертя в зубчастих передачах. Відтворена в різних машинах тертя: у серійних ИИ 5018, СМТ-1, СМЦ-2, Амслер, МИ-1м і в деяких спеціальних роликкових стендах. У ряді випадків стенди дають можливість змінювати швидкості кожного ролика окремо, що дозволяє одержати або різні співвідношення швидкостей ковзання і кочення, або чисте кочення.

Точковий контакт тертьових тіл. Схема тертя – перехрещені циліндри (рис. 5.1, 26). На сьогодні застосовується відносно рідко.

Однак достатньо поширені схеми точкового контакту, реалізованого для перехрещених конуса і циліндра (у польській машині Т-04), сфери і циліндра, конуса і сфери (ГОСТ 23.221–84). При цьому може обертатися один з елементів трібосистеми або обидва. Якщо один з елементів при цьому поступально переміщається, то випробування буде постійно здійснюватися по свіжій поверхні. Використовувати точковий контакт тертьових тіл при трібологічних випробуваннях у багатьох випадках досить раціонально. По-перше, трібосистеми з точковим контактом дозволяють реалізувати високі контактні тиски, характерні для таких трібосистем як зубчасті передачі, підшипники кочення, спряження кулачок – штовхальник тощо. По-друге, вони не вимагають припрацювання для забезпечення конформності контактуючих поверхонь. І, нарешті, пляму зносу легко контролювати. Певна складність виникає при відтворенні натурних пар тертя з контактом по площині на моделі з точковим контактом, оскільки може бути порушене правило, відповідно до якого "площа контактної поверхні повинна забезпечувати розміщення не менш 100 структурних одиниць". У цьому випадку досягається мінімальна похибка експерименту. Порушення цього правила, коли габарити зразків зменшені, призводить до зростання похибки і збільшення обсягу експерименту. Зрозуміло, трібосистеми з точковим контактом (наприклад, опори кочення) досить коректно відтворюються на моделі трібосистеми з точковим контактом. Але найбільше широко випробувальні трібосистеми з точковим контактом використовують при порівняльних випробуваннях мастильних матеріалів (ГОСТ 9490–75, ГОСТ 23.221–84, РД 50 531–85 і ін.).

Чотирьохкулькова схема тертя (рис. 5.1, 24), у якій обертова верхня кулька, затиснута в шпинделі машини, контактує з трьома нижніми кульками, встановленими в спеціальному оправленні в горизонтальній площині симетрично щодо осі шпинделя. Така схема тертя використана в найвідомішій машині для випробувань мастильних матеріалів. У залежності від конструкції чотирьохкулькова машина може відтворювати тертя ковзання або тертя кочення. Найбільш поширена чотирьохкулькова машина ковзання, у якій нижні кулі діаметром 12,7 мм затиснуті в оправленні і залишаються нерухомими, у той час як верхня кулька обертається з частотою 1500 хв⁻¹ під навантаженням. На нижніх кульках утворюються лунки, відповідно розміри яких характеризують досліджувані оливи. Машина широко застосовується для оцінювання протизадирних властивостей оливою методом послідовного навантаження, до

настання зварювання кульок. При цьому реєструють навантаження (критичне P_k), починаючи з якого діаметр плями зносу на нижніх кулях різко зростає. Відносний середній знос при високих навантаженнях – індекс задиру – також є важливою характеристикою мастильного матеріалу. Зазначені характеристики протизносних властивостей мастильних матеріалів регламентуються ГОСТ 9490–75 для олів і пластичних мастильних матеріалів (стандартами ASTM D 2783 і ASTM D 2596). Аналогічні методи випробувань зафіксовані документами IP 239 (Великобританія) і DIN 51350 (ФРН).

На чотирьохкульковій машині оцінюють протизносні властивості мастильних матеріалів шляхом випробувань при постійному навантаженні (ГОСТ 9490–75) протягом 60 хв. Відомі вітчизняна чотирьохкулькова машина ЧМТ-1, американська машина фірми Шел і польський тестер Т-02, на яких оцінюють і протизадирні, і протизносні властивості олів. Випускають потужні чотирьохкулькові машини, що дозволяють оцінювання протизадирні властивості (Four-Ball EP Test Machine) і малопотужні машини для оцінювання протизносних властивостей олів (Four-Ball Wear Test Machine). Так, американська фірма Фалекс випускає чотирьохкулькові машини марки "Роксана" обох типів. Машина першого типу дозволяє варіювати осьове навантаження від 60 до 10 000 Н, другого типу – до 500 або 1800 Н (ASTM D 2266).

Інший метод оцінювання протизносних властивостей мастильних матеріалів на чотирьохкульковій машині, регламентований методичними вказівками Держстандарту РД 50 531–85, полягає в тому, що при постійному навантаженні на нижніх кулях утворюються лунки, розміри яких періодично вимірюються. Протизносні властивості мастильних матеріалів оцінюють за значеннями параметрів функції, що апроксимує залежність інтенсивності зношування від тиску. Метод більш інформативний, ніж стандартний, але більш трудомісткий.

Існує варіант чотирьохкулькової машини з досить повільним обертанням шпинделя для мінімізації фрикційного нагрівання контактуючих поверхонь і розділюючого їх шари мастильного матеріалу (випробування на таких машинах проводяться відповідно до ГОСТ 23.221–84 при об'ємному нагріванні кульок від зовнішнього джерела тепла, так що температура в контакті практично не відрізняється від об'ємної). Мастильну здатність олів характеризують перехідні температури, що свідчать про утворення і руйнування граничних мастильних шарів.

В іншому варіанті чотирикулькової машини з частотою обертання 1500 хв⁻¹ нижні кулі не затиснуті в оправленні, а котяться (з деяким проковзуванням) по внутрішній поверхні оправлення. Такі машини застосовують для оцінювання протипітингових властивостей мастильних матеріалів. Відповідно до стандарту Великобританії IP 300, випробування проводяться під навантаженням 6000 Н до настання пітингу.

П'ятикулькова схема тертя (рис. 5.1, 25). Як випробувальні зразки використовуються стандартні сталеві кульки для шарикопідшипників, які хара-

ктеризуються однорідністю структури і спряження та високою якістю обробки поверхні, що забезпечує гарну відновлюваність результатів експерименту. Трібосистема п'ятикулькової машини тертя – піраміда з 5 куль діаметром 9,52 мм. Верхня і нижня кулі закріплені на торцях валів, кожен з яких може обертатися самостійно. Якщо утримати від обертання чашку, то при обертанні валів з навантаженими вертикальними кулями горизонтальні кулі обкатуються по зовнішньому кільцю чашки, і трібосистема імітує роботу підшипника кочення. Якщо ж нижня куля не навантажена, то імітується робота радіально-упорного підшипника.

При виборі схеми випробувань варто оцінювати можливість відтворення на модельній трібосистемі навантаженого стану, типу руху (поступальне, зворотно-поступальне, обертальне кочення, кочення з проковзуванням, ковзання), а також температурного режиму, що мають місце в натурній трібосистемі. Температурний режим багато в чому визначається коефіцієнтом взаємного перекриття (відношенням номінальних площ, по яких на контактуючих зразках здійснюється процес тертя), що впливає на розподіл теплових потоків. Коефіцієнт взаємного перекриття $K_{вз}$ (на рис. 5.1 для схем 1 і 10 дорівнює 1 і 0 відповідно) визначає також можливість надходження активних компонентів середовища у фрикційний контакт, що впливає на результати випробувань, оскільки помітно впливає на умови утворення захисних плівок, зокрема на час між послідовними контактами, за який ці плівки утворюються. При використанні методу фізичного моделювання значна кількість цих вимог враховується автоматично.

Велике значення має якість робочих поверхонь трібоелементів. При порівняльних випробуваннях дослідник прагне забезпечити однакову якість поверхонь зразків. Так, при порівняльних випробуваннях мастильних матеріалів широко застосовують чотирьохкулькову машину, зразки в якій мають високу однорідність. При відтворенні на моделі певної трібосистеми в багатьох випадках варто відтворити якість робочих поверхонь трібоелементів, але найчастіше модельні трібоелементи виготовляють з більш високою якістю поверхні, ніж у натурних деталей. Нарешті, слід мати на увазі, що поверхні спряження тіл, втягнутих у силовий фрикційний контакт, як у натурній, так і в модельній трібосистемах формуються в результаті їхньої взаємодії в заданих умовах, так що в процесі самоорганізації фрикційного контакту змінюються як макро-, так і мікрогеометричні характеристики трібоелементів. Крім того, відповідно змінюються мікромеханічні і фізико-хімічні характеристики поверхневих шарів. Усі ці зміни відповідно до принципу Ле-Шательє – Брауна відбуваються в напрямку, який забезпечує послаблення зовнішніх впливів, так що в результаті адаптації фрикційного контакту до умов навантаження в поверхневих шарах трібосистеми утвориться оптимальний для даних умов макро- і мікрорельєф. Це, однак, не означає, що початковий мікрорельєф не задає впливу на результати випробувань.

У випадку, коли дослідник прагне виключити можливий вплив зміни

шорсткості третьової поверхні в процесі зношування, використовують метод відновлення шорсткості, наприклад, шляхом установки різця перед трібоелементом, що зношує. Цей різець знімає тонкий шар металу і таким чином відновлює первісну шорсткість.

Методи навантаження трібосистеми повинні забезпечувати плавне прикладання навантаження і стабільність режиму навантаження незалежно від зміни в процесі випробувань розмірів елементів, їхнього биття, від виникаючих моментів тертя та їхньої зміни. Вони звичайно досить прості. Якщо за умовами випробувань кожне вимірювання проводиться при постійному навантаженні, то трібосистема навантажується або вантажами (іноді через важіль), або тарованою пружиною, або гідравлічними чи пневматичними пристроями. Так, пневматичними пристроями навантажують зразки на машинах "Унітриб", ИМ-58, гідравлічним – на Алмен-Віланд. Вантажами навантажують трібосистеми стандартної чотирьохкулькової машини, вібротрібометра SRV, а також відомих установок Шкода – Савіна, Тімкен. Однак при наявності биття обертових валів або великої частоти зворотно-поступального руху елементів у певні моменти виникають умови, коли навантаження повністю не передається у фрикційний контакт, а в інші моменти виникають ударні навантаження.

Це перешкоджає здійсненню випробувань у строго контрольованих умовах. Тому в таких випадках використовують трібосистеми, які мають здатність демпфірування. Найбільш поширені пристрої з тарованою пружиною. Плоску таровану пружину застосовував для навантаження ще Амонтон. Циліндричні пружини широко застосовуються в машинах тертя з обертовими валами (МИ-1м, СЦМ-2, СМТ-1, ИИ-5018).

Машини типу "Унітриб", ИИ-5018 проходять метрологічну експертизу, у результаті якої суворо регламентується похибка вимірювання навантаження на трібосистему; вона, як правило, не повинна перевищувати 2%.

Розглянуті вище схеми навантаження використовуються для випробувань при постійних навантаженнях, принаймні, постійних для конкретних рівнів навантаження. Однак існують методи випробувань, які передбачають зміну навантаження на трібосистему в процесі роботи за визначеним законом. Найпростіший випадок зміни навантаження в процесі випробувань передбачений методом оцінювання протизадирних властивостей машинобудівних матеріалів (ГОСТ 23213–83). Вимірювання проводяться при схемі тертя перехрещені циліндри (рис. 5.1 схема 26); при цьому здійснюється поступальний рух одного циліндра (або сполучення поступального і обертального) щодо іншого нерухомого. Навантаження реалізується плоскими пружинами, причому передбачено лінійне збільшення навантаження за рахунок піджимання пружини нерухомими клинами, щодо яких переміщається елемент і його пружини. Складним є встановлення зворотного зв'язку навантаження з яким-небудь вихідним параметром, наприклад, зі зносом для забезпечення постійного тиску у фрикційному контакті або з моментом тертя. Найпростішим випадком останнього зворотного зв'язку є відключення машини при до-

с'ягненні у фрикційному контакті граничного моменту тертя.

Привід машин тертя. Перші машини тертя приводилися в дію вагою падаючого вантажу. У сучасних лабораторних установках приводом служать головним чином електродвигун і передавальний механізм, пристрій якого визначається кінематикою фрикційного sprzęження. У найпростішому випадку (наприклад, у стандартної чотирьохкулькової машині ЧМТ-1 або польських машинах від Т-01 до Т-03) шпindelь машини безпосередньо з'єднаний з валом електродвигуна. Частота обертання електродвигуна в різних установках варіюється за рахунок змінних шестірень або тиристорного приводу. Осцилюючий рух зразків здійснюється, як правило, електромагнітом (наприклад, у вібротрібометрі SRV). Для відтворення поступального і зворотно-поступального переміщення третьових тіл використовується або гідравлічний привід, або електричний привід із кривошипношатуни́м механізмом перетворення обертального руху на зворотно-поступальний (машина 77 МТ, пристосування до універсальної машини тертя 2168 УМТ-1 "Унітриб").

У машинах нестационарного тертя (наприклад, ИМ-58) до складу приводу вводять додаткові вузли. Вони повинні забезпечувати своєчасне підключення до вала машини необхідних махових мас. На валу закріплена голівка, у якій установлюється зразок. Ці махові маси запасують у процесі розгону енергію, яка при гальмуванні надалі дисипується (розсіюється) випробуваною трібосистемою. Крім цього, до складу приводу входить муфта увімкнення (зубцювата або фрикційна електромагнітна), яка дає можливість після закінчення процесу розгону безпосередньо перед початком гальмування відключати механічну частину приводу (двигун і передачу). Ця частина приводу містить вузли, у яких розсіюється енергія, створює не прогнозовані втрати, які неможливо надійно визначити розрахунково-експериментальними способами.

При регламентуванні похибки випробувань, особливо при нестационарному терті, доводиться забезпечувати мінімальні втрати на тертя в підшипниках кочення. Вони, як відомо, залежать від наявності мастильного матеріалу, затягування корпусу підшипника і стабілізації зазорів при підвищеному тепловиділенні в процесі випробування. Для компенсації цього тепловиділення застосовують водяне охолодження підшипників приводу, розташованих поблизу голівок зі трібоелементами.

9.2 Методи вимірювання зносу та сил тертя. Устаткування для випробувань на тертя та зношування конструкційних та мастильних матеріалів

Вихідні параметри трібологічного процесу – це знос трібоелементів, величина моменту тертя, температура в трібологічному контакті, шлях і час. Сучасні дослідники, використовуючи досягнення техніки вимірювання, оцінюють також такі характеристики трібологічного процесу, як, наприклад, частка металевого контакту, тривалість одиничного контакту, акустичне випромінювання тощо.

Вимірюється знос лінійний (у напрямку, перпендикулярному поверхні, що зношується, у вимірюваній точці) або об'ємний, який може визначатися за втратою маси третювих тіл. Нарешті, знос може характеризуватися такими вимірюваними величинами, як діаметр плями зносу, що утворилася в результаті процесу тертя між тілами з початковим точковим контактом. Знос може вимірятися безпосередньо протягом трібологічного процесу (так, у машині тертя Шкода – Савина лінійний знос елемента вимірюється за допомогою індикатора годинникового типу, шток якого зв'язаний з рухомою кулісою, у якій на підшипниках встановлений обертовий ролик, який зношує, так що в міру зносу нижнього трібоелемента куліса опускається) або після закінчення випробування (наприклад, при випробуванні мастильного матеріалу на чотирьохкульовій машині діаметр плями зносу вимірюється після закінчення кожного етапу).

Вибір методу вимірювань зносу визначається необхідною точністю одержуваних результатів. Так, при вимірюванні лінійного зносу за допомогою штангенциркуля похибка (дисперсія) складає $\pm 0,05$ або 10^{-1} мм, за допомогою мікрометра – $\pm 0,004$ або $8 \cdot 10^{-3}$ мм, за допомогою оптиметра – $\pm 0,0005$ або 10^{-3} мм (за паспортом). Похибка вимірювань зменшується при збільшенні кількості вимірювань. Відповідно до ГОСТ 27860–88, лінійний знос може бути визначений за допомогою профілографування. При цьому визначається різниця висот профілю до і після зношування досліджуваної деталі шляхом поєднання профілограм після певного етапу зношування. Шляхом однократного профілографування можна виміряти знос на кожному етапі випробувань, якщо після кожного етапу зношування зменшується хоча б один розмір ділянки зразка, що зношується. Знос визначають після проведення всіх етапів випробувань, описуючи на профілограмі збережені на поверхні зразка ділянки зношених поверхонь, що сформувалися на різних етапах випробування (рис. 9.1).

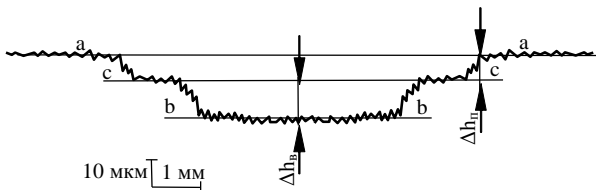


Рис. 9.1 Схема вимірювання зносу однократним профілографуванням:
a-a – базова поверхня; *b-b* – поверхня, що утворилася в процесі зношування
 (Δh_n – знос припрацювання; Δh_e – знос на стадії випробувань)

Цей же стандарт регламентує вимірювання малих зносів методом штучних баз. Якщо при використанні методу профілографування за базу для вимірювань зносів приймають незношену ділянку поверхні, що не завжди можливо (наприклад, якщо зношується вся поверхня або до незношеної ділянки ве-

лика відстань), то при цьому методі база створюється штучно і нею служить дно спеціально нанесених на поверхню відбитків або лунок, причому співвідношення між довжиною лунки і її глибиною вибирається таким, що незначний знос (і відповідно зменшення глибини лунки) призводить до помітного зменшення її довжини. Це дозволяє заміряти знос з великою точністю. За методом вирізаних лунок на поверхні тертя в наміченому місці алмазним різцем вирізують лунку, дно якої окреслене по радіусу r , описуваному вершиною різця, і довжина якої складає l_1 , а після зношування зменшується до l_2 . Лінійний знос поверхневого шару, обумовлений різницею Δh глибин лунки до початку зношування h_1 і після закінчення зношування h_2 (рис. 9.2) для плоских поверхонь або при розташуванні лунок уздовж утворюючого циліндра розраховується за формулою:

$$\Delta h = 0,125(l_1^2 - l_2^2) \cdot 1/r. \quad (9.1)$$

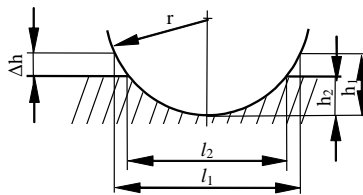


Рис. 9.2 Схема вимірювання зносу методом вирізаних лунок:

1 і 2 – верхня границя поверхні тертя до і після зношування відповідно;
 h_1, h_2 – глибина лунки відповідно до і після зношування; Δh – лінійний знос;
 r – радіус обертання вершини різця

Вивчення кінетики зношування трибоелементів вимагає періодичної його зупинки і розбирання.

При оцінюванні зносів без розбирання трибосистем за аналізом проб мастильного матеріалу, що відбираються в процесі експлуатації, широко використовуються хімічні, ядерно-фізичні, фотометричні методи, а також спектральний аналіз. Хімічні методи мають досить високу чутливість (до 10^{-6} г металу на 1 мл оливи), але трудомісткі і малопродуктивні. Частина з них стандартизована (ГОСТ 1955–47). Спектральний аналіз, маючи високу чутливість (до 10^{-8} м на 1 мл оливи), більш продуктивний (300..400 проб у день). На сьогодні широко застосовують різні ядерно-фізичні методи (радіоіндикаторний метод поверхонь активації, метод нейтронного активаційного аналізу). За радіоіндикаторним методом досліджувана деталь активується або безпосередньо в реакторі, або за допомогою електролітичного нанесення радіоактивного пок-

риття, або за допомогою введення радіоактивного ізотопу в метал у процесі його плавки, або установкою радіоактивних вставок у досліджувану деталь. У процесі роботи активована деталь зношується, продукти зносу потрапляють в оливу. Активність проб оливи визначається спеціальними лічильниками радіоактивності. Для забезпечення високої чутливості методу (10^{-8} м металу на 1 мл оливи) потрібно відповідно висока радіоактивність деталей (вище 1 мілікюрі), що у свою чергу вимагає спеціального захисту обслуговуючого персоналу від опромінення і приміщень від радіоактивного забруднення.

Диференціальний метод радіоактивних індикаторів відрізняється від попередніх тим, що деталі піддаються в циклотроні поверхневій активації бомбардуванням прискореними зарядженими частками на глибину 10...300 мкм. Поверхні одержують порівняно малу активність (не більше 10 мікрокюрі), що дозволяє використовувати активовані деталі в будь-яких умовах без спеціального захисту людей і приміщень. Знос деталей визначається за зменшенням відносної радіоактивності активованих ділянок досліджуваної поверхні.

Метод нейтронного активаційного аналізу відрізняється від радіоіндикаторних методів тим, що випробування на зношування проводять з неактивованими деталями, а активуються проби оливи, які містять продукти зносу. Метод стандартизований (ГОСТ 23217–84). Знос оцінюють за масовим вмістом елемента-індикатора в пробі оливи в залежності від спектра гамма-випромінювання після опромінення тепловими нейтронами. Метод дозволяє вимірювати окремо знос кожної з робочих поверхонь тертьових тіл за кількістю елементів, що знаходяться в пробі оливи – індикаторів зносу.

Фотометричні методи включають дисперсний аналіз часток продуктів зношування і ферографію. Для визначення дисперсної сполуки часток зносу в оливи застосовують автоматичні аналізатори, принцип дії яких заснований на фотометричному методі підрахунку часток визначених розмірних груп.

При дослідженні протизносних властивостей мастил і діагностиці трібосистем машин доцільно поєднати дисперсійний аналіз на фотометричному аналізаторі зі спектральним аналізом, що дозволить виявити не тільки зміну умов зношування в процесі роботи трібосистем, але і визначити найбільш зношувану деталь за елементним аналізом.

В останні роки набув поширення метод аналізу продуктів зносу, заснований на вилученні феромагнітних і парамагнітних часток із проби оливи під дією магнітного поля, що одержав назву ферографії. Частки, що витягаються магнітними силовими полями продуктів зносу осідають у жолобку скляної або пластмасової пластини, по якій стікає досліджувана олива. При цьому частки розподіляються за розмірами від великих у верхній частині до дрібних у нижній частині пластини.

Дослідження продуктів зносу дозволяє зробити важливі висновки про механізм процесів зношування.

Однак методи вимірювання, засновані на вивченні продуктів зносу в оливі, досить рідко застосовуються в лабораторних трібологічних випробу-

ваннях, а в основному при стендових або експлуатаційних.

Найважливішою характеристикою трибологічного процесу з часів Леонардо да Вінчі і Амонтона вважається сила тертя, тобто зусилля опору відносному переміщенню тертьових тіл. Методи визначення сили тертя зводяться до оцінювання моменту, що зрівноважує момент тертя, або до вимірювання здійсненою силою тертя деформації пружного елемента, зв'язаного з одним з контактуючих тіл. Характерний приклад вимірювання сили (моменту) тертя шляхом її (його) зрівноважування наведений на рис. 9.3. Пристрій призначений для вимірювання моменту тертя між обертовим роликом 1 і пластиною, що притискається до нього, 2. Ця пластина встановлена на рамі 3, посадженій у внутрішнє кільце 4 шарикопідшипника, де вона закріплена гвинтами 5.

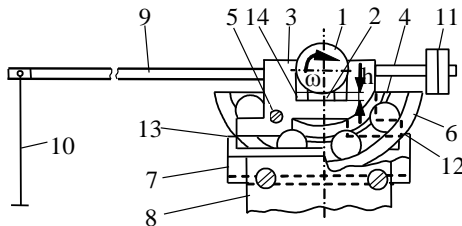


Рис. 9.3 Схема пристрою для вимірювання моменту тертя, що виникає при контактуванні обертового ролика з нерухомою пластиною

Зовнішнє кільце шарикопідшипника 6 знаходиться в гнізді опори 7, встановленій на станині 8. На рамі 3 укріплений важіль 9 з підвіскою 10, якої у вихідному положенні за допомогою вантажів протизваги 11 встановлюється горизонтально. В урівноваженому положенні рама 3 упирається в опору 7 у точці 12, а між протилежними сторонами рами і опори має зазор 13. При обертанні ролика 1 важіль 9 під впливом сили тертя прагне повернутися в напрямку обертання. Прикладаючи вантажі до підвіски 10, дослідник не дає важелю повернутися. Величина вантажу, необхідного для зрівноважування важеля в горизонтальному положенні, а також значення співвідношення між радіусом ролика 1 і довжиною важеля 9 дозволяють визначити момент і силу тертя. У минулому був широко розповсюджений маятниковий силловимірювач. Сила тертя змушує відхилитися на певний кут важкий маятник і кут, його відхилення характеризує силу тертя. Такі пристрої застосовують у ряді машин тертя з обертовим валом, причому маятник пов'язаний з контртілом (машина И-47) або його важіль є водило планетарної передачі (машини Амслера, МИ-1м тощо). Момент тертя можна оцінити шляхом вимірювання кута відхилення статора приводного двигуна (мотор – ваги), при цьому двигун доводиться підтримувати пружиною. Існують і інші електричні та механічні методи оцінювання сили тертя. Найбільш поширений метод вимірювання сили тертя шляхом оцінювання деформації пружного елемента. Такий силловимірювальний пристрій застосовується у машині ДСЦ (рис. 9.4)

призначений для оцінювання антифрикційних властивостей мастильних матеріалів. У цій машині здійснюється тертя між обертовим на валу 1 диском 2 і сферичним зразком 3, вміщеним в оправлення 4, встановлене в гнізді важеля 5, що укріплений на осі 8. Силівимірювальний пристрій являє собою тонке динамометричне кільце 7, виготовлене з пружинної сталі, що має можливість деформуватися тільки уздовж осі важеля під впливом сили тертя. Ця деформація сприймається наклеєними на його поверхні датчиками опору 9. Датчики під впливом сили тертя деформуються разом з кільцем 7, що тягне за собою зміну омичного опору, для перетворення якого на активний сигнал використовують спеціальні пристрої (потенціометричні дільники напруги і вимірювальні мости). Керамічна вставка 6 виключає можливий перегрів тензOMETричного пристрою від нагрівача, яким оснащена трібосистема.

Крім датчиків опору, для вимірювання деформації пружного елемента можуть застосовуватися п'єзоелектричні або індукційні датчики, механотрони або інші датчики переміщення.

Схема, наведена на рис. 9.4, призначена для безпосереднього вимірювання сили тертя. Якщо ж один трібоелементів приводиться силою тертя в обертальний рух, то вимірюється момент тертя, виходячи з якого розраховується сила тертя. Пружним елементом служить пружина крутіння – торсіон. Приклад трібосистеми тертя з таким силівимірювальним пристроєм показаний на рис. 9.5. У цьому варіанті чотирьохкулькової машини (КТ-2) тертя здійснюється між кулею 3, затиснутим у шпинделі 1 за допомогою гайки 2, і трьома нижніми кулями, затиснутими в оправленні 5, встановленої в масляній чашці 4. Ця чашка через опорний кульковий підшипник 10 установлена на шток 9, через який передається навантаження N на вузол тертя. Чашка 4 з розміщеними в ній нижніми кулями пружно з'єднана зі штоком 9 – пружиною крутіння (торсійною) 6. Верхня куля, обертаючись, силою тертя захоплює за собою оправлення 5 з нижніми кулями, що жорстко зв'язане з чашкою 4. Ця чашка закручує торсіон 6 і за кутом закручування, який реєструється пером 7 на папері, намотаному на барабан самописа 8, оцінюють момент тертя, за яким розраховують силу тертя.

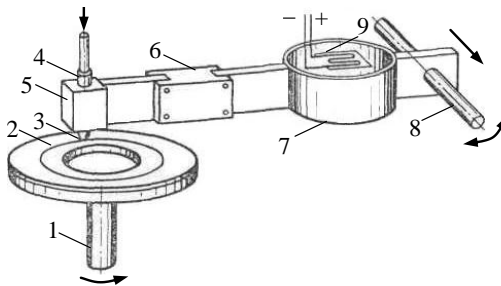


Рис. 9.4 Схема випробувань на дисковій машині тертя

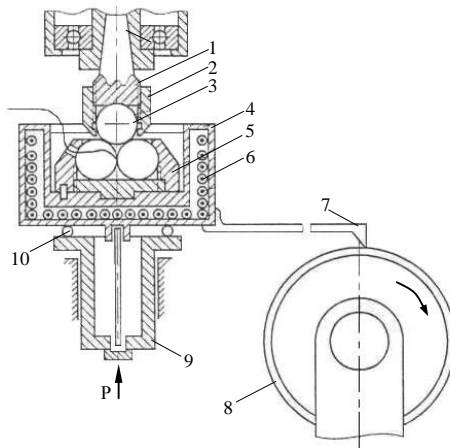


Рис. 9.5 Схема вузла тертя ЧШМКТ-2

Машина тертя для випробувань матеріалів на тертя і знос 2070 СМТ-1. Кінематична схема машини тертя наведена на рис. 9.6. Принцип дії машини полягає в зношуванні двох трібоелементів, притиснутих із заданим навантаженням друг до друга. У процесі роботи на нижньому трібоелементі вимірюють момент тертя. Трібоелементи притискаються один до одного силою пружини. Величину сили навантажування регулюють віссю-гвинтом, що передає навантаження на зразки через п'яту, кронштейн і корпус каретки. Датчиком навантаження є прецизійний опір. Момент тертя – сигнал, що надходить з датчика моменту.

Датчиком швидкості є тахогенератор. Діапазон частоти обертання вала нижнього елемента регулюється змінним шківом. Частоту обертання в межах діапазону змінюють за допомогою електродвигуна.

Іншою вихідною характеристикою процесу тертя, що часто застосовується для оцінювання антифрикційних властивостей рухомого спряження, є температура контакту. Слід при цьому розрізняти середню (об'ємну) температуру тіла, температуру поверхні і миттєву температуру на плямі фактичного контакту. Першу з них виміряти досить просто, останню оцінюють розрахунковим шляхом або побічно за фізичними чи металографічними змінами у поверхнях тертя (пластичне зміцнення матеріалу, внутрішні напруження, зміни в мікроструктурі, утворення хімічних сполук у результаті реакції із середовищем тощо). Середню (об'ємну) температуру поверхні визначають шляхом вимірювання на заданій відстані від поверхні контакту. Більш коректно оцінювати температуру, знаючи температурний градієнт у поверхневому шарі. Вимірювання при цьому здійснюється за допомогою термопар – штучних, напівштучних, природних. Звичайно штучна термопара попередньо тарована, або встановлюється в теплопровідному матеріалі нерухомого трібо-

елемента на заданій відстані від поверхні тертя, або приварюється ударно-контактним зварюванням до латунної капсули, вмонтованої в поверхню тертя елемента з низкою температуропроводністю. Існують також безконтактні методи вимірювання температури трібоелементів (з використанням плавких металевих термометрів, термофарб, термовкладишів), так звані оптичні методи (за допомогою радіаційних, яскравих, колірних пірометрів). Такі методи варто застосовувати лише у випадку, якщо немає можливості використовувати контактні методи, що більш точні.

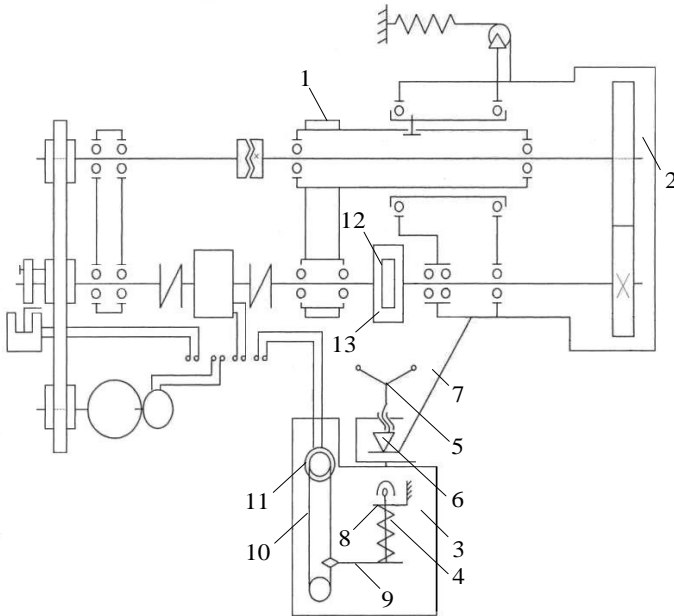


Рис. 9.6 Схема кінематичної машини тертя 2070 СМТ-1: 1 – бабка нижнього зразка; 2 – каретка; 3 – механізм навантаження; 4 – пружина; 5 – вісь-гвинт; 6 – п’ята; 7 – кронштейн; 8 – тяга; 9 – планка; 10 – нитка; 11 – датчик навантаження; 12 – верхній елемент; 13 – нижній елемент

Як при створенні випробувальних станцій і лабораторій, так і при удосконаленні вже працюючих необхідна автоматизація експерименту, комп’ютерна обробка його результатів і накопичення їх у банку даних. Так, тріботехнічні комплекси типу "Унітриб" передбачають виведення інформації на комп’ютер, так само як і польські машини від Т-01 до Т-10 і більшість машин тертя західних фірм.

Машини тертя призначені як для проведення серійних (у тому числі стандартних) випробувань трібосистем, так і для наукових досліджень. Вони застосо-

вуються практично у всіх галузях промисловості. Разом з тим робота з такими машинами вимагає досвіду обслуговуючого персоналу. Наприклад, перед початком серії випробувань нових трібосистем фахівець повинен визначити, чи не виходять параметри, які реєструються (момент від сил тертя, температура та ін.) за межі припустимих. Недоцільна робота на резонансних режимах, коли частота сили тертя близька до власної частоти системи зразок – силовимірювач. Така ситуація призводить до різкого збільшення похибки вимірювання. З цієї ж причини не слід допускати роботу в режимі схоплювання.

Застосування розглянутої випробувальної техніки в поєднанні з розрахунково-експериментальними методами визначення температури в елементах трібосистеми і мастильному матеріалі з урахуванням масштабного фактора при моделюванні тертя і зношування, а також критеріїв для порівняння результатів експериментів дозволяє істотно скоротити терміни проектування трібосистем і у десятки разів зменшити витрати на підбір конструкційних і мастильних матеріалів порівняно з експлуатаційними випробуваннями.

9.3 Методи тріботехнічних випробувань на абразивну зносостійкість

Машини і установки для випробувань на абразивний знос можна розподілити за типом зносу тіла на три групи: по закріпленому абразиву, вільними частками і деформуючою масою, яка утримує абразивні частки. Розглянемо найбільш типових представників перших двох груп.

Зношування матеріалів по закріпленому абразиву. Дослідження зношування матеріалів по закріпленому абразиву здійснюються в основному з використання абразивної стрічки як контргіла. В окремих випадках для цих цілей використовують абразивне коло. Режими і схеми випробувань на зношування матеріалів закріпленням абразивом регламентуються стандартами. Визначення зносостійкості металів здійснюються за ГОСТ 17367–71, а гум – за ГОСТ 17426–77.

У випробуваннях по закріпленому абразиву реалізується в основному контакт плоских поверхонь трібоелементів або поверхня циліндра –площина.

У випробувальній машині Х-4Б здійснюється контакт торець циліндра і диска (рис. 9.7). На поверхні диска, що обертається 1, закріплюються абразивні частки або абразивна стрічка 2, зразок 3 досліджуваного матеріалу, виконаного у вигляді циліндра діаметром 2 мм і висотою 15...20 мм, приводиться в контакт торцевою поверхнею з абразивними частками. Закріплення зразка в державці 4, жорстко зв'язаного вздовж радіуса диска, що переміщається штоком 5, дозволяє проводити випробування при різних швидкостях ковзання, але при однаковому шляху тертя.

Аналогічна описаній схемі контакту зразків закладена в машині Хейворда і у машині для випробувань гум МИ-2. Несуттєва їх різниця полягає у тому, що з диском контактують одночасно два випробувальних зразки квадратного перетину. Крім того, забезпечується подача в зону тертя рідини і абразивних частинок. Відзначимо, що машина Х-4Б не вимагає істотного допрацювання для реалізації таких же умов випробувань.

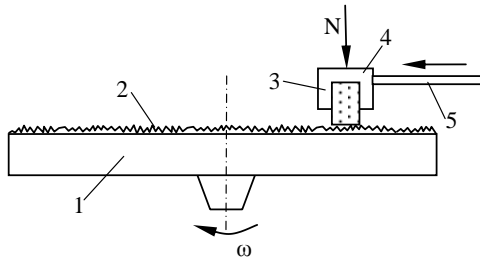


Рис. 9.7 Схема контакту третьових тіл па машині Х-4Б

Важливою перевагою описаної схеми контакту є можливість одержання залежності зносостійкості матеріалу від швидкості ковзання на одній трібосистемі.

Схема випробувань “бічна поверхня обертового циліндра – плоска поверхня досліджуваного елемента” закладена у конструкції машини для дослідження пластмас на стирання МПІ (рис. 9.8). Трібоелемент 1 циліндричної форми контактує з абразивною стрічкою 4, закріплено на поверхні обертового циліндра 5 великого діаметра. За допомогою штока 3, жорстко зв’язаного з державкою 2, зразку надається рух уздовж утворюючого циліндра синхронно швидкості його обертання. За один оберт циліндра 5 трібоелемент зміщається на відстань, яка дорівнює своєму діаметру або половині діаметра (у залежності від ГОСТ, що регламентує ці випробування). Аналогічна схема контакту передбачена стандартом ASTM G56 (США). Як досліджуваний трібоелемент обрана кулька діаметром 6,35 мм, що контактує з абразивною стрічкою по свіжому сліду. Знос кульки оцінюється за профілограмою з перерахуванням на об’ємний знос.

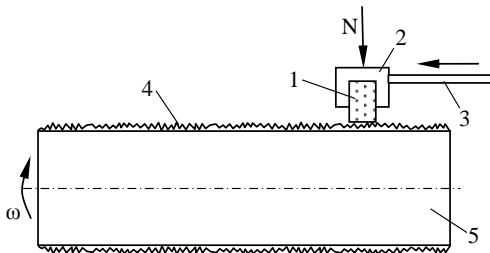


Рис. 9.8 Схема контакту третьових тіл па машині МПІ

Недоліком такої схеми випробувань є нерівномірність розподілу тиску по контактній площадці, обумовлена кривизною поверхонь, що спряжуються.

Випробування на абразивну стійкість обох елементів трібосистем здійснюються за сферою: бічна поверхня абразивного кола – площина тіла, що зношується (рис. 9.9). Обертове коло 1 з абразивних часток приводиться в кон-

такт із досліджуваним трібоелементом 2. Трібоелемент може бути закріплений нерухомо, і тоді знос визначають за глибиною лунки, що утвориться. У випадку розміщення зразка на каретці 3, що здійснює зворотно-поступальний рух, знос визначають за товщиною шару, що видаляється з усієї поверхні тертя. За зменшенням діаметра абразивного кола можна судити про інтенсивність його зношування. Така схема контакту дозволяє проводити випробування при подачі в зону тертя рідкого середовища. Недолік її полягає в можливості засалювання абразивного кола, що особливо характерно для випробувань пластичних матеріалів (міді, алюмінію, полімерних матеріалів).

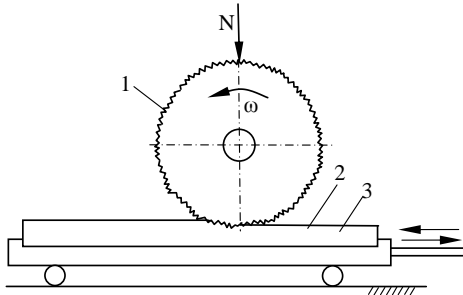


Рис. 9.9 Схема випробувань по абразивному колу

Зношування вільними абразивними частками і масою, що деформується. Метод випробування зношування вільними абразивними частками призначений для моделювання процесу зношування деталей машин незакріпленими абразивними частками.

Випробування матеріалів здійснюються на машинах тертя, що забезпечують введення в зону контакту трібоелементів часток з матеріалу, твердість якого вище твердості випробуваних тіл. Найбільш розповсюдженими схемами випробувань є контакт двох дисків: диска з плоским трібоелементом і двох плоских трібоелементів.

Контакт диска з плоским зразком реалізується в схемі випробувань за Д.А. Бринелем (рис. 9.10). Обертювий диск 1 діаметром 100 мм і товщиною 4 мм приводиться в контакт трібоелементом 2, виконаним з досліджуваного матеріалу у вигляді прямокутного бруска. При обертанні диска в зону тертя з бункера 3 подаються абразивні частки, що протягуються ним по поверхні трібоелемента. Про величину зносу судять за об'ємом лунки, що утвориться, або за втратою маси зразка.

Аналогічна схема випробувань ASTM G65 (США). Диск виконаний прорезинним. Випробування за цим стандартом дозволяють одержувати дані про зносостійкість сталей, сплавів наплавочних зносостійких покриттів, металокераміки і полімерів.

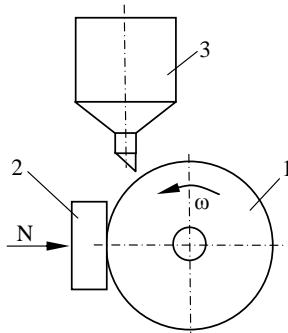


Рис. 9.10 Схема випробувань на абразивне зношування за Бринелем

Контакт диска з плоским трибоелементом передбачений також в випробуваннях за ГОСТ 23208–79. Відмінність останнього від стандарту США полягає лише в тому, що досліджуваний трибоелемент (колодка) розташовується горизонтально і притискається до гумового обертового диска знизу, а абразивні частки потрапляють у зону тертя по похилому лотку.

Для дослідження зношування тіл кочення при потраплянні в зону тертя абразивних часток застосовують схему контакту двох обертових дисків.

10 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

10.1 Теорія моделювання і можливості її застосування в трібології

Сучасний етап розвитку техніки характеризується значним зростанням термінів служби і підвищення рівнів надійності комплексів, а також машин, механізмів, приладів та інших промислових виробів, що входять до їх складу. У цих умовах звичайні методи визначення якості дослідних і серійних виробів, тривалі стендові випробування натурних об'єктів (трібосистем) стають неприйнятними, оскільки терміни служби досягають декількох років або навіть десятків років. У зв'язку з цим проблема розробки і застосування методів прискорених випробувань набула характеру загальної технічної проблеми.

На сьогодні одержали найбільше поширення два методи скорочення тривалості випробування виробів: прогнозування ресурсу (надійності) за результатами вироблення випробуванним виробом частини ресурсу при номінальних режимах навантаження; застосування при випробуваннях форсованих режимів, тобто більш жорстких, ніж в експлуатації.

Прискорення випробувань за рахунок одного, так званого визначального параметра, впливає на процеси тертя і зношування та вироблення ресурсу окремими елементами виробу і дозволяє лише провести випробування слабкої ланки, а не тріботехнічної системи в цілому. Тому необхідно застосовувати моделі, загальні принципи і положення яких можуть бути основою для розробки особистої методики випробувань виробів. Така модель повинна описувати, насамперед, фізичну суть процесів, що відбивають зв'язок конструктивних і технологічних особливостей машини і їх деталей, з умовами експлуатації.

Критерії подібності для досліджуваної фізичної системи можуть бути визначені методом подібності, розмірності, енергетичним та іншими, але обов'язково повинні мати сферу застосування, обмежену умовами адекватності фізичних полів у моделі і у натурного об'єкта. Обмеження меж зміни навантаження (ступінь форсування) здійснюється з урахуванням максимально припустимих меж їхнього застосування, встановлюваних аналітично або на підставі попередніх експериментів.

10.2 Фізичне моделювання

При розробці конструкції трібосистеми і виборі матеріалів для нього виникає необхідність вивчення впливу змінних умов, що визначають поведінку реального складного об'єкта. Звичайно при цьому мають неповну вихідну інформацію: недостатньо вивчений фізичний зміст процесів на фрикційному контакті, особливо для нових класів матеріалів, невідомий математичний опис або метод його розв'язання. Такого роду трібологічні задачі успішно вирішуються за допомогою фізичного моделювання.

Фізичним моделюванням називають дослідження фізично подібних про-

цесів на установках, що зберігають фізичну природу явищ, але відтворюють їх в інших розмірах у розумінні геометричному або фізичному.

Особливістю моделі при фізичному моделюванні є її однакова природа з натурним об'єктом (натурою), тобто в обох випадках застосовуються ті самі: кінематичні схеми контакту; розташування матеріалів у рухомого і нерухомого трибоелементів; коефіцієнт взаємного перекриття; мастильні матеріали.

За допомогою фізичного моделювання вирішуються задачі виявлення залежностей коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування і температури тертя від узагальненої інформації про функціонування і властивості трибосистем. Закон моделювання визначається у вигляді розрахункового масштабного фактора, що є сукупністю всіх масштабних коефіцієнтів переходу від моделі до натури для параметрів режиму роботи, матеріалів трибосистем і конструкції, включених до критеріїв подібності. Для накопичення інформації в банках даних дуже важливо використовувати при випробуваннях серійні машини тертя і типові трибоелементи, що дозволить надалі порівнювати без перерахувань результати, отримані різними дослідниками. Можливі реалізації випробувань на малогабаритних моделях у зміненому (звичайно прискореному) масштабі часу і оцінювання точності моделювання.

Зв'язки між параметрами моделі і натури попередньо встановлюються розрахунковим шляхом. Розрахункам звичайно передують трьохетапний аналіз моделюючих трибоспрямлень.

По-перше, система розчленовується на підсистеми у вигляді графічних моделей, для кожної з яких застосовні такі фундаментальні фізичні моделі, як механічна (рис. 10.1, *a*), теплофізична (розподілу теплових потоків між елементами трибосистеми рис. 10.1, *б*), макроконтрактування (рис. 10.1, *в*, A_c і A_r змінюються в часі за значенням і взаємним розташуванням), мікроконтрактування (рис. 10.1, *г*, генерується теплота, можливе зрушення тонкого шару, що включає окисні плівки або плівки мастильного матеріалу). Показана на рис. 10.1 модель може бути доповнена підмоделями електричних явищ, хімічних перетворень тощо. Для кожної підсистеми виявляються на основі апріорної інформації види порушення фрикційного зв'язку за І.В. Крагельським (рис. 10.2).

По-друге, на основі аналізу графічного зображення підсистем будується ієрархічна модель, метою якої є виявлення визначальних, основних і побічних параметрів. Визначальні параметри впливають на всі підсистеми, основні – тільки в межах однієї або декількох підсистем, побічні – впливають несуттєво (до 10...15 %) на тертя або зношування.

По-третє, встановлюється зв'язок між функціональними залежностями $f_m = \psi(p_{m1}, p_{m2}, p_{m3}, \dots, p_{mi})$ вихідних характеристик (коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування, температури тертя) від параметрів від p_1 до p_i досліджуваного процесу для моделі і аналогічних залежностей для натури $f_n = \psi(p_{n1}, p_{n2}, p_{n3}, \dots, p_{ni})$. Наприклад, p_1 – швидкість, p_2 – навантаження, p_3 – коефіцієнт взаємного перекриття та інші.

Для встановлення такого зв'язку застосовують методи розмірності, поді-

бності, енергетичний, енергоінформаційний та їх комбінації. Ці методи дають позитивні результати і у тих випадках, коли невідомий математичний опис процесів, що складається методами математичної фізики.

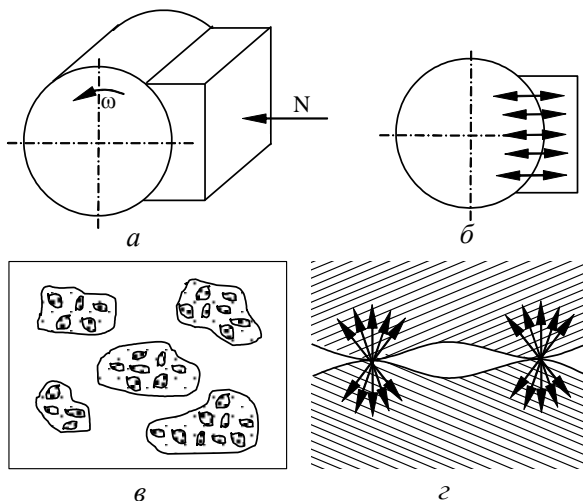


Рис. 10.1. Графічна модель процесу тертя. Підмоделі: *a* – механічна; *б* – теплофізична; *в, г* – макроконтрактування і мікроконтрактування елементів трібосистем

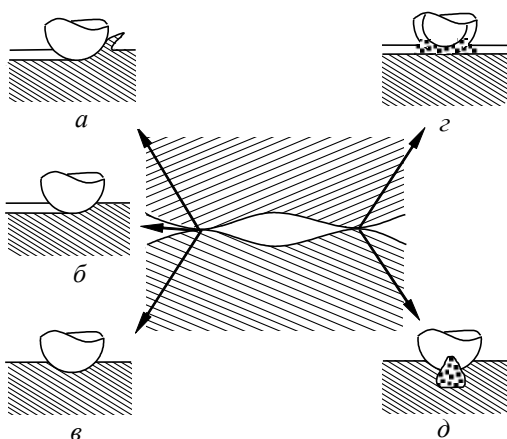


Рис. 10.2. Основні види порушення фрикційних зв'язків (руйнування мікроконтакту при зношуванні по І.В. Крагельському): *a* – абразивне ($n = 1$); *б* – пластичне відтискування ($1 < n < \infty$), n – число циклів до руйнування; *в* – утомне ($n \rightarrow \infty$); *г* – адгезійне руйнування плівок, що схоплюються, ($n = 1$); *д* – заїдання

При реалізації методів визначення закону фізичного моделювання обов'язково враховуються додаткові положення. Так, випадковий вибір масштабних коефіцієнтів при визначенні закону моделювання неприпустимий, тому що добуток ступеневих функцій масштабних коефіцієнтів підлягає суворій залежності. Складні системи подібні, якщо подібні всі складові їх підсистеми. Складні системи залишаються подібними, якщо до них приєднується будь-яка кількість подібних підсистем, що особливо важливо для так званих систем, що розвиваються, коли в міру одержання додаткової інформації, наприклад, про явища на фрикційному контакті, пов'язаних з появою трибоелектрики, створюється відповідна нова підмодель. Подібні процеси, що протікають у геометрично неподібних системах, мають пропорційні подібні характеристики в геометричних подібних точках.

Імовірнісні (стохастичні) системи подібні, якщо виконується умова пропорційності математичних очікувань або дисперсій подібних параметрів моделі і натури. При цьому варто враховувати, що композиція досить великої кількості практично довільних законів розподілу дає результуючий розподіл, як бажане близьке до нормального.

Фізичне моделювання базується на трьох теоремах аналізу подібності. Існують різні варіанти формулювань цих теорем, але зупинимося на тих з них, що найбільш корисні для фізичного моделювання у трибології.

Перша теорема подібності. У подібних явищ визначені сполучення параметрів, критерії подібності чисельно рівні. Прикладом таких сполучень параметрів є узагальнені змінні. Під критерієм подібності мається на увазі узагальнена змінна – безрозмірний комплекс фізичних величин, що визначає той чи інший фізичний процес. Деякі критерії при моделюванні вироджуються в симплекси – відношення однойменних фізичних величин. Прикладом симплекса є широко застосовуване в теорії тертя відношення висоти нерівності до її радіуса. Критерії можна множити або ділити один на один або на один з них, а також на постійну величину, підносити до степеня, одержуючи нові критерії. Метод одержання узагальненої змінної розглянутий нижче.

Друга теорема подібності. Первинну інформацію, задану у вигляді співвідношення між m розмірними параметрами, що визначають фізичний процес, можна перетворити на вторинну інформацію у вигляді n безрозмірних узагальнених змінних, де $n = m - k$. Тут k – кількість основних одиниць, розмірність яких незалежна і які не можуть бути об'єднані в яку-небудь узагальнену змінну.

Третя теорема подібності. Необхідною і достатньою умовою подібності систем є пропорційність усіх подібних характеристик, що входять в умови однозначності. Умови однозначності, або граничні крайові умови досліджуваних явищ, включають такі: геометричні, що характеризують форму і розміри елементів трибосистеми, наприклад, комплекс геометричних розмірів; фізичні, що характеризують фізичні властивості середовища і контактуючих тіл, наприклад, їхні теплофізичні і механічні характеристики; граничні, що характеризують особливості протікання процесу на границях тіл, що пов'язано з теплоутворенням і окиснюванням у зоні контакту, і, нарешті, часові, що

характеризують особливості протікання процесу в часі, тобто його стаціонарність або не стаціонарність.

Узагальнені змінні можуть бути отримані одним із трьох найбільш розповсюджених способів: методом подібності, методом розмірності або з загальних фізичних міркувань. Узагальнені змінні використовуються для рішення трьох класів задач, що належать до сфери фізичного моделювання. Перший клас – це зменшення обсягу вихідної інформації шляхом об'єднання параметрів в узагальненій змінній і виявлення залежностей вихідних характеристик (коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування) від тієї чи іншої узагальненої змінної і надалі прогнозування на підставі цих даних працездатності тріботехнічної системи (рис. 10.3). Другий клас – це розрахунок масштабного фактора і з урахуванням останнього призначення для моделі таких режимів випробування, що забезпечують одержання на моделі трібологічних характеристик, близьких до натурних, і, нарешті, третій клас – факторне планування тріботехнічного експерименту, коли як фактори використовують узагальнену змінну. Застосовуючи узагальнену змінну вдається скоротити кількість змінних, об'єм експериментів і подавати інформацію в стиснутій формі у вигляді рівняння.

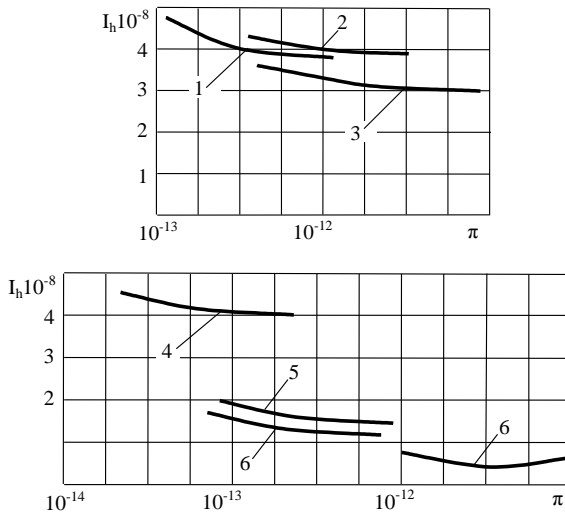


Рис. 10.3 Залежність інтенсивності лінійного зносу I_h від узагальненої змінної $\pi = m_{1,2} a_{1,2}^{3/2} D_{1,2}^3 / HB_{1,2}$ на прикладі металічних (а) і порошкових (б) матеріалів контактних вставок з залізграфіту:

- 1 – Al-9; 2 – ZnAl; 3 – АСЧ-2; 4 – ЖГр-2; 5 – ЖГр-3; 6 – ЖГр-4; 7 – ЖГр-5

В тріботехнічних задачах узагальнена змінна може виявлятися різними методами подібності і розмірності. Розрахунок масштабного фактору показаний в табл. 10.1.

Таблиця 10.1 Обов'язкові операції, які використовуються при фізичному моделюванні

Операція	Результат	Математичний вираз	Галузь використання
Розробка графічної моделі трибологічного процесу (системи)	Урахування параметрів, які визначають систему в цілому і кожну підсистему	p_{111}, p_{112} або p_{411}, p_{412} , наприклад, $\lambda_{111}, \lambda_{112}$	Вибір вихідних даних для отримання УЗ
Розробка структурної ієрархічної моделі системи	Виявлення взаємодії між системою і підсистемами	—	Виявлення визначних, основних і побічних параметрів. Призначення базисних параметрів
Отримання узагальненої змінної	Об'єднання визначних і основних параметрів в безрозмірні комплекси	$\pi_1 = \frac{p_{1g}}{p_{11}^{D_{11}/D_{01}} p_{12}^{D_{12}/D_{01}} p_{13}^{D_{13}/D_{01}}}$ $\pi_i = \frac{p_{ig}}{p_{i1}^{D_{i1}/D_{01}} p_{i2}^{D_{i2}/D_{01}} p_{i3}^{D_{i3}/D_{01}}}$	Прогнозування вихідних характеристик (f, I) трибоспряження, систематизація результатів і планування експерименту
Розрахунок масштабного фактора при умові подібності моделі і природи	Отримання масштабних коефіцієнтів переходу від моделі до природи для кожного параметру матеріалу, конструкції, процесу	$p_m = p_{n11} C_{z1,2}^{\alpha 1}, \dots$ $\dots, p_{mi1} = p_{ni1} C_{z1,2}^{\alpha i}$	Прискорене отримання на моделях вихідних характеристик трибоспряження
Планування модельного експерименту	Вибір стратегії, яка дозволяє зменшити об'єм експериментів і подати інформацію в стислому вигляді	Наприклад, $f = K_1 - K_2 \pi_1 - K_3 \pi_2 + K_4 \pi_3 + \dots$	Організація лабораторних модельних випробувань і формування за їх результатами банку трибологічних даних
Оцінювання достовірності випробувань	Нормування допустимої похибки	$\varepsilon^2 = z_{\alpha}^2 \sigma^2 / n$	Виробка рекомендацій щодо проектування і ремонту трибоспряжень

Метод подібності дозволяє одержати узагальнену змінну у рамках математичної моделі, раніше складеної і апробованої. При цьому враховується правило розмірності Фур'є, відповідно до якого розмірність у лівій і правій частинах рівняння повинна бути однаковою, і вимагає, щоб узагальнена змінна була безрозмірною.

Таким чином, маючи рівняння (алгебраїчне, диференціальне, інтегральне) виду $AB + CD = E$, необхідно для одержання узагальненої змінної ліву частину поділити на праву. У результаті можуть бути використані дві узагальнені змінні: AB/E і CD/E .

Метод розмірності не обмежений рамками певної визначеної моделі, тому завжди існує небезпека одержання з його допомогою узагальнених змінних, некоректних з позицій фізики.

Одержання узагальненої змінної методом розмірності складається з трьох послідовних етапів:

- вибір базисних параметрів, порівняння і рішення базисного дільника;
- зв'язок з базисними параметрами інших розмірних величин;
- на основі перших двох етапів записується формула узагальненої змінної і перевіряється на безрозмірність.

1-й етап. У системі основних одиниць MLT (кг,м,с) будь-який параметр трібоспряження (швидкість, навантаження і т. ін.) може бути позначений $p_{11} = [M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\gamma_1}]$.

Якщо з метою одержання замкнутого математичного опису вибрати три базисних параметри, то базисний визначник (детермінант) буде мати такий вигляд:

$$D_0 = \begin{matrix} & M & L & T \\ p_{11} & \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ p_{13} & \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ p_{13} & \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{matrix} \quad , \text{ де } D_0 \neq 0 . \quad (10.1)$$

2-й етап. Для параметра $p_{15} = [M^{\alpha_5} L^{\beta_5} T^{\gamma_5}]$, замінивши по черзі рядки в базисному визначнику рядком з розмірністю цього параметра, отримаємо:

$$D_{511} = \begin{vmatrix} \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{vmatrix} ; D_{512} = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{vmatrix} ; D_{513} = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 \end{vmatrix} . (10.2)$$

Рядок з розмірністю параметра p_{15} спочатку займає місце рядка з розмірністю параметра p_{11} (верхній визначник), після параметра p_{12} (середній визначник) і параметра p_{13} (нижній визначник).

3-й етап. Узагальнена змінна для параметра p_{15} буде мати вигляд:

$$\pi_{p15} = \frac{P_{15}}{P_{11}^{D_{011}/D_0} P_{12}^{D_{012}/D_0} P_{13}^{D_{013}/D_0}}. \quad (10.3)$$

Приклад. Для отримання узагальненої змінної з базисними параметрами ν , P , $K_{e_{1,2}}$ зв'язати щільність обох матеріалів $\rho_{1,2}$ трібосистеми.

$$D_0 = \begin{matrix} & M & L & T \\ \nu & \left| \begin{array}{ccc} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 6 & 0 \end{array} \right| & = -6; & D_{011} = \left| \begin{array}{ccc} 2 & -6 & 0 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 6 & 0 \end{array} \right| = 24; \\ P & & & \\ K_{e_{1,2}} & & & \end{matrix}$$

$$D_{012} = \begin{matrix} & M & L & T \\ \left| \begin{array}{ccc} 0 & 1 & -1 \\ 2 & -6 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \end{array} \right| & = -12; & D_{013} = \left| \begin{array}{ccc} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 2 & -6 & 0 \end{array} \right| = 4. \end{matrix}$$

Узагальнена змінна (безрозмірна)

$$\pi_{p1,2} = \frac{\rho_{1,2}}{\nu^{24/-6} p^{-12/-6} K_{e_{1,2}}^{4/-6}} = \frac{\rho_{1,2} \nu^4}{p_a^2} = \frac{1}{Ne_{1,2}},$$

де Ne – критерій Ньютона.

10.3 Математичне, імітаційне і аналогове моделювання

Математичне моделювання засноване на математичній подібності і на ізоморфізмі рівнянь, тобто здатності їх описувати різні за природою явища і виявляти різні функціональні зв'язки, використовуючи здатність рівнянь описувати окремі сторони поведінки системи.

Теорія подібності є основою для створення алгоритму певної послідовності обчислювальних операцій, що пов'язує методи експерименту з обчислювальною технікою.

При побудові моделі реальне явище неминуче спрощується, схематизується, і ця схема (графічна модель явища) описується за допомогою того чи іншого математичного апарата.

Модель створюється з урахуванням цільової спрямованості мети дослідження, необхідної точності і попередньо відомої інформації. Так, якщо вихідні дані, використовувані в розрахунках, відомі неточно, мають стохастичну природу та істотне розсіювання, то, мабуть, невиправданою є розробка дуже точної моделі і великі витрати часу на тонку та точну оптимізацію рішення.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні і статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують меншу кількість факторів,

завжди вимагають певних допущень і спрощень. Однак результати розрахунку по них легше оглядові, чітко відбивають властиві явищу основні закономірності і, головне, більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Статистичні моделі в порівнянні з аналітичними більш точні і докладні, не вимагають настільки грубих допущень, дозволяють врахувати велику (теоретично – необмежено велику) кількість факторів. Недоліки – громіздкість, погана видимість, велика витрата машинного часу, а головне, крайні труднощі пошуку оптимальних рішень, що доводиться знаходити методом спроб і здогадів.

Імітаційне моделювання – методологія експериментально-теоретичного вирішення технічних задач керування складним трібосприянням.

Імітаційне моделювання застосовується для процесів, у хід яких може час від часу втручатися людина (або група людей). Людина, що керує операцією (випробувач), може в залежності від сформованої обстановки приймати ті або інші рішення. Потім приводиться в дію математична модель, що показує, яка очікується зміна обставин у відповідь на це рішення і до яких наслідків воно призведе через деякий час. Наступне рішення керівника приймається вже з урахуванням нових обставин. У результаті багаторазового повторення такої процедури керівник приймає найбільш правильне рішення, яке можна віднести до числа оптимальних.

Імітаційна модель являє собою сукупність взаємодіючих елементів: компонентів (підсистем), параметрів, змінних, функціональних залежностей, обмежень, цільових функцій.

Компоненти є підсистемами загального трібосприяння. Іноді підсистема може бути вироджена до розмірів окремого елемента. Змінні – частина параметрів системи (підсистеми), що можуть набувати значення, обумовлені видом функціональної залежності. Як обмеження випробувачем установлюються границі застосування трібосистеми за швидкістю, навантаженням, температурою.

Перед побудовою імітаційної моделі аналізується апріорна інформація про працездатність трібосприяння, його підсистем і елементів.

На відміну від методів аналогового і аналітичного (математичного) моделювання імітаційна модель дозволяє, по-перше, скоротити час рахунку, по-друге, замінити рішення частин задачі (підсистеми), що не мають коректного математичного опису, на експериментальне одержанням емпіричних залежностей, що використовуються при вирішенні задачі (системи) у цілому.

Аналогове моделювання. Цей вид моделювання базується на однаковому для моделі і природи математичному описі і використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи за її елементами. При цьому кожному з фізичних елементів природи в моделі відповідає визначений еквівалент.

Як моделі використовуються електричні ланцюги, складені з пасивних елементів L , C , R , джерел струму і напруги і електронних операційних підсилювачів. Конструктивно вони реалізуються у вигляді систем, що являють собою тверде або рідке провідне середовище, відповідно до підбраної форми, або, що складаються з пасивних елементів електричного ланцюга, або, наре-

штті, що містять, поряд з пасивними блоками, елементи з операційними підсилювачами. Теплопровідність матеріалів моделюється електропровідністю, теплоємність – електричною ємністю, тепловий потік – електричним струмом, що підводиться до моделі і т. ін. З урахуванням передбачуваних меж зміни змінних, установлюють для операційних підсилювачів масштаби (константи подібності). Значення максимумів і мінімумів призначають на підставі аналізу умов подібності.

В електричному аналоговому моделюванні теплових і силових полів у трібосистемах застосовують метод суцільних середовищ і метод електричних сіток. У першому випадку моделлю служить поле електричного струму в суцільному провідному середовищі, наприклад, у вигляді пластин з паперу або пластмаси. В другому – застосовують електричні ланцюги з зосередженими параметрами. Модель у цьому випадку являє собою електричну мережу, у якій дискретно розміщені схеми заміщення. Сфера застосування методу суцільних середовищ, що відрізняється простотою і більшою точністю відповідності між граничними умовами природи і моделі, обмежена задачами математичної фізики, які зводяться до рівнянь Лапласа. Метод електричних мереж більш універсальний і використовується, звичайно для дослідження неоднорідних фізичних полів. Зокрема, за допомогою електропровідного паперу різних сортів були імітовані різні теплофізичні властивості матеріалів трібосистеми сірий чавун СЧ 18-36 (гальмовий барабан) – фрикційна асбополімерна композиція 6КХ-4Б (гальмова накладка). Методом аналогового моделювання були оцінені коефіцієнти розподілу теплових потоків, вплив кута охоплення, ширина доріжки тертя і інших конструктивних параметрів на температуру поверхні тертя, співвідношення між максимальними значеннями температури передніх і основних коліс транспортного засобу.

10.4 Використання електрофізичних методів діагностування трібосистем

Електричні методи діагностування. Для дослідження динамічної рівноваги процесів утворення і руйнування вторинних структур при терті розроблені спеціальні методи, засновані на вимірюванні величини електродного потенціалу і вентильного ефекту. Для вимірювання електродного потенціалу в мастильний матеріал вводять електрод, ізольований від тертьових поверхонь, заміряють електрорушійну силу між електродом і тертьовими поверхнями і визначають руйнування вторинних структур на робочих поверхнях за зміною величини електрорушійної сили. Схема контролю роботи трібосистеми за описаним способом показана на рис. 10.4. Трібосистема 3 і електрод 2 занурені у ванну з мастильним матеріалом 4. Навантаження трібосистеми здійснюється за допомогою пристрою 5. На поверхні випробуваної трібосистеми, що стикається з робочим середовищем, установлюється певний електричний потенціал, який разом з потенціалом електрода 2 дає певну різницю потенціалів, яка реєструється вимірювальним приладом 1.

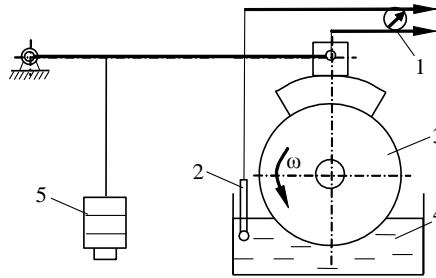


Рис. 10.4 Схема контролю роботи трібосистеми шляхом реєстрації електрохімічного потенціалу

У момент початку роботи трібосистеми і дії навантаження відбувається руйнування вихідних найтонших окисних шарів, що призводить до зміни електричного потенціалу на поверхні трібосистеми. Ця зміна реєструється вимірювальним приладом у вигляді початкового стрибка потенціалу. Надалі при сталому режимі нормального механохімічного зношування, поряд з руйнуванням вторинних поверхневих шарів (окисних плівок) відбувається утворення нових. Настає динамічна рівновага між процесами руйнування і утворення поверхневих окисних плівок, і величина потенціалу буде знаходитися на якомусь певному, що не змінюється з часом, рівні.

При переході до пошкоджуваності швидкість руйнування окисних плівок переважає над швидкістю їхнього утворення. У цих умовах величина потенціалу не стабілізується. Це сигналізує про настання аварійного режиму задовго до появи таких ознак, як шуми, биття і т. ін. За другим способом з метою підвищення точності контролю режиму тертя через трібосистему пропускають асиметричний змінний струм і вимірюють постійну складового струму в ланцюзі.

На рис. 10.5 показана схема включення трібосистеми в електричне коло, а на рис. 10.6 – осцилограма струму, що відповідає трьом різним режимам тертя.

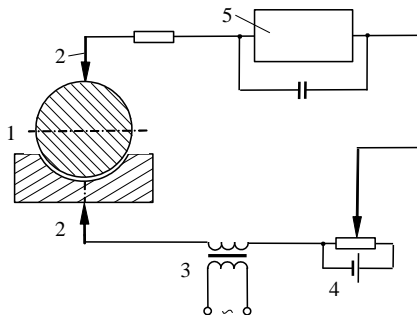


Рис. 10.5 Схема включення трібосистеми в електричне коло



Рис. 10.6 Осцилограма струму, відповідна трьом різним режимам тертя

Трібосистема 1 включена в електричний ланцюг, що містить струмознімачі 2 для приєднання до трібосистеми, джерела змінного струму 3 і джерело постійного струму 4, що утворюють у сукупності джерело асиметричного змінного струму, і апаратуру 5, який реєструє постійну складову струму в ланцюзі.

При роботі трібосистеми постійна складової струму в ланцюзі при терті в умовах граничного мащення складається з постійного струму асиметрії і частини змінного струму, випрямленого граничними шарами мащення і плівками вторинних структур унаслідок прояву вентильного ефекту (ділянка А на рис. 10.6). При терті в умовах гідродинамічного мащення ця складова відсутня (ділянка Б на рис. 10.6). При терті, що супроводжується пошкодженнями контактуючих поверхонь у результаті захоплення, яке дорівнює величині постійного струму асиметрії, тобто вентильний ефект відсутній і випрямлена частина струму дорівнює нулю (ділянка В на рис. 10.6).

Використання описаної схеми дозволяє з високою точністю визначити режим тертя, оскільки постійна складова току в ланці суттєво змінюється зі зміною режиму тертя.

Електромеханічний метод діагностування зносу. Важливою рисою трібологічних досліджень є можливість простежити динаміку зміни геометрії елементів при випробуваннях на тертя і знос.

Більшість сучасних методів вимірювання зносу припускають зупинку випробувань. Величина зносу при цьому визначається як сумарний показник за певний проміжок часу або на певному відрізку шляху тертя. Це не дозволяє судити про динаміку протікання процесу зносу і визначати, на яких етапах він проходить з більшою, а на яких з меншою інтенсивністю.

У зв'язку з цим актуальною є розробка пристрою, що дозволяв би стежити за динамікою протікання процесу зношування без припинення експерименту протягом усього його часу.

Сучасний стан трібології дозволяє зробити тертя творчим процесом, що самоорганізується. Це сприяло розробці нових методів і засобів відновлення зношених трібосистем машин і устаткування, у тому числі і без їхнього розбирання.

Запропонований пристрій дозволяє безупинно реєструвати зміну геометрії (знос або нарощування поверхневого шару) зразків з високою точністю

при випробуваннях їх на серійній машині тертя 2070 СМТ-1. У ньому пошкодження від биття валів і рухомої каретки машини цілком виключаються завдяки закріпленню всього пристрою на самій цій каретці.

Конструкція і принцип дії подібних пристроїв припускають відсутність температурних розширень випробуваних зразків і всіх елементів кінематичної схеми. Для забезпечення цієї умови для пристрою виготовлена система мащення і терморегулювання (рис. 10.7), яка дозволяє після стабілізації температури всієї системи підтримувати її на постійному рівні.

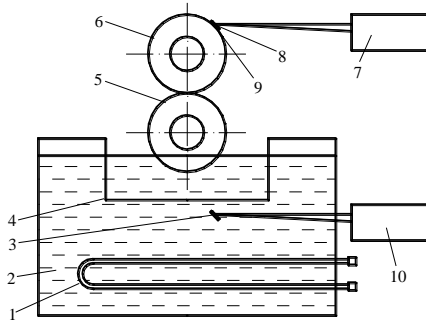


Рис. 10.7 Система мащення і терморегулювання

Мащення здійснюється зануренням нижнього ролика 5 у ванночку з робочою оливою 4. Сама ця ванночка занурена у ванну 2 з нагрітою оливою. Тепло в систему підводиться зануреним у ванну 2 електронагрівальним закритого типу 1. Підтримка температури системи на заданому рівні здійснюється електронним регулятором температури Щ 4531 (10), сигнал на який надходить від термометра 3, зануреного у ванну 2. Контроль за рівнем і стабілізацією температури верхнього (вимірюваного) диска здійснюється методом ковзної термометрії, що дозволяє проводити точні вимірювання швидкозмінюваних температурних полів. Як чутливий елемент використовувалася хромель-копелева термопара типу ХК-7, що дозволяє вимірювати температуру в інтервалі 0...300 °С. Особливістю цієї термометрії є те, що спай хромель-копелевої пари 8 змонтована на мідній пластинці 9, що за допомогою пластинчастої пружини притискається до поверхні верхнього елемента 6. Сигнал від термометрії надходить на електричний реєстратор температури 7.

Термопара з виводом спаю на мідну пластину забезпечує точне і без інерційне вимірювання температури і може використовуватися практично необмежений час, у той час, як звичайна термопара, у якій з поверхнею обертового зразка контактує безпосередньо спай, зношується вже через 20...30 годин роботи і підлягає заміні.

Тарування термометрії здійснюється звичайним способом. Ця система дозволяє підтримувати температуру робочої рідини і зразків на заданому рівні з

точністю до одного градуса.

Кінематична і електрична схеми пристрою показані на рис. 10.8 і 10.9. Більш докладно зупинимося на конструкції і роботі пристрою. Механічна частина являє собою підйомний пристрій, закріплений на каретці машини тертя 2070 СМТ-1 (рис. 10.8). Важіль 6 обертається на осі 4 у прецизійних підшипниках, що знаходяться усередині корпусу 5. Корпус жорстко за допомогою болтів закріплений через профіль 3 до каретки 1. До неї ж через той же профіль прикріплена стійка 2. Важіль на 1/3 довжини від осі торкається випробовуваного ролика. У місці дотику на важелі закріплений підшипник 7, що вільно обертається при обертанні випробовуваних роликів. На кінці важеля також установлений підшипник 13, що у випадку зміни положення важеля (знос або нарощування на зразку) передає обертання через спеціально спрофільовану качалку 14 до мультиплікатора 15. Вихідний вал мультиплікатора через втулку жорстко з'єднаний з валом потенціометра 16, що дозволяє одержувати зміну електричного сигналу як при підйомі, так і при опусканні важеля. Живлення потенціометра здійснюється від елемента постійного струму 1,5 В E_1 великої ємності через додатковий опір R_1 . Вимикання джерела живлення здійснюється вимикачем B . Змінний опір R_2 зібрано з потенціометром у мостову схему і служить для установки нуля на приладі. Реєстрація лінійного зносу проводиться за допомогою високочутливого самописа Н306.

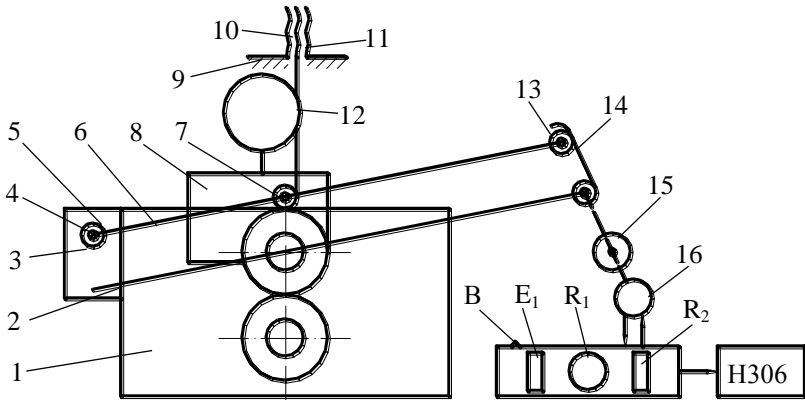


Рис. 10.8. Кінематична схема пристрою

У результаті зносу зразків або утворення на їх поверхні нарощеного шару відбувається опускання або підняття важеля, а значить і переміщення повзуна потенціометра. Це призводить до розбалансування мостової схеми, і на прибор-реєстратор Н306 подається електричний сигнал, який прямо пропорційний зміні розміру верхнього ролика.

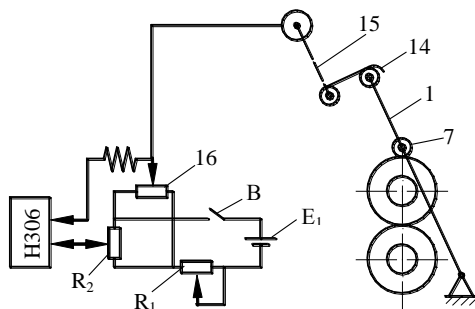


Рис. 10.9. Електрична схема пристрою

Передаточна кількість мультиплікатора розрахована з урахуванням реальних вимірюваних величин і складає 1:40.

Для тарування пристрою в місці кріплення підшипника 8 за допомогою кронштейна 14 до стійки 6 жорстко прикріплений мікрометричний індикатор годинникового типу 15 (ГОСТ 577–68), голка якого спирається на важіль 1.

Тарування вимірювального пристрою здійснюється за допомогою жорстко закріпленого на важелі 1 болта 16, на якому обертається гайка 17, спираючись на обмежник 18 і піднімаючи, таким чином, важіль 1 щодо випробуваних трібоелементів.

При відхиленні важеля був побудований тарувальний графік (рис. 10.10) з використанням показань мікрометричного індикатора годинникового типу 15, що дозволяє за показниками самописа H306 дізнатися про фактичну зміну лінійних розмірів зразків. Як видно з графіка, одному міліметру діаграми реєстратора відповідає $4,9 \cdot 10^{-5}$ мм зміни розміру зразка. Таким чином, про точність пристрою можна говорити як про $0,49 \cdot 10^{-9}$ м. Однак його чутливість обмежена шириною "волоска" потенціометричного датчика. Поки його контакт знаходиться в межах одного "волоска", показання приладу не змінюються.

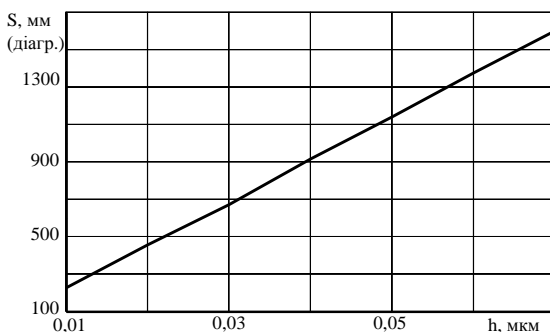


Рис. 10.10 Тарувальний графік пристрою

Вимірювання проводяться в такій послідовності. Випробувані ролики навантажують до необхідного рівня. Відбувається деформація валів машини тертя і випробуваних зразків у місці лінійного контакту, а також деформація і вибір зазорів в механічних елементах вимірювального пристрою.

Далі протягом тривалого часу (до 2-х годин) відбувається нагрівання всієї системи. Поступово теплові потоки вирівнюються і настає температурний баланс системи, що фіксується на реєстраторі 7, рис. 10.9, температури верхнього зразка.

За цей час відбувається його теплове розширення, що чітко відобразалося датчиком вимірювання зносу (наросту) із записом на реєстраторі Н306. Реєстрація електричного сигналу від датчика відбувається в каналі "У". Переміщення по осі "Х" здійснювалося ручкою "Уст. 0" на 5 мм через кожні 5 хв. При досягненні граничного значення відхилення пера самописа (20 см) воно переміщається на нульову відмітку за допомогою ручки потенціометра R_2 . В результаті виходить діаграма (рис. 10.11), за якою можна будувати графік зміни геометрії зразків за часом. Сумарний знос або нарощування оцінюється простим додаванням довжин відповідних ділянок 1, 2, 3 діаграми. У нашому випадку загальне відхилення пера самописа складає 560 мм, що відповідає зміні геометрії зразка на 0,02744 мм. Недоліком такого способу реєстрації результатів є необхідність постійної участі в процесі оператора. Цього можна уникнути, застосувавши інший високочутливий реєстратор з постійним протягуванням діаграмної стрічки або підключивши замість цього комп'ютер.

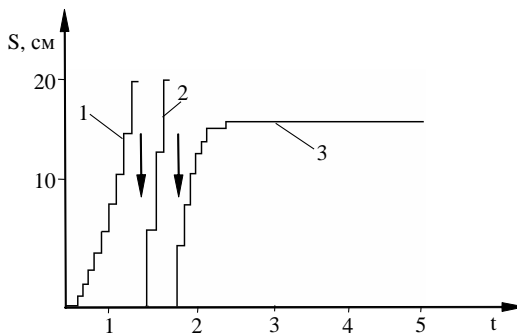


Рис. 10.11 Діаграма реєстрації зміни геометрії зразка

Одночасно це відобразалося на індикаторі годинникового типу 12 (рис. 10.8), тому був побудований уточнюючий тарувальний графік, який добре корелюється з першим. Надалі, при зміні умов експерименту або внесенні змін у конструкцію пристрою, що реєструє, цей метод тарування (заснований на тепловому розширенні) може вважатися найбільш прийнятним.

При досягненні теплового балансу на реєстраторі Н306 відзначається нульовий приріст, тобто стабілізація показань реєстратора за каналом "У". Те-

пер пристрій готовий до реєстрації зносу або товщини нарощеного шару на елементі.

Такий пристрій без зміни конструкції можна використовувати і при випробуваннях за схемою "колодка-ролик" при дослідженні тертя ковзання.

Недоліком застосування цього пристрою можна вважати очікування настання температурного балансу системи. Знос, що відбувається в цей час, залишається незафіксованим. Однак при терті кочення знос за цей проміжок часу настільки незначний, що ним можна знехтувати. З іншого боку, чим інтенсивніше зношується трібосистема, тим швидше настає тепловий баланс у системі за рахунок більш інтенсивного тепловиділення. Таким чином, цю похибку у більшості випадків можна вважати незначною.

Авторами даного підручника проведена велика кількість випробувань з використанням цього пристрою. Отримані результати дозволяють говорити про розглянутий пристрій як про надійний і точний інструмент дослідження динаміки і величини зміни геометрії зразків при випробуваннях на машині тертя 70 СМТ-1.

Акустично-емісійний метод трібодіагностики. Підбір зносостійких матеріалів і мастильних середовищ для агрегатів техніки є дуже складною, дорогою і недостатньо розробленою задачею. Існують різні підходи до скорочення тривалості такого роду випробувань, суть яких зводиться до двох напрямків:

- збільшення навантаження при випробуваннях;
- застосування методів безперервної реєстрації електричних і акустичних полів, випромінювання яких обумовлене процесами поверхневого руйнування.

Перший напрямок знайшов обмежене застосування, оскільки при цьому порушується аналогія між експериментом і реальними умовами роботи трібоспряджень.

Другий напрямок визнаний перспективним. Особливо привабливим є метод акустичної емісії (АЕ). Застосування цього методу теоретично обґрунтоване, оскільки акустико-емісійне випромінювання прямо пов'язане з масштабом поверхневих руйнувань при терті, фізико-механічними властивостями матеріалів, їхніми структурними станами.

Бурхливий розвиток обчислювальної техніки і статистичних методів аналізу параметрів акустико-емісійного випромінювання поставили на порядок денний розробку автоматизованих систем безперервного контролю за процесами зношування в реальному масштабі часу проведення випробувань. Вони можуть дозволити контролювати знос у всьому динамічному діапазоні від відділення першої частки зносу і до величини інтенсивності зношування, властивих перехідним режимам, а також на постійних режимах їхньої роботи.

Крім того, важливою задачею трібологічних досліджень є можливість проследити динаміку зміни геометрії елементів при випробуваннях на тертя і знос.

Більшість сучасних методів вимірювання зносу передбачають зупинку

випробувань. Величина зносу при цьому визначається як сумарний показник за певний проміжок часу або на певному відрізку шляху тертя. Це не дозволяє судити про динаміку протікання процесу зносу і визначати, на яких етапах він проходить з більшою, а на яких з меншою інтенсивністю.

У зв'язку з цим актуальною є розробка пристрою, що дозволяє стежити за динамікою протікання процесу зношування без припинення експерименту протягом усього його часу.

Поєднуючи ці дві проблеми, що стоять перед конструктором на попередньому етапі проектування трібоспряжень, очевидно стає необхідність створення системи автоматичного контролю параметрів процесу випробувань на тертя і зношування.

Така система розроблена авторами підручника. Вона складається з пристрою для безперервної реєстрації геометрії зразків, що випробуються на тертя і знос, яким доукомплектується стандартна машина тертя 2070 СМТ-1, приладу реєстрації параметрів акустичної емісії АЭ-109М і реєстраторів Н306 і Н307 (або комп'ютера).

Прилад АЭ-109М дозволяє реєструвати та ідентифікувати процеси, що протікають на поверхнях тертя в реальному масштабі часу, а пристрій реєстрації зміни геометрії зразків також без зупинки випробувань показує, наскільки вони зносилися або росли.

Ключовим питанням при розробці цієї автоматизованої системи був обґрунтований вибір критерію акустико-емісійного випромінювання, який би найбільш точно враховував зв'язок процесів руйнування зі структурою поверхонь тертя. Проаналізуємо акустичну емісію, яка виникає при поверхневому руйнуванні матеріалів при терті.

Потік акустичної енергії від великої безлічі елементарних джерел створює в точці закріплення п'єзоперетворювача P поле з повною амплітудою A , що виникає в результаті суперпозиції великої кількості елементарних сферичних хвиль з амплітудами A_n і фазами φ_n від елементарних джерел ΔS при їхньому зрізі:

$$A(P) = \sum A_n(P) \exp(i\varphi_n(P)), \quad (10.4)$$

де $A(P)$ – амплітуда сигналів АЕ в точці закріплення п'єзоперетворювача P ; $\varphi_n(P)$ – фаза n -ої хвилі джерела ΔS . Фаза $\varphi_n(x_n, t)$ залежить від відстані x_n , від джерела і від частоти ω .

Як відомо, для випадку негармонійних хвиль інтерференційна картина цілком відсутня, а середнє значення щільності енергії виявляється пропорційне сумі квадратів амплітуд складених хвиль, тобто має місце енергетичне додавання хвиль.

Крім того, при збуренні в середовищі одночасно великої кількості хвиль

від елементарних джерел вони не поширюються незалежно, а породжують нові хвилі комбінаційного типу, частоти яких дорівнюють сумі і різниці частот вихідних хвиль. Таким чином, випромінювання виявляється у вигляді акустичних коливань із широким частотним спектром.

Ефективність оцінювання інтенсивності зношування за параметрами АЕ значною мірою визначається обґрунтованістю їхнього вибору для стаціонарних і нестаціонарних режимів роботи трібоспряжень.

Відомо, що зміна амплітуди акустичних сигналів $X(t)$ носить випадковий характер і надалі може бути задана як функція відповідної змінної t .

Припустимо, що середнє значення інтенсивності сигналу, що пропорційне $|X|^2$, наближається до кінцевої величини, якщо інтервал, по якому проводиться усереднення, є нескінченним.

Тоді ліміт:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |X(t)|^2 dt, \quad (10.5)$$

скінчений. Якщо при цьому ліміт не дорівнює нулю, то очевидно, що інтеграл (10.5) розходиться. Для того, щоб у цьому виразі можна було використовувати методи спектрального аналізу, введемо поняття обрізної функції $X_T(t)$:

$$\begin{aligned} X_T(t) &= X(t), \text{ якщо } |t| \leq T, \\ X_T(t) &= 0, \text{ якщо } |t| > T. \end{aligned}$$

Оскільки при будь-яких значеннях T функція X_T є такою що квадратично інтегрується, можна визначити відповідний Фур'є образ:

$$X_T(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X_T(t) \exp(i\omega t) dt = \int_{-T}^T X(t) \exp(i\omega t) dt. \quad (10.6)$$

Вважаємо, що функція $X(t)$ належить ансамблю функцій за результатами безлічі вимірювань, які характеризують статистичні властивості процесу поверхневого руйнування.

Якщо розглянутий процес є стаціонарним і ергодичним, то автокореляційна функція $G(\tau)$ для сигналу $X(t)$ визначається виразом:

$$G(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) X(t + \tau) dt. \quad (10.7)$$

Спектральна функція $W(\omega)$ сигналу $X(t)$ визначається як Фур'є образ автокореляційної функції $G(\tau)$ і записується у вигляді:

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau. \quad (10.8)$$

Існує зворотнє перетворення:

$$G(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega. \quad (10.9)$$

З цього виразу і виразу (10.9) при $\tau = 0$, одержуємо, що:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |X(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega. \quad (10.10)$$

Звідси випливає, що:

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{|X_T(\omega)|^2}{2T} \right\}, \quad (10.11)$$

де оператором E позначимо середнє за ансамблем статичної змінної

$$\left[\frac{X_T(\omega)^2}{2T} \right].$$

З виразів (10.9) і (10.10) очевидно, що функція $W(\omega)$ є спектром потужності сигналу $X(t)$ і являє собою відношення квадрата модуля Фур'є образу $X(t)$ сигналу до інтервалу часу $2T$, протягом якого вимірюється сигнал.

При цьому вираз (10.10) показує, що середня інтенсивність зношування J_h за інтервал часу $2T$ буде корелювати зі значенням інтеграла від спектра потужності сигналів АЕ, порушення яких обумовлене процесами поверхневого руйнування при терті.

Дійсно, оскільки нестационарний процес характерний тим, що має визначену тенденцію розвитку в часі, то характеристики такого процесу залежать від початку відліку і від часу. Однак для кожного нестационарного процесу існують відрізки часу, у границях яких з відомим наближенням цей процес може вважатися стаціонарним і ергодичним.

Таким чином, змінюючи інтервал інтегрування (задаючи досить маленький інтервал) при вимірюванні спектральної потужності АЕ, можливе вивчення процесів поверхневого руйнування на етапі припрацювання трібосистем.

Випадкова функція $X(t)$ може вважатися за визначенням стаціонарною,

якщо всі її імовірнісні характеристики не змінюються при будь-якому зрушенні аргументів, від яких вони залежать, по осі t . Однак одна з основних умов, якій повинна задовольняти випадкова стаціонарна функція – це умова сталості дисперсії: $D_x(t) = D_x = const$.

Щодо акустичного випромінювання сталість дисперсії зміни спектральної потужності сигналів АЕ є достатньою умовою стаціонарності процесу поверхневого руйнування, що є джерелом АЕ.

Відповідно до теореми про дисперсію лінійної функції випадкових некорельованих величин, дисперсія стаціонарної випадкової функції дорівнює сумі дисперсій усіх гармонік її спектрального розкладання.

Розіб'ємо частотний діапазон реєстрації сигналів АЕ на ділянки. Позначимо відстань між сусідніми ділянками $\Delta\omega$. Виміряємо дисперсії зміни спектральної потужності сигналів АЕ на кожній ділянці і побудуємо діаграму, висота якої на кожній ділянці $\Delta\omega$ дорівнює

$$S_x(W_\omega) = D_x/\Delta\omega, \quad (10.12)$$

і являє собою середню щільність дисперсії на цій ділянці.

Якщо необмежено зменшувати інтервал $\Delta\omega \rightarrow 0$, то східчаста діаграма необмежено наближається по плавній кривій $S_x(W_\omega)$, що являє собою загальний амплітудно-часовий розподіл. За цією характеристикою, з великою вірогідністю можна судити про кінетику протікання процесу поверхневого руйнування, пов'язаного зі зміною структури поверхневих шарів, які є невід'ємною складовою частиною процесу припрацювання трібосистем.

З урахуванням вищевикладеного, принципово важливим при реєстрації процесів зношування є обґрунтований вибір інтервалу часу реєстрації спектральної потужності сигналів АЕ.

Проведений теоретичний аналіз акустичного емісійного випромінювання послужив основою для розробки принципово нового акустичного емісійного приладу АЕ-109М для вивчення процесів тертя і зношування, що є складовою частиною автоматизованої системи контролю процесів тертя і зношування рис.10.12. Зовнішній вигляд приладу АЕ і пристрій для прийому сигналів АЕ показаний на рис. 10.13.

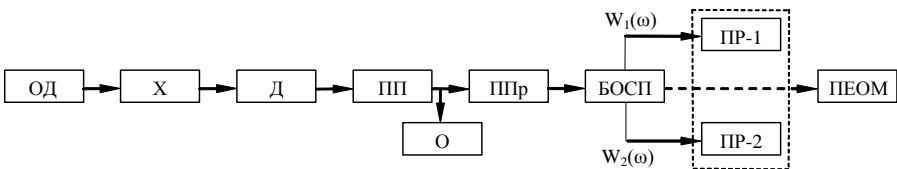
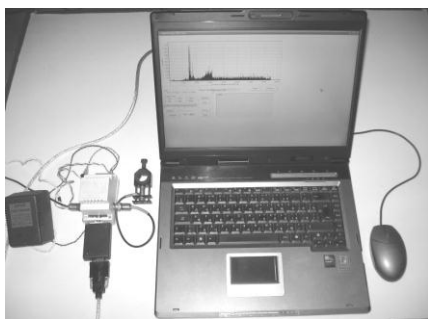
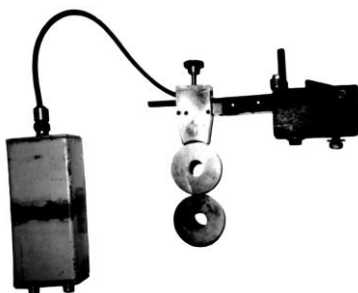


Рис. 10.12 Блок-схема приладу АЕ-109М



a



б

Рис. 10.13 Зовнішній вигляд приладу акустичної емісії:

a – прилад АЕ-109 з пристроєм прийому АЕ для трібосистеми кільце–кільце;

б – вристрій прийому сигналів АЕ для трібосистеми диск–диск

Акустичні хвилі, утворені процесами поверхневого руйнування (знос) в об'єкті діагностування ОД, сприймаються через хвилевід Х датчиком Д (п'єзоелектричним перетворювачем). Електричні сигнали від датчика Д підсилюються попереднім підсилювачем ПП і для візуалізації надходять на осцилограф О. Після попереднього посилення сигнал АЕ фільтрується, підсилюється в підсилювальному пристрої ППр і надходить на блок обробки спектральної потужності БОСП, інтегрально-логічна схема якого формує сигнал по двох рівнях квантування – за часом реєстрації $W_1(\omega)$ і за рівнем спектральної потужності АЕ $W_2(\omega)$. Сигнали спектральної потужності надходять на пристрої реєстрації: ПР-1 і ПР-2 (самописи типу Н306), а для детального аналізу надходять на ПЕОМ.

На виході першого каналу приладу видається сигнал спектральної потужності $W_1(\omega)$ з інтервалом реєстрації $2T$ для реєстрації швидкоплинних процесів поверхневого руйнування. Динамічний діапазон зміни сигналу не обмежений. Причому електрична схема інтегратора побудована таким чином, що поки сигнал видається на реєстратор, відбувається додавання спектральної потужності $W_1(\omega)$ за наступний інтервал $2T$ і наступний сигнал надходить на реєстратор у виді постійної напруги, що може дорівнювати, бути більшою або меншою вихідної. Таким чином, це дає можливість реєстрації сигналу у всьому діапазоні зміни величин зносу, причому адаптувавши його практично до всіх реєстраторів (самописам, графобудівникам, ПЕОМ тощо).

По другому каналу відбувається інтегрування $W_2(\omega)$ за заздалегідь заданою величиною досягнення граничного значення спектральної потужності з можливістю зменшення в пропорціях 1/10, 1/100. Спостереження зміни сигналу по цьому каналу дозволяє візуально оцінити динаміку процесів зношування трібоспряження на постійних режимах.

Обидва сигнали вимірюються в частотному діапазоні не більше 2 МГц.

Таким чином, створюються умови для найпростішого і ефективного виведення сигналу критеріальної оцінки поверхневого руйнування в ПЕОМ із використанням звукової карти. Обробка сигналів $W(\omega)$ проводиться за допомогою модифікованого програмного забезпечення "SpectrLab", що дозволяє:

- здійснювати аналого-цифрове перетворення (перетворення Фур'є) і запис одержуваного сигналу;
- виконувати цифрове фільтрування, усереднення і пікове захоплення сигналу;
- спостерігати дисперсію записаного сигналу в координатах "Спектральна потужність – час набору квантового рівня";
- документувати отримані результати.

Застосування цієї автоматизованої системи при проведенні трібологічних досліджень підвищує вірогідність і об'єктивність результатів, а також створює передумови для розробки ефективних засобів трібодіагностики складних технічних систем у різних областях машинобудування.

Розглянемо більш детально принцип роботи блока обробки спектральної потужності (БОСП) сигналів АЕ.

Дискретні сигнали спектральної потужності АЕ $W(\omega)$ вимірюються і перетворюються за допомогою цифрових і логічних пристроїв. У них сигнал представляється у вигляді доз (квантів), рівень їх змінюється стрибкоподібно і зберігається протягом деякого малого часу незмінним.

Пристрій дискретної дії дозволяє одержати більш точне відтворення сигналу і менше піддається впливу перешкод.

У приладі АЕ-109М таке перетворення виконується двома шляхами.

Один з них – квантування безперервного сигналу за часом зводиться до заміни нескінченно великої кількості значень скінченою кількістю миттєвих значень, що фіксують через певний проміжок часу Δt . Останній називається кроком квантування за часом. У моменти часу t_k ($k= 0, 1, 2, \dots, m$) фіксоване значення $f(t_k)$ дорівнює величині сигналу спектральної потужності в цій точці. Усередині кроку квантування Δt між сусідніми фіксованими значеннями аналого-цифровий блок формує черговий сигнал, що передається на пристрій реєстрації, з точністю, що визначається частотою квантування $f_k=1/\Delta t$.

Необхідна смуга частот сигналів АЕ на вході в БОСП обмежується широкосмуговим підсилювачем, якому можна підбудовувати. Максимальна частота квантування в приладі АЕ-109М обмежується умовами введення сигналів $W(\omega)$ у ПЕОМ через звукову карту.

Рис. 10.14. ілюструє роботу блока приладу АЕ-109М, що працює за цим принципом.

Функція $f(t)$ замінюється великою безліччю функцій, кожна з яких має дійсне значення $f(t)$ для "власного" моменту часу. Характер зміни сигналу, що реєструють за даним каналом, найбільш повно відбиває динаміку процесів зношування, безпосередньо пов'язану зі структурними перетвореннями в поверхневому шарі трібосистем.

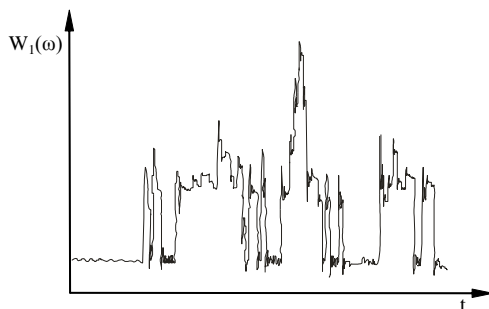


Рис. 10.14 Зміна спектральної потужності сигналів АЕ $W(\omega)$ за часом випробувань t при квантуванні за часом

З метою реєстрації подібного роду змін, сигнали акустичної емісії за цим каналом обмежуються по амплітуді рівнем, пов'язаним з роботою трібосистем машини тертя.

Інший шлях – квантування за рівнем – зводиться до заміни поточних значень безперервного сигналу кінцевою кількістю його рівнів. Показаний на рис. 10.15 сигнал $f(t)$, у результаті квантування замінюється східчастою функцією $\Psi[f(t)]$.

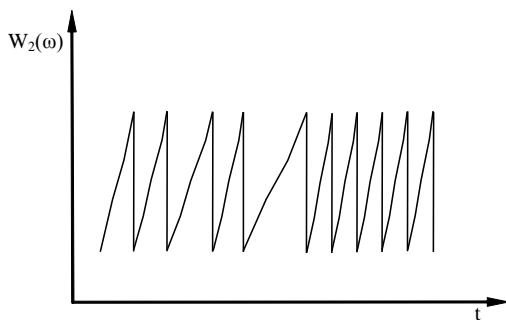


Рис. 10.15 Зміна спектральної потужності сигналів АЕ за часом випробувань t на знос при квантуванні за рівнем $W(\omega)$

Остання, як видно з рисунка, залежить від характеру сигналу, що квантується. Поки сигнал не зміниться на величину $\Delta f(t)$, перетворювач фіксує попереднє значення його рівня. Тільки після досягнення сигналом нового рівня перетворювач фіксує цей рівень.

Якщо в інтервалі зміни часу від t до t_n величина сигналу досягає рівня квантування, то сигнал обнулюється і здійснюється наступний набір. Крок квантування фіксується і може змінюватися в залежності від інтенсивності наростання величини збільшень $f(t)$. Реєстрація функції $\Psi[f(t)]$ проводиться

при фіксованій швидкості реєстрації. Ширина інтервалу часу $t + \Delta t$ відповідно до виразу для визначення спектральної потужності (10.11) характеризує інтенсивність процесів поверхневого руйнування.

Рівень квантування відповідає фіксованій величині зносу $I_{кв}$.

Однією з головних умов реєстрації спектральної потужності по даному каналу є реєстрація сигналів, що відповідають за рівнем процесам поверхневого руйнування. Це обмеження реалізується блоком дискримінації сигналів акустичної емісії за амплітудою.

Аналізуючи певний цикл квантування сигналу спектральної потужності (рис. 10.15), слід зазначити, що тангенс кута між лінією набору квантового рівня і відрізком часу його набору характеризує інтенсивність зношування трібосистеми за час набору квантового рівня (тому що є відношенням величини сумарного зносу $I_{h\Sigma}$ трібосистеми за час роботи t до кількості набраних за цей же період квантових рівнів $z_{кв}$

$$I_{кв} = I_{h\Sigma} / z_{кв} . \quad (10.13)$$

Таким чином, маючи повний запис діаграми зміни спектральної потужності за час випробувань і значенням $I_{кв}$ можна з високою точністю визначити динаміку процесів зношування трібосистем на будь-якій ділянці його роботи і за весь період у цілому. Високочастотний широкосмуговий сигнал акустичної емісії, що реєструється при зношуванні трібосистем, перетворюється на низькочастотний зі збереженням у ньому статистичних характеристик.

Спектральний аналіз часток зносу. Метод спектрального аналізу вмісту механічних домішок у мастильних матеріалах застосовується для вимірювання зносу двигунів внутрішнього згоряння, різних коробок передач. Чутливість спектрографічного методу визначення вмісту металевих домішок в оливі досягає величини 10^{-6} , а для деяких елементів 10^{-8} мг на 1 грам оливи. Така чутливість дозволяє, наприклад, визначити через кілька годин роботи двигуна вміст в оливі легуючих елементів матеріалу колінчатого вала, циліндричних втулок, вкладишів, поршневих кілець. Недоліками методу є висока вартість устаткування для спектрального аналізу, необхідність залучення висококваліфікованого персоналу, тривалість проведення аналізу і обробки результатів, а також неможливість конкретно оцінити місце найбільшого зносу.

В останні роки визначилася тенденція здійснювати діагностування безперервно, для чого транспортні машини оснащують засобами вбудованого контролю, наприклад, за допомогою датчиків, що контролюють кількість і розміри часток зносу, виділюваних з потоку оливи.

На рис. 10.16. наведена схема і загальний вигляд такого датчика, розробленого в Самарському аерокосмічному університеті.

Як видно з рис. 10.16 а, частки в залежності від своїх розмірів викликають імпульси, що генеруються п'єзоелементом. У приладовій частині ці імпульси аналізуються, враховуються і класифікуються за розмірами групами.

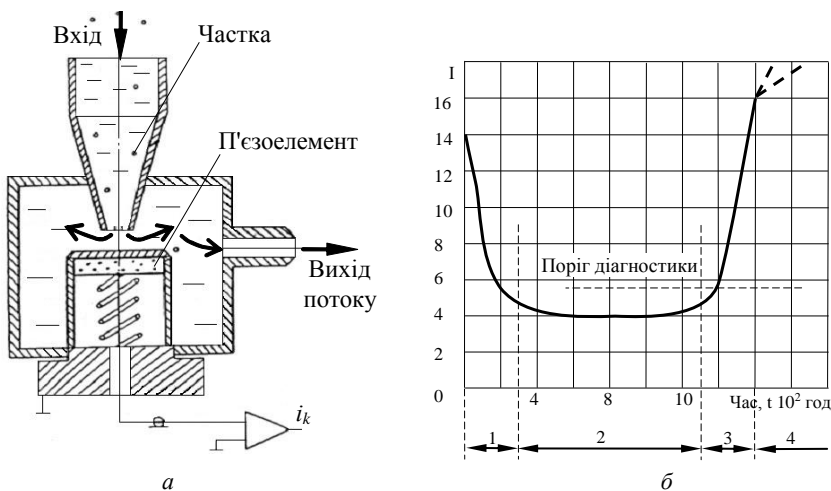


Рис. 10.16 Вбудована схема безперервного діагностування: *a* – схема пристрою п'єзоелектричного датчика (кожна частка пропорційно своїй масі народжує імпульс i_k); *б* – характерні результати діагностування: 1 – зона припрацювання; 2 – зона сталого режиму зношування; 3 – перехід до руйнування; 4 – критична зона; J – інтенсивність потоку часток, $J = \varphi(m, n)$ – маси і кількості часток

Бортові системи трібодіагностики рекомендуються як одна зі складових впровадження комплексної системи діагностування складних агрегатів (авіаційних двигунів, газоперекачуючих установок, дизелів і електроагрегатів тепловозів залізничного транспорту, устаткування теплових і гідравлічних станцій тощо), що дозволяє застосовувати прогресивну систему експлуатації устаткування за фактичним станом.

Приладова частина системи являє собою сукупність пристроїв, що дозволяють за результатами дисперсійного аналізу часток зносу в потоці оливи оцінювати всі етапи життєдіяльності трібосистеми починаючи від зародження і розвитку дефектів до настання аварійно-небезпечних ситуацій (рис. 10.16, б).

Система безперервного діагностування дозволяє:

- контролювати рівень забруднення робочих рідин;
- підтримувати чистоту робочих рідин на заданому рівні;
- діагностувати стан зносу трібосистем;
- контролювати рівень обводнення і діагностувати стан теплообміну;
- автоматично відключати додаткові блоки очищення;
- автоматично відключати насосну станцію, блокувати подачу рідин та ін.

Пристрій системи являє собою новий етап у техніці експлуатації, обслуговування і ремонту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / Под ред. К.Б. Вакара – М.: Атомиздат, 1980. – 304 с.
2. Алябьев А.Я., Болдырев Ю.М., Запорожец В.В. и др.; под ред. Голего Н.Л. Ремонт летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1984. – 422 с.
3. Антипенко А.М., Сорокін С.П., Поляшенко С.О.; Властивості та якість паливно-мастильних матеріалів.: Навч. посібник. За ред. А.М. Антипенко.–Харків: 2006.–212 с.
4. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология: Физические основы, механика и технические приложения. / Под общ. ред. Д.Г. Громаковского – Самара: 2000. – 234 с.
5. Богданович П.И., Прушак П.Н. Трение и износ в машинах. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 с.
6. Богданович П.Н., Ивашко В.С., Прушак В.Я. Триботехника. – Минск: 2001. – 159 с.
7. Борисов М.В., Павлов И.А., Постников В.И. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения их качества. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 352 с.
8. Войсковой ремонт авиационной техники / Под ред. Л.М. Фролова М.: Воениздат, 1991. – 416 с.
9. Войтов В.А. Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин. Ч. 2: Методология моделирования граничной смазки в гидромашинах. – Х.: Центр Леся Курбаса, 1997. – 152 с.
10. Войтов В.А., Яхно О.М., Аби Сааб Ф.Х. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин. К.: 1999. – 192 с.
11. Восстановление боевой авиационной техники / В.К. Стасенков, В.И. Иванов, К.В. Субботин, В.В. Ермолаев, Ю.М. Мещериков – К.: КИ ВВС, 1995. – 334 с.
12. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
13. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
14. Грешников А.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
15. Джус Р.М., Стадніченко М.Г., Стадніченко В.М. Пристрій для беззупинної рестрації динаміки зміни геометрії зразків при випробуваннях на тертя і знос. Х.: Вестн. нац. техн. ун-та «ХПІ», 2003. – 1(12). – С. 58–64.
16. Джус Р.М., Стадніченко В.М., Стадніченко М.Г., Трошін О.М. Границі застосовності методу акустичної емісії при вирішенні задач трібодіагностики. // 36. наук. пр. ХІ ВПС. – Х.: ХІ ВПС. – 2004.– №10. – С. 58–64.

17. Евдокимов А.Ю. и др. Смазочные материалы и проблемы экологии. – М.: Наука и газ, 2004, – 424с.
18. Ермолов Л.С. Повышение надежности сельскохозяйственной техники. – М.: Колос, 1979. – 255с.
19. Заславский Ю. С. Трибология смазочных материалов.– М.: Химия, 1991.– 240 с.
20. Зеленин А.Н. Физические основы теории резанья грунтов. -М: Машгиз, 1950,
21. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
22. Износ деталей сельскохозяйственных машин. Под ред. М.М. Севернева – М., Колос, 1972. – 288 с
23. Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
24. Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. –К.: Наук. Думка, 1986. – 264 с.
25. Кламманн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты.: Пер. с англ./Под ред. Ю.С. Заславского.– М.: Химия, 1988.– 488 с.
26. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: 1991. – 320 с.
27. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. – 1985. – Т. 6. – №2. – С. 201 – 213.
28. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ машинах. – К.: 1970. – 396 с.
29. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
30. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
31. Лозовский В.Н., Бондал Г.В., Таксис А.О., Колтунов А.Е. Диагностика авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
32. Ляшко В.А., Смагленко Ф.П., Потемкин М.М. Связь параметров сигнала акустической эмиссии с термодинамическими и информационными характеристиками процесса изнашивания // Пробл. Трения и изнашивания: Респ. науч.-техн. сб. – 1990. – Вып. 38. – С. 9 - 13.
33. Маяускас И.С. Исследование распределения удельного давления и износа по поверхности лемеха при пахоте. Диссертация, 1958.
34. Носовский И.Г. Влияние газовой среды на износ металлов. – Киев: Техніка, 1968. – 181 с.
35. Носовский И.Г. О механизме схватывания металлов при трении / Трение и износ. – 1993. – Т.14 – №1. – С. 19 – 24.
36. Окоча А.І., Антипенко А.М. та інші Експлуатаційні матеріали.– К.: Урожай, 1996.–336 с.

37. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А.В. Чичинадзе – М.: 1995. – 779 с.
38. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ. ред. Костецкого Б.И. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.
39. Практикум з ремонту машин. За ред. О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. - Харьков: ХНТУСХ, 2007.- 415с.
40. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 590 с.
41. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. – М.: Высш. шк., 1974. – 205 с.
42. Ремонт машин. За ред. О.І.Сідашенко, А.Я. Поліського.-К.: Урожай, 1994. – 400с.
43. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин.–М.: Машиностроение, 1970.– 312 с.
44. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. ред. М.Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
45. Справочник по триботехнике: В 3 т. / Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
46. Стадниченко В.Н., Стадниченко Н.Г., Джус Р. Н., Трошин О.Н. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов. // Вестн. науки и техники. – Х.: ХДНТ и НТУ «ХПИ» – 2004. – 1(16). – С. 18–27.
47. Стадніченко В.М., Стадніченко М.Г., Джус Р.М., Чотій Л.Ю. Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для структурної побудови автоматизованої системи контролю процесів зношування // Вопр. проєктирования и произ-ва конструкций летат. аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 34(3). – Харьков: НАКУ, 2003. – С. 47 - 52.
48. Тейбор Д. Трение как диссипативный процесс // Трение и износ. – 1994. – Т.15. – №2. – С. 296 - 315.
49. Теоретические основы технологии ремонта машин. –Под ред. А.И. Сідашенко, А.А. Науменко. Том 1. (Теория и технология производственных процессов ремонта)- Харьков: ХНТУСХ, 2005. - 590с.
50. Теоретические основы химмотологии.– Под ред. А.а. Браткова.– М.: Химия, 1985.– 320 с.
51. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. – М.: Машиностроение, 1971. .– 264 с.
52. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ, Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина – М., Машиностроение, 1993. – 452 с.
53. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. – М.: 1960. – 351 с.
54. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. – М.: Мир, 1982. – 253 с.

55. Чичинадзе А.В. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). – М.: Машиностроение, 2003. – 576с.
56. Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения // Трение и износ. – 1993. – Т. 14. – №1. – С. 136 - 143.
57. Шевеля В.В., Назаренко П.В., Гладченко А.Н., Шевеля И.В. Внутреннее трение как фактор износостойкости трибосистемы // Трение и износ. – 1990. – Т.11. – №6. – С. 974 - 978.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ТРИБОЛОГІЯ ТА ЇЇ СТРУКТУРА	5
1.1 Етапи розвитку трибології	5
1.2 Трибологія як наука	9
1.3 Структура трибології	10
1.4 Загальні поняття та основні терміни	13
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ	17
2.1 Молекулярно-механічна теорія тертя	17
2.2 Структурно-енергетична теорія тертя	28
2.2.1 Структура і дефекти матеріалів трібосистем	29
2.2.2 Фізичні властивості поверхневих шарів	34
2.2.3 Активація та пасивація поверхонь тертя	40
2.2.4 Параметри оцінки зношування машин	48
2.3 Види зношування	50
2.3.1 Класифікація видів зношування	50
2.3.2 Абразивне зношування	51
2.3.3 Механохімічне зношування	57
2.3.4 Утомне зношування	63
2.3.5 Адгезійне зношування	65
3 РЕЖИМИ МАЩЕННЯ	68
3.1 Загальні характеристики режимів мащення	68
3.2 Гідродинамічний режим мащення	69
3.3 Еласто - гідродинамічний режим мащення	75
3.4 Граничний режим мащення	77
3.5 Режим змішаного мащення	83
4 ТЕРТЯ КОЧЕННЯ	85
4.1 Механіка контактної дії при терті коченні	88
4.2 Класифікація і механізм зношування підшипників кочення	91
4.3 Механізм зношування підшипників кочення	92
4.4 Особливості взаємодії колеса з покриттям	94
4.5 Механізм зношування протектора шини об покриття	98
5 КОНСТРУКТИВНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРІБОСИСТЕМ	100
5.1 Кінематичні схеми контакту трібосистем	100
5.2 Прямі і зворотні трібосистеми	105
5.3 Оптимізація конструктивного виконання трібосистеми	116
5.4 Шляхи зменшення зовнішнього тертя в конструкціях трібосистем	120
5.5 Внутрішнє тертя структури матеріалів, як критерій зносостійкості	124
5.6 Вибір сумісних матеріалів в трібосистемі	130

6	ТЕХНОЛОГІЧНІ	ЗАСОБИ	ПІДВИЩЕННЯ	
	ЗНОСОСТІЙКОСТІ			134
6.1	Контактування поверхонь тертя і процес їх припрацювання			134
6.2	Легування матеріалів для трібоелементів			143
6.3	Методи створювання поверхневого зміцнення матеріалів			146
6.3.1	Хіміко-термічна обробка деталей машин			148
6.3.2	Електрохімічні і хімічні формування зносостійких покриттів			149
6.3.3	Механотермічне формування зносостійких покриттів			152
6.3.4	Наплавлення зносостійких шарів			153
6.3.5	Напилювання покриття з порошкових матеріалів			163
6.3.6	Іонно - плазменні методи			166
6.3.7	Плакування			167
6.3.8	Механічне зміцнення поверхонь			167
7	МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ	ЯК	ЗАСІБ	ПІДВИЩЕННЯ
	ЗНОСОСТІЙКОСТІ			172
7.1	Функції і види мастильних матеріалів			172
7.2	Склад олив та присадки до них			175
7.3	Властивості та якість змащувальних матеріалів			177
7.3.1	Внутрішнє тертя (в'язкість) в оливах			177
7.3.2	Мастильні (трібологічні) властивості			188
7.3.3	Антиокиснювальні властивості			193
7.3.4	Миюче - диспергуючі властивості			196
7.3.5	Антикорозійні та захисні властивості			198
7.3.6	Протипінні та деемульгуючі властивості			201
7.3.7	Характеристики інших властивостей та якості олив			202
7.4	Рідкі мастильні матеріали			205
7.4.1	Моторні оливи			205
7.4.2	Трансмісійні оливи			218
7.4.3	Оливи для гідромеханічних передач			225
7.4.4	Гідравлічні оливи			226
7.4.5	Індустріальні оливи			231
7.5	Пластичні мастила			235
7.6	Тверді мастильні матеріали			246
7.6.1	Призначення, характеристика і властивості			246
7.6.2	Методи і технологія нанесення			253
8	ДОСЛІДЖЕННЯ	ВПЛИВУ	ГРУНТІВ	НА
	ГРУНТОРІЖУЧИХ	ОРГАНІВ	СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ	МАШИН
				255
8.1	Характеристика ґрунтів			255
8.2	Вплив вологості ґрунту на знос органів машин			257
8.3	Вплив щільності та зв'язаності ґрунту на знос ґрунторіжучих органів машин			263
8.4	Вплив мікроагрегатного складу ґрунту на знос органів машин			265
8.5	Тертя метал-ґрунт			267

8.6 Вплив форми, розміру і твердості піщаних часток ґрунту на знос органів машин	270
8.7 Польові випробування лемешів плуга	276
8.8 Рентгенографічні дослідження матеріалу лемеша плуга	284
8.9 Фазові перетворення в поверхневому шарі сталі 65Л в умовах взаємодії з ґрунтом	286
8.10 Вибір матеріалу для лемешів плуга	287
9 ВИПРОБУВАННЯ НА ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ	290
9.1 Призначення і ціль лабораторних випробувань на тертя та зношування	290
9.2 Методи вимірювання зносу та сил тертя. Устаткування для випробувань на тертя та зношування конструкційних та мастильних матеріалів	297
9.3 Методи тріботехнічних випробувань на абразивну зносостійкість	305
10 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ	309
10.1 Теорія моделювання і можливості її застосування в трібології	309
10.2. Фізичне моделювання	309
10.3. Математичне, імітаційне і аналогове моделювання	316
10.4. Використання електрофізичних методів діагностування трібо-систем	318
ЛІТЕРАТУРА	335

Навчальне видання

Антипенко Анатолій Михайлович,
Белас Олег Миколайович,
Войтов Віктор Анатолійович,
Вотченко Олександр Степанович,
Сідашенко Олександр Іванович,
Стадніченко Микола Григорович,
Стадніченко В'ячеслав Миколайович,
Суханов Михайло Ігорович,
Тіхонов Олександр Всеволодович,
Трошін Олег Миколайович

(ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА)

ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ

Підручник

**За редакцією доктора технічних наук, професора
В.А. Войтова**

Відповідальний за випуск Сідашенко О.І.
Комп'ютерний набір та верстка Поздняков М.Г., Гончаренко О.О.,
Марченко М.В.

Підписано до друку 17.06.2008р. Папір тип №2
Формат 60x84 1/16. Розумів. друк. аркуш. 20,1 Тираж 500 прим. Зам. №__

ХНТУСГ, 61002, м. Харків – 2, вул. Артема, 44
КП «Друкарня №13»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої
продукції

Серія ДК № 1937 від 14.09.2004р.

Видавництво ЧП Черв'як
61120, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 18, кв. 179