

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ

ТРИБОТЕХНОЛОГІЯ

Конспект лекцій

для студентів 4 та 3 с.т. курсу спеціальності 208 «Агроінженерія»
ОС «Бакалавр»

Суми 2023

УДК 621.751

Укладач: д.т.н., професор технічного сервісу Тарельник В.Б.

Триботехнологія . Конспект лекцій для студентів 4 та 3 с.т. курсу спеціальності 208 «Агроінженерія» ОС «Бакалавр». // Суми: Сумський національний аграрний університет, 2023. – 81 с., рис. 15, , бібліографія 12 джерел.

В конспекті лекцій викладено основні поняття та загальні відомості по дисципліні “Триботехнологія”.

Рецензенти: к.т.н., доц., кафедри „ТС” СНАУ Бондарев С.Г.
к.т.н., доц., зав. кафедрою „ПТС” СНАУ Семірненко Ю.І.

Відповідальний за випуск: професор Тарельник В.Б..

Друкується за рішенням навчально-методичної ради ІТФ СНАУ

Протокол № 5 від “ 05” травня 2023 р.

© Сумський національний аграрний університет, 2023

ЗМІСТ

ЛЕКЦІЯ № 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПО ДИСЦИПЛІНІ.....	4
1.1. Вступ. Загальні відомості.....	4
1.2. Основні поняття і позначення. Класифікація видів тертя.....	7
1.3. Розвиток науки про тертя.....	9
ЛЕКЦІЯ № 2. РОБОЧІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ І ЇХНЄ КОНТАКТУВАННЯ.....	10
2.1. Показники якості поверхні. Структура поверхні.....	10
2.2. Топографія поверхні. Основні позначення і терміни.....	12
2.3. Залишкові напруги, структурні і фазові перетворення.....	14
2.4. Фізико-хімічні властивості поверхонь.....	15
2.5. Контакткування деталей.....	19
ЛЕКЦІЯ № 3. ТЕРТЯ І ЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	20
3.1. Загальні зведення про тертя. Тертя без мастильного матеріалу.....	20
3.2. Тертя при граничному змащенні.....	22
3.3. Рідинне, в'язкопластичне і контактено-гідродинамічне змащення.....	25
3.4. Тертя в підшипнику ковзання.....	27
3.5. Тертя котіння.....	28
3.6. Основні поняття і визначення. Зношування металевих поверхонь. Зношування полімерів і гуми. Стадії зношування пара тертя.....	29
ЛЕКЦІЯ № 4 АНАЛІЗ ВИДІВ ЗНОСУ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ.....	33
4.1. Загальні зведення.....	33
4.2. Водневе зношування.....	34
4.3. Абразивне зношування.....	35
4.4. Окисне зношування.....	37
4.5. Зношування внаслідок деформації.....	38
4.6. Корозійно-механічне зношування, корозія, кавітаційне й ерозійне зношування.....	38
4.7. Схоплювання і заїдання поверхонь при терті.....	40
4.8. Зношування при фреттінг-коррозії.....	41
4.9. Трещиноутворення на поверхнях тертя.....	42
ЛЕКЦІЯ № 5 СУТНІСТЬ ЕФЕКТУ НЕЗНОШУВАННЯ.....	43
5.1. Ефект незношування (виборчий перенос при терті).....	43
5.2. Енергетичні критерії тертя та зносу.....	46
ЛЕКЦІЯ № 6 КОНСТРУКТИВНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ.....	50
6.1. Матеріали пари тертя.....	50
6.2. Розташування пар тертя по твердос-ті.....	52
6.3. Змазування деталей сполучення.....	53
ЛЕКЦІЯ № 7 ТЕХНОЛОГІЧНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ.....	56
7.1. Термічна та хіміко-термічна обробка робочих поверхонь.....	56
7.2. Металізація напилюванням.....	61
7.3. Поверхневе пластичне деформування.....	64
ЛЕКЦІЯ № 8 КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ И РЕМОНТУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ВИРОБІВ.....	65
8.1. Багатошарові електроерозійні покриття.....	65
8.2. ЕЕЛ з наступним ППД.....	68
8.3. ЕЕЛ з наступним ІА.....	70
8.4. ЕЕЛ з наступним епіламіруванням.....	71
ЛЕКЦІЯ № 9 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ЕКС- ПЛУАТАЦІЇ.....	72
9.1. Зміна властивостей мастильного матеріалу.....	72
9.2. Обкатування машин.....	75
9.3. Испиту машин.....	78
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	81

ЛЕКЦІЯ № 1

Тема: “Основні поняття та загальні відомості по дисципліні”

Мета лекції: вивчити основні поняття та загальні відомості по дисципліні “Триботехнологія ”

1.1 Вступ. Загальні відомості

Тертя – дивний феномен природи! Воно подарувало людству тепло і вогонь, можливість у короткий час зупинити швидкісний потяг і автомобіль, прискорити хімічну реакцію в сто тисяч разів, записати людський голос на плівку і багато чого іншого.

Тертя вивчали Леонардо да Вінчі і М.В. Ломоносов, Г. Амонтон і Ш. Кулон, Н.П. Петров і Л.Ейлер, Д.И. Менделєєв і О. Рейнольдс і інші вчені.

У наш час тертя вивчали академіки Н.Е. Жуковський, П.А. Ребиндер, проф. А.А. Ахматов. Сьогодні вивченням тертя, зношування і змащення машин займаються багато вчених: проф. И.В. Крагельский, проф. Б.И. Костецкий і ін. За рубежом відомими вченими в цій області є Ф. Боуден, Д. Тейбор, З Баходур, Н. Краузе й ін.

Дотепер тертя в багатьох його аспектах залишається загадкою. При терті (і тільки при терті) одночасно відбуваються механічні, електричні, теплові, вібраційні і хімічні процеси. Тертя може зміцнити і зменшити міцність металу, підвищити або зменшити в ньому зміст вуглецю, наситити метал воднем або провести обезводнення, перетворити золото і платину в окисли, пополірувати деталі або зварити їх. Тертя є процесом, що самоорганізується, при якому з визначеною послідовністю і досить «розумно» протікають явища, спрямовані на руйнування поверхні або ж, навпаки, на створення цілої серії систем, що знижують знос і тертя.

Сьогодні з тертям зв'язана одна із самих гострих проблем сучасності – знос машин і механізмів. Витрати на відновлення машин величезні, причому щорічно вони збільшуються. Подовження терміну служби машин і устаткування навіть у невеликому ступені рівносильно введенню значних нових виробничих потужностей.

Задачі й основні розділи дисципліни, її економічне значення

Дисципліну «тертя і знос у сільськогосподарських машинах» можна розділити на чотири основних розділи: 1 – основи зносостійкості при терті; 2 і 3 – конструктивні і технологічні методи підвищення довговічності тертьових деталей; 4 – питання експлуатації машин, зв'язані з забезпеченням зносостійкості деталей.

У перший розділ входять такі питання, як якість поверхні, фізико-хімічні властивості і контактування поверхонь деталей, види тертя у вузлах машин, механізм зношування деталей пари тертя і робочих органів, види руйнування робочих поверхонь деталей і робочих органів машин, механізм і теорія тертя без зносу - виборчий перенос при терті, зв'язок опору утоми деталей із процесами тертя і зношування, розподіл зносу по поверхні деталей і ін.

Другий розділ – конструктивні методи підвищення довговічності і надійності роботи деталей тертя, містить ряд важливих питань, що повинний вирішувати конструктор. Головні його задачі в цьому плані:

- оцінка і вибір принципової схеми вузлів тертя машини в цілому з позицій її впливу на зносостійкість і надійність конструкції;
- вибір матеріалів і сполучення їх у парах тертя;
- призначення розмірів і форми деталей з обліком місцевої і загальної міцності;
- забезпечення нормального функціонування вузлів тертя в заданих умовах шляхом організації відповідної мастильної системи, захисту від забруднюючого і хімічного впливу середовища, блукаючих струмів і перегріву, а також від можливих перевантажень вузлів тертя при експлуатації;
- забезпечення експлуатації вузлів тертя з мінімальними витратами;
- захист поверхонь тертя деталей і вузлів від можливих аварійних ушкоджень в експлуатації.

Третій розділ – технологічні способи підвищення довговічності деталей тертя – охоплює питання одержання матеріалів і покриттів із заданими властивостями; питання обробки заготівель для одержання деталей необхідної форми і точ-

ності, зміцнення робочих поверхонь деталей, зборки в агрегати й іспити вузлів машин.

Четвертий розділ триботехніки розглядає питання експлуатації машин у зв'язку з забезпеченням зносостійкості деталей.

До питань експлуатації машин у зв'язку з забезпеченням зносостійкості деталей відносяться зміна властивостей мастильного матеріалу в процесі експлуатації, обкатування машин, стендові й експлуатаційні іспити, вплив умов експлуатації і режиму роботи машин на інтенсивність зношування їхніх деталей, відхід за машиною під час роботи, технічне обслуговування і ремонт машин, граничні зношування і терміни служби деталей і ін.

Зміст усіх розділів триботехніки підлягає одній задачі - підвищенню довговічності машин. Це найбільш ефективний і економічний спосіб збільшення діючого (тобто фактично працюючого) машинного парку і, як наслідок, підвищення обсягу випуску промислової продукції.

Зв'язок з іншими науковими дисциплінами і її особливості. Мета і задачі курсу. Збитки від тертя і зносу в машинах

Дисципліна «тертя і знос у сільськогосподарських машинах» вивчається, використовуючи знання дисциплін «Вища математика» (використовуються знання диференціального й інтегрального вираховання, способів рішення диференціальних рівнянь), «Фізика» (використовуються знання молекулярної фізики, теплових явищ у середовищах), «Хімія» (використовуються знання про термодинамічні процеси, явища тепломасопереносу).

Досліджувана дисципліна розглядає основні науково-технічні проблеми і перспективи розвитку областей техніки, що відповідають спеціальній підготовці з погляду триботехніки, їхній взаємозв'язок із суміжними областями, шляхи рішення проблем зношування деталей і вузлів різними методами.

Мета дисципліни – дати майбутнім фахівцям необхідний обсяг знань для виконання ними розрахунків деталей машин на знос, вивчити практичні рекомендації методів боротьби зі зносом і зниженню втрат на марне тертя, закласти основу для самостійної роботи фахівців в галузі тертя і зношування машин і механізмів і більш поглибленого вивчення цих питань самостійно.

Задачі вивчення дисципліни:

- **знати** основні об'єкти, явища і процеси, зв'язані з проблемами тертя і зносу, методи їхнього наукового дослідження;
- **уміти** формулювати основні техніко-економічні вимоги до досліджуваних об'єктів і застосовувати існуючі науково-технічні засоби їхньої реалізації;
- **мати** представлення про перспективи розвитку досліджуваної дисципліни.

Збитки від тертя і зносу в машинах

Більшість машин (85-90%) виходить з ладу через знос деталей.

На частку заводів, що випускають нові трактори, приходиться лише 22% потужностей, на частку заводів, що виготовляють запасні частини до тракторів, 34%, а на частку ремонтних підприємств 44%. Інакше кажучи, на ремонт тракторів затрачається майже в 4 рази більше виробничих потужностей, чим на їхнє виготовлення.

За весь термін служби двигунів автомобілів, тракторів і комбайнів їх ремонтують до 5 разів. Ресурс двигуна після ремонту в порівнянні з ресурсом нового двигуна складає 30-50%. Число робітників, зайнятих ремонтом двигунів, у кілька разів перевищує число робітників, що виготовляють двигуни на заводах серійної продукції. Матеріальні витрати на ремонт також у багато разів перевершують витрати на виготовлення нового двигуна.

Великі матеріальні втрати народне господарство терпить від підвищеного тертя у вузлах машин. Відомо, що більш половини палива, споживаного автомобілями й іншими видами транспорту, витрачається на подолання опору, створюваного тертям у рухливих зчленуваннях.

1.2. Основні поняття і позначення. Класифікація видів тертя.

Триботехніка – наука про тертя, знос, змащення і взаємодії контактуючих поверхонь при їхньому взаємному переміщенні. В останні роки в триботехніці одержали розвиток нові розділи – трибохімія, трибофізика і трибомеханіка.

Трибохімія – вивчає взаємодія контактуючих поверхонь з хімічно активним середовищем. Вона досліджує проблеми корозії при терті, хімічні основи вибо-рчого переносу і вплив на поверхню деталей хімічно активних речовин, що виділяються при терті внаслідок деструкції полімерів або мастильного матеріалу.

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

Трибомеханіка – вивчає механічні взаємодії контактуючих поверхонь при терті.

Ряд термінів, що відносяться до триботехники, стандартизований. ДСТ 23.002-78 включає 98 термінів, що класифіковані по видах тертя, зношування, змащення, методам змазування і мастильних матеріалів.

До загальних понять триботехники відносяться наступні терміни.

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

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

Знос – результат зношування, обумовлений у встановлених одиницях.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню у визначених умовах тертя, оцінюване величиною, зворотної швидкості зношування або інтенсивності зношування.

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

Змащення – дія мастильного матеріалу, у результаті якого між двома поверхнями зменшуються сила тертя і (або) інтенсивність зношування.

Змазування – підведення мастильного матеріалу до поверхні тертя.

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

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

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

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

Тертя ковзання – тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл у крапках торкання різні по величині і напрямкові або по величині або напрямкові.

Тертя катання – тертя руху двох твердих тіл, при якому їхньої швидкості в крапках торкання однакові по величині і напрямкові.

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

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

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

Швидкість ковзання – різниця швидкостей тіл у крапках торкання при ковзанні.

Поверхня тертя – поверхня тіла, яка приймає участь у терті.

Коефіцієнт тертя – відношення сили тертя двох тіл до нормальної сили, що притискає тіла друг до друга.

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

1.3 Розвиток науки про тертя

Перші найбільш примітивні пояснення природи сил тертя будувалися на основі явища підйому тіл по нерівностях їхніх поверхонь. При цьому коефіцієнт тертя чисельно дорівнює тангенсові кута нахилу одиничної нерівності (Паран, 1704 р., Ейлер, 1748 р.).

Белидор (1737 р.) тертя пояснював підйомом сферичного виступу з поглиблення, утвореного трьома сферичними виступами контртіла. Геометрична побудова показує, що коефіцієнт тертя при цьому дорівнює $1/3$.

Англійський учений Дезагюльє в 1724 р. припустив, що явище тертя можна пояснити виникаючими між твердими тілами силами молекулярного притягання.

Довгі роки йшла суперечка між прихильниками механічного і молекулярного напрямків.

Кінець суперечки був покладений у 1939 р., коли проф. Крагельский И.В., об'єднавши ці дві точки зору, запропонував теорію, відповідно до якої зовнішнє тертя має двоїсту природу й обумовлено як подоланням сил молекулярної взаємодії між поверхнями, так і подоланням механічного опору, зв'язаного з формозміною поверхневого шару.

Боуден і Табір у 1943 р., незалежно, висловили ідею про двоїсту природу тертя, однак механічну (деформаційну) складову вони відкинули, вважаючи її надто малою для металів.

ЛЕКЦІЯ № 2

РОБОЧІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ І ЇХНЄ КОНТАКТУВАННЯ

- 2.1. Показники якості поверхні. Структура поверхні.
- 2.2. Топографія поверхні. Основні позначення і терміни.
- 2.3. Залишкові напруги, структурні і фазові перетворення.
- 2.4. Фізико-хімічні властивості поверхонь.
- 2.5. Контакткування деталей.

2.1. Показники якості поверхні. Структура поверхні

У техніці під поверхнею деталі розуміють зовнішній шар, що по будівлі й інших фізичних властивостях відрізняється від внутрішніх шарів. Комплекс властивостей, що здобуваються поверхнею деталі в результаті її обробки, характеризується узагальненим поняттям „якість поверхні”.

Якість поверхні визначається геометрією поверхні як границею тіла і фізико-хімічних властивостей, обумовленими процесом її утворення при обробці деталі. Якість поверхні деталей машин впливає на опір утоми, зносостійкість, корозійну й ерозійну стійкість і зв'язано з такими властивостями сполучень, як міцність посадок з натягом і щільність рухливих і нерухомих з'єднань.

Якість поверхні деталей характеризується мікро і макрогеометрією поверхні, хвильністю, структурою, зміцненням і залишковими напругами. Глибина поверхневого шару і якість поверхні залежать від основного матеріалу, виду оброб-

ки, основних параметрів інструмента, режиму обробки і роду мастильно-охолодної рідини.

Поверхневий шар неоднорідний по будівлі (рис. 1). Граничний шар 1 складається з адсорбованої плівки газів, вологи і мастильно-охолодної рідини, яку можна видалити тільки нагріванням деталі у вакуумі. Шар 2 – деформований, сильно роздроблений метал з перекрученими ґратами кристалів і зі знеуглецьованими під дією високих температур при шліфуванні ділянками; у ньому знаходяться окисли і нітриди, порожнечі, надриви і тріщини. Шар 3 складається з зерен, сильно деформованих під дією тиску шліфувального кола і тангенціальних сил при шліфуванні; у ньому утримується структурно-вільний цементит, що утворився під дією високих температур. Шар 4 – метал з вихідною структурою. При більш тонкій обробці (абразивними брусками, стрічками і т.д.) шар 1 не змінюється по товщині, а шар 2 і 3 зменшуються відповідно зі зменшенням тиску і температури поверхні при обробці.

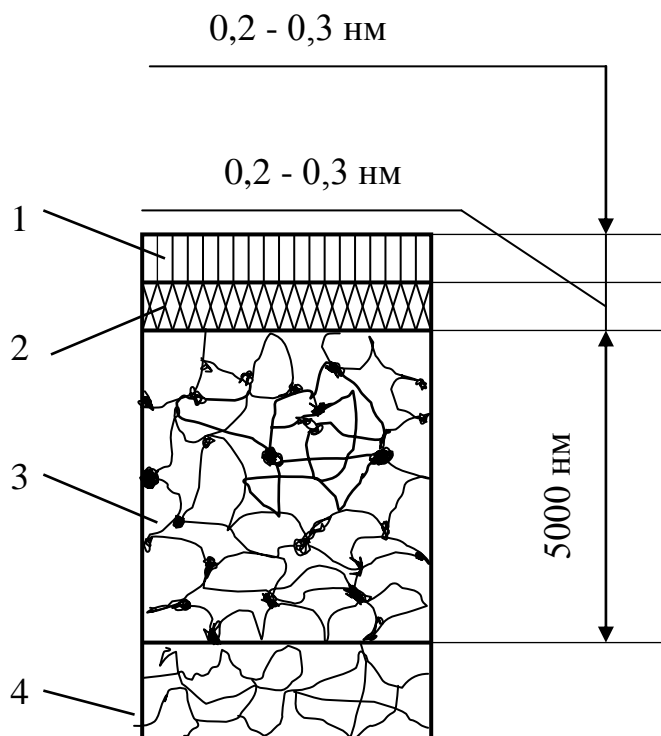


Рис. 1. Структура поверхнього шару шліфованої деталі з вуглецевої сталі

У полірованого металу самий верхній шар складається з дрібних кристалічних утворень, багато яких не мають закінчених ґрат і являють собою як би уламки правильних кристалічних утворень. Така будівля дозволила вважати цей

шар аморфним. Під ним знаходиться шар дуже дрібних кристалів, орієнтованих у напрямку полірування. Далі впливає перехідна зона слабо наклепаних кристалів без вираженої текстури.

Якщо виключити адсорбовану плівку, то поверхневий шар обробленої інструментом поверхні складається з зовнішнього дуже тонкого шару, більш-менш сильно зруйнованих кристалічних зерен і наклепаного шару чіткої кристалічної структури.

Зміцнення поверхневого шару при обробці можна оцінити по зміні мікротвердості в порівнянні з вихідною. Поверхневий шар має товщину при різанні 0,25-2 мм, при шліфуванні 12-75 мкм, при дрібному шліфуванні 2-25 мкм, при поліруванні 0,2 мкм.

Слід зазначити, що шліфовочні припали можуть досягати глибини 5 мм.

2.2. Топографія поверхні. Основні позначення і терміни

Усяке тіло має відхилення від ідеальної геометричної форми, іменовані погрішностями. Погрішності можна розділити на три категорії: макрогеометричні відхилення, хвильність поверхні, шорсткість поверхні.

Макрогеометричними називають відхилення форми поверхні від заданої. Так деталі з бічною поверхнею кругового циліндра можуть мати наступні погрішності: овальність, огранювання, бочкообразність, конусність, криволінійність осі.

Під хвильністю **поверхні** розуміють сукупність більш-менш що регулярно чергуються узвиш і западин із кроком хвилі, значно перевищуючу її висоту.

Від шорсткості поверхні відрізняється значно великим кроком: при чистовій обробці він не менш 0,25 мм, при грубої – перевищує 8 мм.

Шорсткість поверхні – сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині.

ДСТ 2789 - 73 передбачає шість параметрів, що характеризують шорсткість поверхні: три висотних R_a , R_z і R_{max} , два крокових - S і S_m і відносна опорна довжини профілі t_p .

Середнє арифметичне відхилення профілю Ra визначається як середнє значення відстаней (y_1, y_2, \dots, y_n) крапок профілю поверхні до його середньої лінії, тобто лінії, що розділяє профіль таким чином, що площі по обидва боки від цієї лінії до контуру профілю рівні між собою (рис. 2).

$$(F_1 + F_3 + \dots + F_{n-1}) = (F_2 + F_4 + \dots + F_n)$$

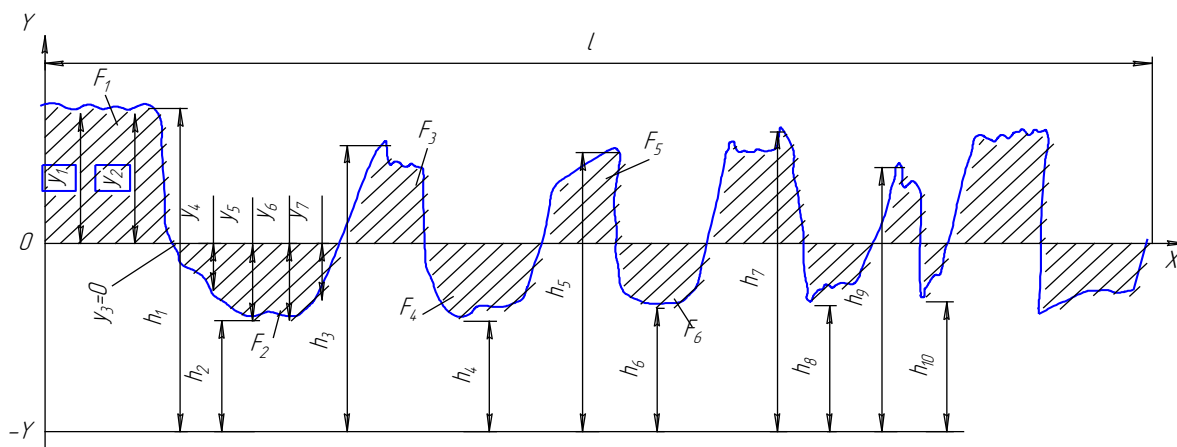


Рис. 2. Профілограма обробленої поверхні

Відстань до середньої лінії складається без обліку алгебраїчного знака:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx;$$

приблизно

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}.$$

Висота нерівностей Rz визначається як середня відстань між тими які знаходяться в межах вимірюваної (базової) довжини п'ятьма вищими крапками виступів і п'ятьма нижчими крапками западин, обмірюване від лінії, рівнобіжної середньої лінії:

$$Rz = \frac{(h_1 + h_3 + \dots + h_9) - (h_2 + h_4 + \dots + h_{10})}{5}.$$

Найбільша висота нерівностей профілю Rmax є повною висотою профілю, тобто відстанню між лінією виступів профілю і лінією западин профілю в межах базової довжини.

Відрізок середньої лінії профілю, що містить нерівність профілю, називається кроком нерівностей профілю. **Середній крок нерівностей профілю S_m** – це середнє значення кроків виступів профілю в межах базової довжини.

Середній крок місцевих виступів профілю S – це середнє значення кроків виступів профілю, що знаходяться в межах базової довжини.

Опорна довжина профілю η_p визначається сумою довжин відрізків b_i , що відтинаються на заданому рівні в матеріалі профілю лінією, еквідистантною середньої лінії, у межах базової довжини:

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i \cdot$$

Для зіставлення розмірів опорних поверхонь, оброблених різними методами, зручно користуватися поняттям **відносної опорної довжини профілю t_p** , обумовленої відношенням опорної довжини профілю до базової довжини:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} \cdot$$

2.3. Залишкові напруги, структурні і фазові перетворення

Залишковими називають напруги, що існують у тілі при відсутності зовнішніх силових впливів на нього. Наявність цих напруг обумовлено нерівномірністю температури по обсязі тіла, утворенням під час нагрівання або охолодження нових структур з іншою щільністю, наявністю включень і ін. Залишкові напруги утворюють рівноважну систему. У залежності від обсягу, що охоплюється цією системою, розрізняють власні напруга трьох пологів. Напруги першого роду врівноважуються у великих обсягах, порівнянних з розмірами деталі; напруги другого роду (мікронапруги) врівноважуються в межах одного або декількох кристалічних зерен; напруги третього роду – субмікроскопічні перекручування кристалічних ґрат. Напруги другого і третього родів не мають орієнтування щодо осей деталі.

Пластична деформація, у тому числі і при різанні металів, обумовлює зміну мікроструктури. Безладно розташовані у вихідній структурі металу кристалічні зерна при пластичній деформації здобувають однорідну орієнтацію (текстуру). Більш глибокі зміни можливі при обробці металів, що сприймають загартуван-

ня. У результаті високого поверхневого нагрівання, а також швидкого охолодження можливі фазові перетворення і структурні зміни. Тому що кожної структурної складової належить властивий їй питомий обсяг, те фазові і структурні перетворення поряд із пластичною деформацією є джерелом залишкових напруг.

Місцеві фазові і структурні перетворення поверхневого шару деталі, що шліфується, відомі за назвою шліфовочні припали. Вони утворюються внаслідок інтенсивного (майже миттєвого) тепловиділення на невеликій ділянці поверхневого шару. В області прижогов утворюються залишкові напруги. Припали є структурними концентраторами напруги, що знижують як опір утоми, так і зносостійкість.

При різанні металів протікають два протидіючих один одному процесу: зміцнення в результаті дії сил різання, що тим вище, чим більше тиск різання, і зниження міцності – зняття наклепу за рахунок температури різання, що підвищується. Ступінь наклепу і товщина наклепаного шару залежать від температури різання.

2.4. Фізико-хімічні властивості поверхонь

Поверхнева енергія. Поверхневий шар металу має велику активність. Це обумовлено тим, що усередині твердого тіла кожен атом кристала оточений іншими атомами і зв'язаний з ними міцно в усіх напрямках, а в атомів, розташованих на поверхні, із зовнішньої сторони ні «сусідів» у виді таких же атомів. У зв'язку з цим у поверхневому шарі в атомів твердого тіла залишаються вільні зв'язки, наявність яких створює поблизу поверхні атомне (молекулярне) притягання.

Поверхневі атоми унаслідок вільних зв'язків мають більшу енергію, ніж атоми усередині твердого тіла. Надлишок енергії, віднесеної до одиниці поверхні, називають питомою поверхневою енергією або просто поверхневою енергією.

При зіткненні двох тіл поверхнева енергія зникає і може виділитися у виді теплоти або затратитися на підстроювання в кристалічних ґратах одного кристала до іншого.

Адсорбція і хемосорбція.

Явище утворення на поверхні твердого тіла найтонших плівок газів, пар або розчинених речовин або поглинання цих речовин поверхнею тіла називають адсорбцією.

Найбільшою здатністю до адсорбції володіють поверхнево-активні речовини, тобто речовини, молекули яких орієнтуються при адсорбції перпендикулярно до поверхні (наприклад, органічні кислоти, їхні металеві мила, спирти і смоли). Вода виявляє велику адсорбційну активність до гуми й антифрикційних пластмас. Характерною рисою поверхнево-активних речовин є те, що в їхніх молекулах існує як би два протилежних просторово розділених заряди. Такі молекули, називані полярними, притягаються й утримуються поверхнею тіла. Так, якщо помістити металеве тіло поблизу летучої речовини, наприклад, валеріанової кислоти, то молекули кислоти, випаровуючи і дифундуючи через повітря, покривають поверхню тіла шаром товщиною в одну молекулу.

Молекули речовин, адсорбованих на поверхні твердого тіла, мають здатність переміщатися по поверхні твердого тіла, де мається їхній надлишок, у місця, де їх недостатньо для повного покриття поверхні. Рухливість адсорбованих молекул залежить від виду адсорбції. Адсорбція буває фізична і хімічна. При хімічній адсорбції (хемосорбції) полярні кінці молекул, зв'язуючи з поверхнею тіла, утворюють у ній моношар, подібний з хімічною сполукою. Рухливість молекул у результаті цього значно зменшується.

Більшість рідких середовищ з ланцюговими молекулами, тобто молекулами подовженої форми, утворюють на границі з металевою поверхнею особливу структуру. Мінеральні і рослинні олії, а також з'єднання, що входять до складу тваринних жирів, є представниками таких середовищ. Рентгеноструктурні дослідження показали, що навіть олії, що складаються з вуглеводнів, що мають неполярні молекули (наприклад, очищене вазелінова олія), утворюють на металі тонку плівку з окремих шарів з орієнтацією молекул у них перпендикулярно до поверхні металу. Міцність і стійкість такої адсорбованої плівки малі. Досить до складу такої олії додати незначна кількість (порядку 0,1%) поверхнево-активної речовини, щоб утворився адсорбований моношар поверхнево-активних молекул (рис. 3), здатний повідомити розташованим вище шарам олії орієнтацію.

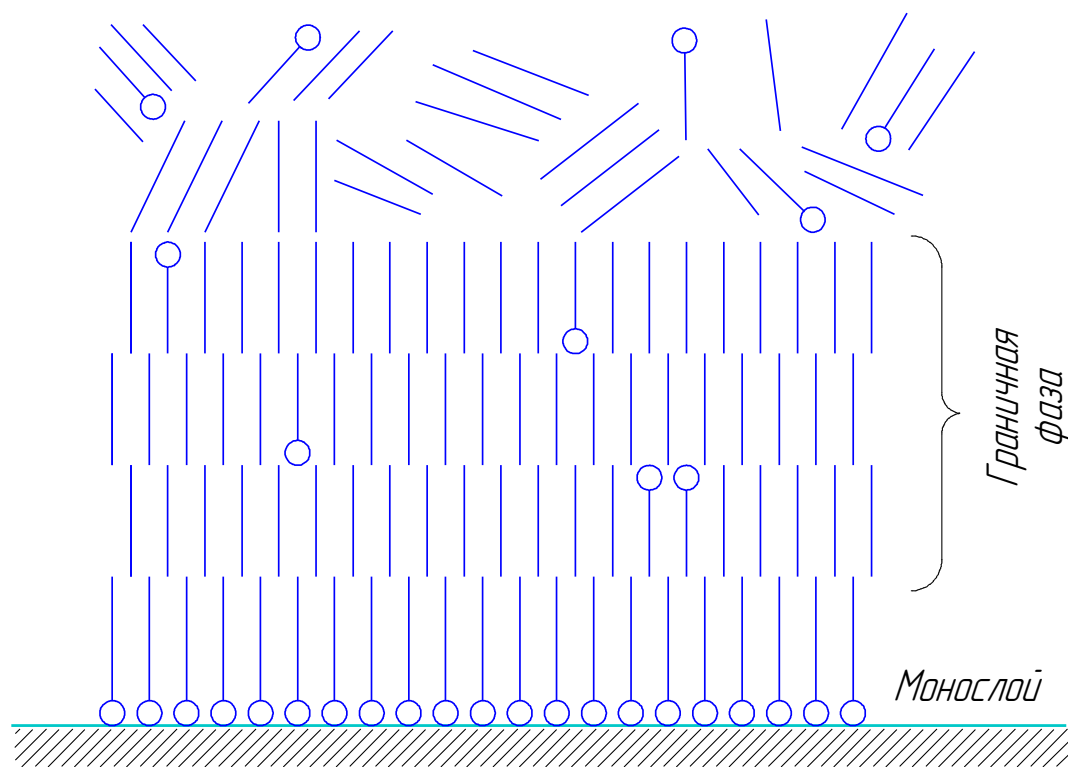


Рис. 3. Схема адсорбованого моношару полярних молекул і орієнтація неполярних молекул

Таким чином, рідини з молекулами великої довжини, що містять у розчині поверхнево-активні речовини, утворять над моношаром полярних молекул граничний шар, у якому молекули розташовані не безладно, як в обсязі рідини, а правильно орієнтовані. При деякій температурі плівка квазикристалічної структури як би розплавляється: сили подовжньої когезії між молекулами зникають, відбувається дезорієнтація адсорбованих молекул і губиться здатність мастильного матеріалу до адсорбції.

Адсорбційний ефект зниження міцності (ефект Ребіндера)

Поверхово - активне середовище значно знижує опір деформуванню і руйнуванню твердих тіл у результаті фізичної (оборотної) адсорбції поверхнево-активних речовин. Цей ефект був установлений П.А. Ребіндером і названий його ім'ям. Розрізняють зовнішні і внутрішній адсорбційні ефекти.

Зовнішній ефект відбувається в результаті адсорбції поверхнево-активних речовин на зовнішній поверхні деформованого тіла, що викликає пластифікування поверхні і зниження границі текучості σ_T , а також коефіцієнта зміцнення $\lambda = d\sigma / d\varepsilon$, де σ - напруга; ε - деформація (рис. 4).

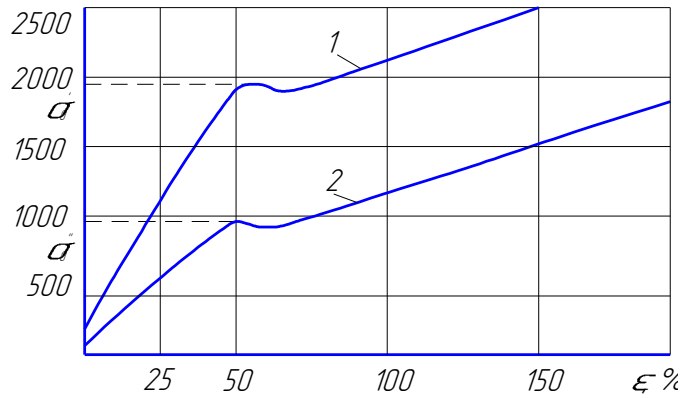
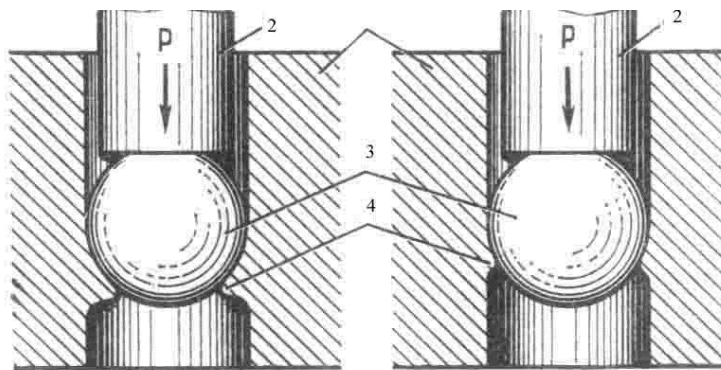


Рис. 4. Залежність напруги σ від деформації ϵ монокристалів олова:
 1 – у чистій вазеліновій олії; 2 – у 0,2%-ному розчині олеїнової кислоти у вазеліновій олії; σ_0 – границя текучості

Ефект Ребіндера можна продемонструвати на прикладі продавлювання сталеві кульки через наскрізний циліндричний отвір у металевому зразку (рис. 5).



а) б)

Рис. 5. Схема продавлювання кульки без мастильного матеріалу (а) і з окисленим парафіном (б) (за даними П.П. Ребіндера): 1 – зразок; 2 – пуансон; 3 – кулька; 4 – напливши металу

При продавлюванні кульки надлишковий поверхневий шар металу пластично деформується, утворюючи напливши перед кулькою. При продавлюванні кульки без мастильного матеріалу в зону деформації утягується значно більше металу, чим у присутності активного середовища. Сили продавлювання при змазуванні парафіном у 3 рази менше, ніж у випадку відсутності мастильного матеріалу.

Внутрішній адсорбційний ефект викликається адсорбцією поверхнево-активних речовин на внутрішніх поверхнях розділу – зародкових мікротріщинах руйнування, що виникають у процесі деформації твердого тіла.

2.5. Контакткування деталей

Взаємне контактування деталей відбувається на вершинах хвиль і виступах поверхонь, утворених макронерівностями.

Процес контактування поверхонь при статичному навантаженні протікає в такий спосіб. Поверхня сприймає навантаження вершинами виступів нерівностей на висотах, утворених Макрогеометричними відхиленнями. Тут розташовуються зони, з яких складається фактична площа торкання. У контакт першими вступають конфронтуючі один одному на сполучених поверхнях виступи, сума висот яких найбільша. Деформація нерівностей і їхніх основ викликає зближення поверхонь. В міру збільшення навантаження поверхні усе більш зближаються й у контакт вступають пари виступів з меншою сумою висот.

Можливі наступні деформації виступів: пружна; упругопластична без зміцнення; упругопластична зі зміцненням.

Пластична деформація виступів мікронерівностей і їхнє взаємне впровадження починаються при середньому тиску на контакті, рівному приблизно потроєній границі текучості матеріалу. Граничний середній тиск на площах фактичного контакту з урахуванням зміцнення матеріалу в процесах пластичної деформації досягає двох-триразового значення його твердості при вдавненні. Повне занурення виступів у пластично деформовану основу не спостерігається. Після деформації, навіть сильної, шорсткість поверхонь лише трохи видозмінюється.

Площа фактичного контакту поверхонь складається з безлічі малих дискретних площадок, розташованих на різних висотах плям торкання в місцях найбільш повного зближення поверхонь. Між площадками торкання тіл маються з'єднані між собою або закриті мікропорожнини, заповнені повітрям або іншим газовим середовищем, мастильним матеріалом, продуктами зношування і т.п.

Площа фактичного контакту складає від однієї десятитисячної до однієї десятої номінальної площі торкання. Навіть при високих навантаженнях площа

фактичного контакту не перевищує 40% номінальної площі. Так у випадку контактування сталі по сталі при навантаженні 15 МПа відношення площ складо 0,2 при обробці поверхні до $Ra = 2,5 \dots 1,25$ мкм і 0,35 при $Ra = 0,63 \dots 0,32$ мкм.

При наявності між поверхнями тертя тонкої квазіожиженої мідної плівки, утвореної при терті в умовах режиму виборчого переносу, площа фактичного контакту може збільшитися в 10-100 разів. Це є однією з причин різкого зниження інтенсивності зношування поверхні тертя.

ЛЕКЦІЯ № 3

ТЕРТЯ І ЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1. Загальні зведення про тертя. Тертя без мастильного матеріалу.

3.2. Тертя при граничному змащенні.

3.3. Рідинне, в'язкопластичне і контактено-гідродинамічне змащення.

3.4. Тертя в підшипнику ковзання.

3.5. Тертя котіння.

3.6. Основні поняття і визначення. Зношування металевих поверхонь. Зношування полімерів і гуми. Стадії зношування пара тертя.

3.1. Загальні зведення про тертя. Тертя без мастильного матеріалу

По характері відносного руху розрізняють тертя ковзання і тертя катання. Іноді обидва види тертя виявляються спільно, коли котіння супроводжується прослизанням, наприклад, між колісьми і рейками.

У залежності від того, чи є відносне переміщення дотичних пар макро- або мікропереміщенням, розрізняють силу тертя руху, неповну силу тертя спокою, найбільшу силу тертя спокою.

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

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

Неповна сила тертя спокою – сила опору, спрямований протилежно зусиллю зрушення, при відсутності зсуву в контактї.

У залежності від наявності мастильного матеріалу розрізняють тертя без мастильного матеріалу і тертя з мастильним матеріалом.

Тертя без мастильного матеріалу і при відсутності забруднень між поверхнями буває там, де мастильний матеріал щоб уникнути псування продукції або по розуміннях безпеки неприпустимий (у гальмах фрикційних передач, у вузлах машин текстильної, харчової, хімічної промисловості), а також у вузлах машин, що працюють при високих температурах, коли будь-який мастильний матеріал не придатний.

Тертя має молекулярно-механічну природу. На площадках фактичного контакту поверхонь діють сили молекулярного притягання, що виявляються на відстанях, у десятки разів перевищуючих міжатомну відстань у кристалічних ґратах, і збільшуються з підвищенням температури.

Найбільш сильним проявом молекулярних сил є схоплювання поверхонь. Сила тертя в цьому випадку залежить від довжини зон схоплювання й опори їх роз'єднанню.

Сила тертя T обумовлена механічною і молекулярною взаємодіями:

$$T = a S_{\phi} + bP, \quad (3.1)$$

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

Коефіцієнт тертя f являє собою відношення сили тертя до сили тиску. На підставі формули (3.1) маємо

$$f = \frac{a S_{\phi}}{P} + b. \quad (3.2)$$

Вираження виду (3.1) і (3.2) для сили тертя і коефіцієнта тертя дійсні для тертя з мастильним матеріалом і без нього.

Тертя без мастильного матеріалу супроводжується стрибкоподібним ковзанням поверхонь, з чим зв'язані, наприклад, вібрація автомобіля при включенні зчеплення, «смикання» при гальмуванні, «вереск» гальм, вібрація різців при різанні і порушення плавності роботи повільно рухаються деталей. Рекоменду-

ються наступні міри боротьби з «стрибками» при терті: збільшення твердості системи, підвищення швидкості ковзання, вибір пари тертя.

3.2. Тертя при граничному змащенні

При граничному змащенні поверхні сполучених тіл розділені шаром мастильного матеріалу малої товщини (від товщини однієї молекули до 0,1 мкм). Наявність граничного шару знижує сили тертя в порівнянні з тертям без мастильного матеріалу в 2 – 10 разів і зменшує знос сполучених поверхонь у сотні разів.

Молекули мастильного матеріалу орієнтуються перпендикулярно до твердої поверхні, що дозволяє представити для наочності граничну плівку у виді ворсу (рис. 6). При взаємному переміщенні ворсинки як би згинаються в протилежні сторони.

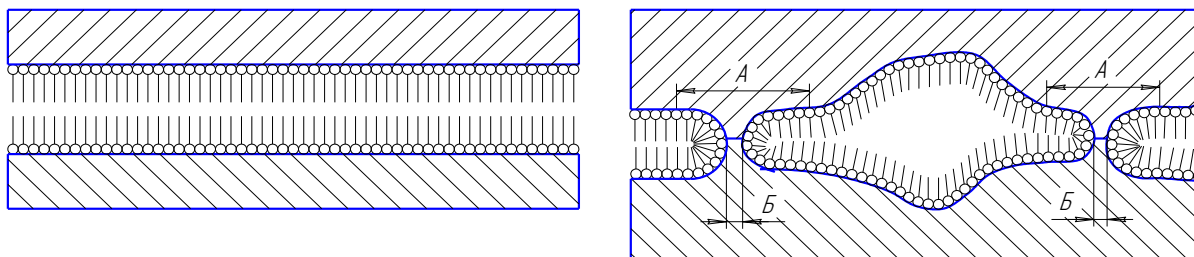


Рис. 6. Схеми ковзання тіл при граничному змащенні:

а – змазування ідеальних поверхонь; б – контактування реальних поверхонь; А – ділянки сприймаюче навантаження; Б – ділянки безпосереднього контактування або контактування при твердих плівках

Мастильний матеріал у граничному шарі анізотропний, у тангенціальному напрямку молекулярні шари легко згинаються і при товщині шаруючи більше деякої критичної величини сковзають друг по другу; по нормалі до твердої поверхні плівка має високий опір стискові; її несуча здатність обчислюється десятками тисяч кілограмів на 1 див². Деформація стиску плівки в досить високому інтервалі не виходить за межі пружності.

Механізм тертя при граничному змащенні представляється в наступному виді. Під навантаженням відбуваються пружна і пластична деформації на площадках контакту найбільш близького прилаштування поверхонь, покритих

граничною плівкою мастильного матеріалу. При цьому може відбутися взаємне впровадження поверхонь без порушення цілісності мастильної плівки. Опір рухові при ковзанні складається з опору зрушенню граничного шару й опору «проорюванню» поверхонь обсягами, що впровадилися. Крім того, на площадках контакту, підданих найбільш значної пластичної деформації, і в місцях з високими місцевими температурами може відбутися руйнування мастильної плівки з настанням адгезії поверхонь, що оголилися, і навіть схоплювання металів на мікроділянках Б (мал. 6).

Завдяки рухливості молекул мастильного матеріалу на поверхні тертя адсорбція протікає з великою швидкістю, що повідомляє мастильній плівці властивість «самозаліковуватися» при місцевих її ушкодженнях. Ця властивість відіграє велику роль у попередженні лавинного процесу схоплювання.

Непоновлювана гранична плівка в міру зростання шляхи тертя зношується. Олія з плівки адсорбується на продукти зношування і виноситься з поверхні тертя; відбувається сублімація плівки і видалення олії в атмосферу.

Додавання в граничні шари мастильного матеріалу і водних розчинів поверхнево-активних речовин підвищує товщину граничного шару і сприяє зменшенню зносу (до 2 разів).

Деякі тверді тіла можуть робити мастильна дія, організувати і підтримуючи режим тертя при граничному змащенні.

Зважаючи на те, що гранична плівка повинна мати високий опір продавлюванню і низький опір зрізу до твердих мастильних матеріалів можна віднести деякі тіла шарово-гратової структури, пластинчастої структури, м'які метали і тонкі плівки полімерів. Це: графіт, дисульфід молібдену (Mo_2), сульфід срібла, пористий свинець і дисульфід вольфраму.

У кристалічних гратах графіту атоми вуглецю розташовані в рівнобіжних шарах, що відстоять один від іншого на відстані 0,34 нм, а в кожному шарі вони розміщуються у вершинах правильних шестикутників з довжиною сторони 0,14 нм (рис. 7). Таким чином, зв'язку між атомами в шарах менше ніж між шарами. Кристалічні грати дисульфиду молібдену (рис. 8) подібна гратам графіту: між атомами молібдену і сірки маються тісні зв'язки, у той час як відстань між ша-

рами атомів сірки відносно більше. Завдяки цьому дисульфід молібдену можна використовувати як мастильний матеріал при низьких температурах (до 50 °С), а також у вакуумі. При температурі 538 °С молібденіт перетворюється в триокис, що є абразивом.

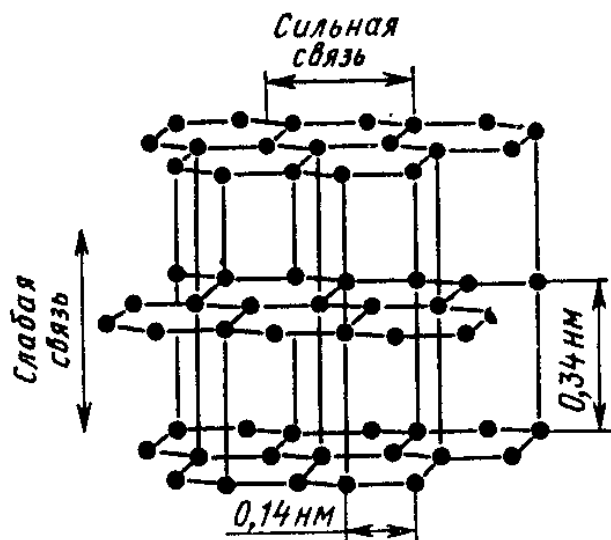


Рис. 7. Кристалічна структура графіту

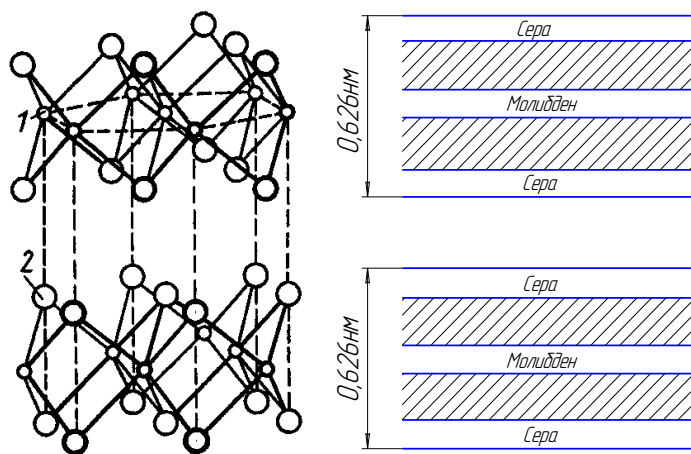


Рис. 8. Структура дисульфиду молібдену MoS_2 ; одиничні пластинки складаються з чистого молібдену або з чистої сірки, відстань між ними 0,366 нм і зв'язок відносно слабка: 1 – атоми молібдену; 2 – атоми сірки

Твердими мастильними матеріалами можуть бути м'які метали, що мають низький опір зрізові в діапазоні робочих температур. Для змазування використовують тверді плівки свинцю, олова й індію.

3.3. Рідинна, в'язкопластичне і контактнo-гiдродинамiчне змашчення

Рiдинне змашчення характеризується тим, що поверхнi тертя роздiленi шаром рiдкого мастильного матерiалу (олiї), що знаходиться пiд тиском. Тиск мастильного матерiалу врівноважує зовнiшнє навантаження. Масляний шар називають несучим. При збiльшеннi його товщини бiльш товщини граничної плiвки зменшується ступiнь впливу твердої поверхнi на далеко вiддаленi вiд неї молекули олiї. Шари, що знаходяться на вiдстанi бiльш 0,5 мкм вiд поверхнi, здобувають можливiсть вiльно перемiщатися один щодо iншого. Цей режим тертя є оптимальним для вузла тертя з погляду втрат енергiї, довговiчностi i зносостiйкостi. Сила тертя при рiдинному змашченнi не залежить вiд природи поверхонь, що сполучаються.

Явище тертя при рiдинному змашченнi було вiдкрито в 1883 р. Н.П. Петровим, що створив основи гiдродинамiчної теорiї змашчення.

iснує два способи створення тиску в несучому шарi. При першому способi спецiально передбачений насос формує гiдростатичний тиск, достатнє для подiлу поверхонь тертя (мал. 9). Витiк олiї через торцi пiдшипника компенсується вiдповiдною подачею насоса. Для здiйснення другого способу формування тиску в мастильному шарi необхiднi конструктивнi заходи.

Механiзм утворення тиску в несучому шарi можна пояснити на прикладi плоскої опори (рис. 10, а). Нехай пластина А-А перемiщається з деякою швидкiстю (пiд кутом α до нерухомої пiдкладки В. Промiжок мiж пластиною i пiдкладкою заповнений грузлою рiдиною. Шар рiдини, що змочує пластину А-А, силами грузлого тертя надає руху сумiжний з ним по висотi шар. Так рух буде передаватися вiд одного шару до iншого, за винятком шаруючи, що змочує нерухому пiдкладку В. У пiдсумку олiя буде утягувати в клиновий зазор, який звужується i в ньому буде пiдтримуватися тиск. Воно не буде постiйним по довжинi, оскiльки на вхiднiй i вихiднiй крайках олiя стикається з атмосферою i тут надлишковий тиск дорiвнює нулевi (рис. 10, б).

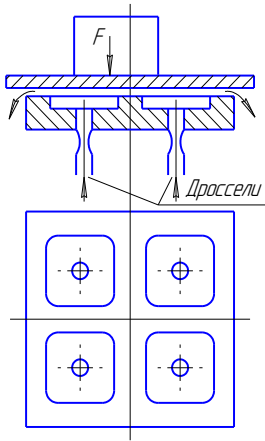


Рис. 9. Схема роботи гідростатичної опори

Відповідно двом способам створення тиску в несучому шарі розрізняють гідростатичні і гідродинамічні опори ковзання. Гідродинамічні опори більш поширені.

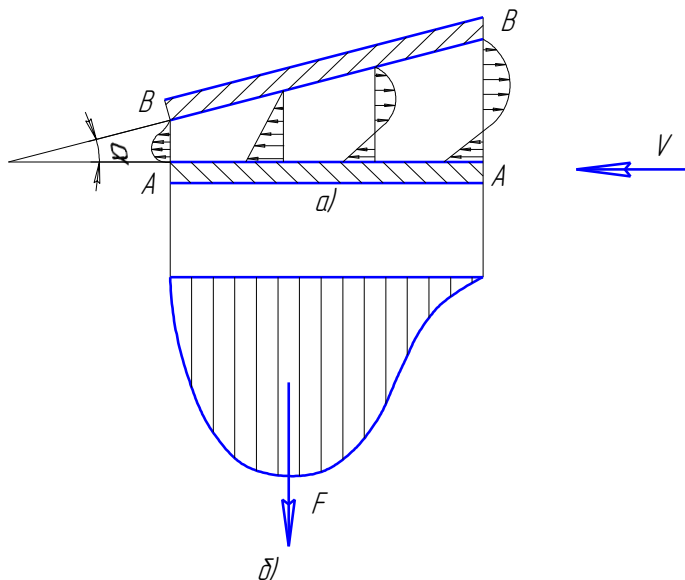


Рис. 10. Схема утворення несучого масляного шару

В'язкопластичне змащення. Пластичне мастильні матеріали, як і рідкі, можуть забезпечити режим тертя, що виключає безпосередній контакт поверхонь і їхнє взаємне впровадження. На відміну від олій, що є грузлими рідинами, пластичні мастильні матеріали володіють в'язкопластичними властивостями. Потік такого матеріалу має наступні особливості. У ньому маються зони, у яких відсутнє пошарове ковзання, плин у них відбувається як в ідеальному пластичному середовищі; поза цими зонами плин грузле.

Контактно-гідродинамічне змащення. При котінні або при котінні з ковзанням олія втягується в зону контакту поверхнями, що рухаються. При деяких умовах, аналогічних умовам виникнення гідродинамічного змащення між ковзаними поверхнями, у масляному шарі утвориться піднімальна сила.

Підвищення тиску і температури робить протилежна дія на в'язкість олій. При малому температурному коефіцієнті в'язкості або при помірній температурі в'язкість олії в контакті може бути досить значної, і, імовірно, олія перебуває в квазіпластичному стані.

3.4. Тертя в підшипнику ковзання

Нехай навантаження, геометричні розміри, діаметральний зазор підшипника, в'язкість мастильного матеріалу зберігаються постійними. Будемо змінювати швидкість обертання цапфи. При малій швидкості ковзання поверхонь гідродинамічний ефект їхнього повного відділення не спостерігається, тому що олія видавлюється з зазору. Тертя тільки напіврідинне. Зі збільшенням швидкості ковзання гідродинамічні сили зростають, і взаємодія поверхонь знижується, нарешті, при деякій швидкості відбудеться повний поділ поверхонь і наступить режим тертя при рідинному змащенні. Подальше збільшення швидкості ковзання приведе до підвищення внутрішнього тертя в шарі мастильного матеріалу, і коефіцієнт тертя зросте. Мінімальний коефіцієнт тертя відповідає початкові тертя при рідинному змащенні.

Аналогічне явище спостерігається при зміні в'язкості мастильного матеріалу: при малій в'язкості олії рідинного змащення не буде, але після досягнення мінімального коефіцієнта тертя зі збільшенням в'язкості олії підвищується опір тертю. Протилежно діє питоме навантаження: при великому тиску на опорі умови для рідинного змащення несприятливі, зниження навантаження до деякої величини приводить до «спливання» цапфи: подальше зменшення навантаження супроводжується збільшенням товщини несучого шару мастильного матеріалу й опорі тертю. Таким чином, режим тертя в підшипнику визначається в'язкістю (η), швидкістю ковзання і тиском p , точніше фактором $\eta v/p$.

Наочне представлення про умови переходу одного режиму тертя в інший дає діаграма Герси, у якій коефіцієнт тертя f зв'язаний з параметром $\eta v/p$ (рис. 11). Цей параметр називають характеристикою режиму підшипника. На діаграмі лінія aa , що проходить через крапку мінімуму коефіцієнта тертя, розділяє області тертя при рідинному й іншому видах змащення.

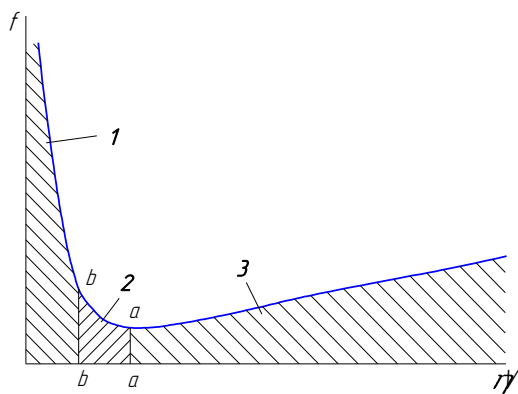


Рис. 11. Діаграма режимів тертя в підшипнику

1 – тертя незмазаних поверхонь; 2 – тертя при граничній і при напіврідинному змащенні; 3 – тертя при рідинному змащенні

3.5. Тертя котіння

Сила тертя котіння до 10 разів менше сили тертя ковзання. Опір котінню порозумівається деформаційними втратами в твердому тілі, яке нижче лежить. При терті котіння відбувається взаємне прослизання поверхонь, яке можна представити при розгляді котіння кульки (рис. 12). Окружність АВ кульки переміщається посередині канавки, а окружність CD стосується її краю. Окружність АВ проходить за один оборот кульки більша відстань, чим окружність CD. Ця різниця й обумовлює ковзання поверхонь тертя.

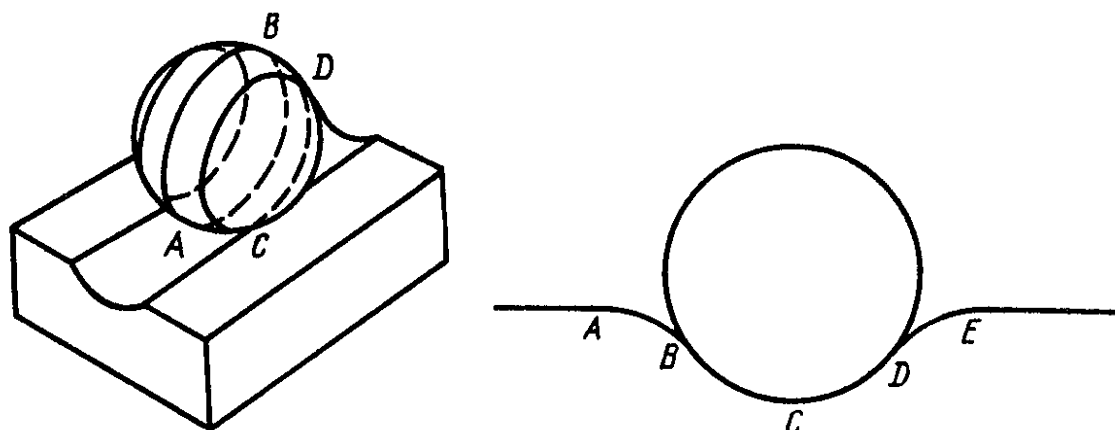


Рис. 12. а - кулька, що котиться по канавці; б – кулька, що котиться вправо по плоскій пружній основі

Для приробленого стану поверхонь по експериментальним даним сила тертя катання

$$F = k N^n / D,^m$$

де k – константа, що залежить від матеріалу; N – навантаження на кульку; D - діаметр кульки; n – 1,7...1...1,85; m–1,5...1,6

3.6..Основні поняття про механізм зношування пари тертя

Пари тертя – сукупність двох рухливо сполучених поверхонь деталей в умовах експлуатації або іспитів. Крім матеріалу, форми контактуючих поверхонь, відносного їхнього переміщення, пари тертя характеризується навколишнім середовищем, у тому числі видом мастильного матеріалу.

Зуби ковша екскаватора і ґрунт не утворюють пари тертя.

Вузол тертя – вузол машини, що містять пари тертя.

Зношування – руйнування поверхні твердого тіла, що виявляється в зміні його розмірів і форми.

Знос – результат зношування, виражений в одиницях довжини, обсягу, маси.

Інтенсивність зношування – відношення зносу деталі до шляху тертя або обсягові виконаної роботи.

Швидкість зношування – відношення зносу деталі до часу, протягом якого відбувалося зношування.

Зносостійкість – величина зворотна інтенсивності або швидкості зношування.

Граничний знос – знос, при якому подальша експлуатація стає неможливою унаслідок виходу деталі з ладу, неекономічне або неприпустимою через зниження надійності механізму.

3.6.2. Механізм зношування металевих поверхонь

Для детального аналізу процес зношування можна розділити на три явища (по И.В. Крагельському): взаємодія поверхонь тертя; зміни, що відбуваються в поверхневому шарі металу; руйнування поверхонь. Ці явища безупинно переплітаються і впливають один на одного.

Взаємодія поверхонь може бути механічним і молекулярним. Механічна взаємодія виражається у взаємному впровадженні і зачепленні нерівностей поверхонь у сукупності з їхнім зіткненням у випадку ковзання грубих поверхонь. Молекулярна взаємодія виявляється у виді адгезії і схоплювання. Адгезія може привести до виривів матеріалу. Схоплювання властиве тільки металевим поверхням і відрізняється від адгезії більш міцними зв'язками.

Зміни на поверхнях тертя обумовлені пластичною деформацією, підвищенням температури і хімічною дією навколишнього середовища.

Зміни, викликані деформацією, полягають у тім, що пружні багаторазові деформації через недосконалість структури матеріалу приводять у визначених умовах до втомлюваного викришування поверхонь котіння, а багаторазові пружні деформації мікронерівностей поверхонь ковзання розпушують структуру.

Вплив підвищення температури полягає в наступному.

1. Якщо в результаті тертя температура поверхневих шарів вище температури рекристалізації металу, то поверхневий шар не наклепується, а перебуває в стані підвищеної пластичності – відбувається вигладжування поверхні за рахунок розтікання всього металу або тільки одного складового сплаву.

2. Висока температура і пластична деформація сприяє дифузійним процесам.

3. При інтенсивному локальному підвищенні температури (температурному спалахові) і наступному різкому охолодженні на поверхні можуть утворюватися гартівні структури.

4. При мікроскопічному дослідженні контакту деталей в умовах високих навантажень і температур установлена можливість утворення магми-плазми (рис. 13). Взаємодія мікроконтактів відбувається за дуже короткий час (10^{-7} – 10^{-8} с), протягом якого до контакту підводиться велика енергія. Процес супроводжується емісією електронів.

Хімічна дія середовища полягає в наступному.

1. У середовищі повітря на оголених при зношуванні чистих металевих поверхнях утворюються окисні плівки, що охороняють поверхні від захоплення і зв'язаного з ним глибинного виривання.

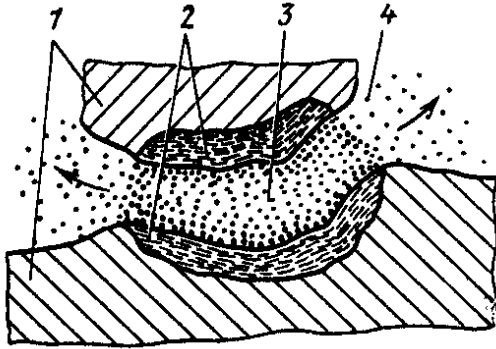


Рис. 13. Модель магми-плазми: 1 – вихідна структура; 2 – розплавлена структура; 3 – плазма; 4 – електрони, що рухаються при трибоємисії.

2. Металеві поверхні, взаємодіючи з присадками в олії, покриваються плівками хімічних сполук, роль яких аналогічна ролі окисних плівок.

3. Можливе насичення поверхні вуглецем у результаті розкладання мастильного матеріалу при високій температурі.

4. Агресивні рідини і газові середовища активізують зношування.

Елементарні види руйнування поверхонь наступні.

Мікрорізання. При впровадженні на достатню глибину тверда частка абразиву або продукту зношування може зробити Мікрорізання матеріалу з утворенням мікростружки.

Шкрябання. Що утворилася або з'явилася на поверхні тертя частка при ковзанні залишає подряпину. Остання обривається при виході елемента, що впровадився, із зони фактичного контакту, при роздробленні частки або віднесенні за межі області тертя.

Відшаровування. Матеріал при пластичному плинні може відтискуватися убік від поверхні тертя і після вичерпання здатності до подальшого плинні відшаровуватися.

Викрашування – це розповсюджений вид ушкодження робочих поверхонь деталей в умовах котіння. Для викрашування характерна довільна форма ямок

із рваними краями. Можуть фарбуватися: тверді структурні складового сплаву після того, як зноситься його м'яка основа; частки білого шару; острівці основної маси сірого чавуна, облямовані графітовими включеннями; частки покриття й ін.

Глибинне виривання виникає при відносному русі тіл, що коли утворився внаслідок їхньої молекулярної взаємодії спай міцніше одного або обох матеріалів. Руйнування відбувається в глибині одного з тел.

Перенос матеріалу належить усім видам тертя, крім тертя при рідинному змащенні, і виявляється при таких технологічних операціях, як різання, клепка і зборка болтових з'єднань.

3.6.3. Механізм зношування полімерів і гуми

Взаємодія полімерів і гуми з металевою поверхнею може бути або механічним, або молекулярним. Останнє виявляється тільки у виді адгезії. Зачеплення нерівностей поверхонь відіграє велику роль, тому що пластична деформація поверхневого шару полімеру під впливом нерівностей металевої поверхні, збільшуючи число плям контакту, збільшує і число зачеплень. Це вдруге стимулює розвиток пластичної деформації активних шарів. У результаті значно зростає сила тертя. Якщо матеріал еластичний, наприклад гума, то за інших рівних умов шорсткість металевої поверхні не робить такого впливу, тому що при відсутності пластичної деформації на переміщення затрачається менша робота.

На процес тертя між металом і полімерними матеріалами впливає температура. З підвищенням температури погіршуються пружні і пластичні властивості матеріалу, відбуваються фізико-хімічні процеси розпаду органічного сполучного або самого матеріалу. Крім того, якщо пластмаси мають високу адгезію до металу, то з підвищенням температури адгезія підсилюється.

3.6.4. Стадії зношування пари тертя

Якщо відкласти по осі абсцис час t роботи пари тертя (мал. 14), а по осі ординат знос U , то одержимо криву зношування деталі за часом. Тангенс кута нахилу α , утвореного віссю абсцис і дотичної до кривої в довільній крапці, визначає швидкість зношування в даний момент часу.

На кривій зношування в загальному випадку можна виділити три ділянки, що відповідають трьом стадіям зношування: I – початкове зношування, що спостерігається при приробітку поверхонь деталей; II – (прямолінійна ділянка кривої) – стає зношування; III – процес різкого зростання швидкості зношування, що відповідають стадії катастрофічного зношування.

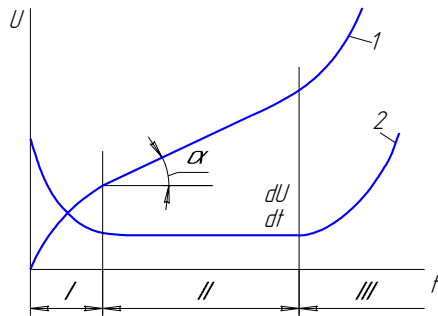


Рис. 14. Стадії зношування.

ЛЕКЦІЯ № 4

АНАЛІЗ ВИДІВ ЗНОСУ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ

4.1. Загальні зведення

4.2. Водневе зношування

4.3. Абразивне зношування

4.4. Окисне зношування

4.5. Зношування внаслідок деформації

4.6. Коррозійно-механічне зношування, корозія, кавітаційне й ерозійне зношування.

4.7. Схоплювання і заїдання поверхонь при терті.

4.8. Зношування при фреттінг-коррозії.

4.8. Трещиноутворення на поверхнях тертя.

4.9. Выборчий перенос

4.1 Загальні зведення. Формування поверхні, що зношується, відбувається в результаті підсумовування різних по інтенсивності і видам елементарних актів руйнування і змін механічних і фізико-хімічних властивостей матері-

алу під впливом зовнішніх факторів (середовище, температура, тиск, вид тертя, швидкість відносного переміщення поверхонь і ін.). Сукупність явищ у процесі тертя визначає вид зношування і його інтенсивність.

Вид зношування можна установити в першому наближенні по зовнішньому вигляді поверхні тертя.

Руйнування робочих поверхонь деталей машин, зв'язані з процесом тертя, класифікуються по видах: водневе зношування; абразивне зношування; окисне зношування; зношування у випадку пластичної деформації; корозійне, кавітаційне, ерозійне зношування; коррозійно – механічне зношування в сполученнях; зношування при фреттінг-корозії; тріщиноутворення на поверхнях тертя; виборчий перенос.

4.2 Водневе зношування, як один із процесів руйнування поверхонь при терті ковзання, установлено 30 – 35 років тому А.А. Поляковим і Д.Н. Гаркуновим. За рубежом водневе зношування знаходиться в початковій стадії вивчення.

Водневе зношування залежить від концентрації водню в поверхневих шарах тертьових деталей. Він виділяється з матеріалів пари тертя або з навколишнього середовища (мастильного матеріалу, палива, води й ін.) і прискорює зношування.

Водневе зношування обумовлене наступними процесами, що відбуваються в зоні тертя:

Інтенсивним виділенням водню при терті в результаті руйнування матеріалів, які мають водень, що створює джерело безперервного надходження водню в поверхневий шар сталі або чавуна:

адсорбцією водню на поверхнях тертя;

дифузією водню в шар сталі, який деформується, швидкість якої визначається градієнтами температур і напруг, що створює ефект нагромадження водню в процесі тертя;

особливим видом руйнування поверхні, зв'язаного з одночасним розвитком великого числа зародків тріщин по всій зоні деформування. Характерним для руйнування є миттєве утворення мілкодисперсного порошку матеріалу.

До останнього часу вважали, що при терті максимальна температура виникає на поверхні тертьової деталі. Відомо, що водень дуже легко дифундує в нагріті ділянки тіла. Більш того, думали, що наявний у матеріалі деталі водень віддаляється з зони тертя.

Тільки в останні роки установили, що при важких режимах тертя максимальна температура утвориться не на поверхні деталі, а на деякій глибині. Це створює умови, при яких водень, якщо він буде адсорбований на поверхні деталі, під дією температурного градієнта дифундує в глиб поверхні, там концентрується і викликає охрупчування поверхневих шарів, а отже, підсилює зношування.

Види водневого зношування. Мається два основних види зношування сталевих і чавунних деталей під впливом водню: зношування диспергіруванням і зношування руйнуванням.

Водневе зношування диспергіруванням. При цьому виді зношування яких-небудь змін у поверхневому шарі деталей унаслідок звичайного зносу не спостерігається. На поверхнях тертя немає виривів, задирів, помітного переносу матеріалу з однієї поверхні тертя на іншу. Водень підсилює диспергірування сталі або чавуна.

Водневе зношування руйнуванням має специфічну особливість: поверхневий шар сталевий або чавунний деталі руйнується миттєво на глибину до 1-2 мкм. Концентрація водню в сталі безупинно зростає. Водень попадає в мікротріщини, пори. При терті відбувається періодичне деформування поверхнього шару, і обсяг дефектних місць (порожнин) змінюється. Водень не маючи можливості вийти назад при зменшенні обсягу, прагне розширити порожнина, створюючи високу напругу. Повторення циклу викликає ефект нагромадження, що продовжується доти, поки внутрішній тиск у порожнинах не викликає руйнування сталі по всіх розвинених і тріщинах, що з'єдналися.

4.3 Абразивне зношування. Абразивним матеріалом називають мінерал природного або штучного походження, зерна якого мають достатню твердість і мають здатність різання (шкрябання). Абразивне зношування – це руйнування поверхні деталі в результаті її взаємодії з твердими частками при наявності від-

носної швидкості. До таких часток відносяться: а) нерухомо закріплені тверді зерна, що входять у контакт по дотичній або під невеликим кутом атаки до поверхні деталі (наприклад, шаржування сторонніми твердими частками м'яких антифрикційних матеріалів); б) незакріплені частки, що входять у контакт із поверхнею деталі (наприклад, абразивні частки в ґрунті при роботі землеоброблюваних машин); в) вільні частки в зазорі сполучених деталей; г) вільні абразивні частки, що утягуються в потік рідиною або газом.

Абразивні частки пружно деформують метал, залишаючись цілими або руйнуючи. Абразивна частка вдавлюється в метал деталі, якщо вона має більшу твердість, чим металеве тіло. При цьому вона при русі щодо поверхні може прошкрябати ризики або зрізати мікроскопічну стружку. Якби мікрорізання було провідним процесом руйнування поверхні або навіть супутнім, то інтенсивність зношування була б настільки високої, що робітники органи (наприклад, будівельних і дорожніх машин) виходили б з ладу після декількох годин роботи.

Частота впровадження абразивних часток мала, а їхня основна дія – шкрябання з відтискуванням матеріалу в сторони. По шляху шкрябання вільна частка може повернутися і припинити видавлювання матеріалу; вона може дійти до твердої структурної складового сплаву, «переступити» через неї і знову почати шкрябання. Її виступ може вирвати тверду складову, обломитися, частка може роздрібнитися.

Механізм абразивного зношування полімерних матеріалів визначається ступенем їхньої еластичності. У високоеластичний матеріал, наприклад, гуму абразивні частки легко вдавлюються, не викликаючи пластичної деформації навіть при глибокому впровадженні. При переміщенні абразивних часток по поверхні виникають сили тертя, що перед частки викликають стиск, а за нею – розтягання. При багаторазовому впливі відбудуться мікророзриви поверхні і віднесення часток.

Зношування від абразивних часток у зазорі пари тертя. Абразивні частки можуть потрапити в робочі порожнини машин і на поверхні тертя з повітря разом з пальними і мастильними матеріалами, а також іншими шляхами.

Повітряні фільтри двигунів автомобілів і інших машин можуть затримувати тільки великі частки пилу; дрібні частки проникають у двигун разом із засмоктуваним у циліндри повітрям. Здатність фільтрів до очищення 98-99 %. При експлуатації автомобілів і тракторів запиленість повітря складає 0,5-1 г/м³, при цьому з кожним кубометром повітря в циліндри засмоктується 5-20 мг пилу. Значна частина абразивних часток, що надійшли, віддаляється разом з відпрацьованими газами; інша частина зношує стінки циліндрів, шейки колінчатого вала, деталі інших пар тертя. Найбільше зношуються циліндри і поршневі кільця. Інтенсивність зношування деталей двигуна при забрудненому повітрі в кілька разів вище, ніж при чистому повітрі. Так, двигун автомобіля, експлуатованого в піщаних районах, вимагає капітального ремонту після пробігу в 15 тис. км, тоді як в умовах незапиленого повітря він проходить без ремонту 150 тис. км і більш.

При влученні абразивних часток у підшипники з м'яким антифрикційним шаром вони впресовуються в цей шар (шаржують його) і прискорюють зношування сполученого вала. Здатність підшипникового матеріалу працювати при мастильному матеріалі, забрудненому абразивними частками, є важливою його характеристикою. При товстому шарі бабітового залив влучення абразивних часток у підшипник не викликає серйозних відхилень від нормальної роботи.

4.4 Окисне зношування відбувається в тому випадку, коли на дотичних поверхнях утворюються плівки окислів, що у процесі тертя руйнуються і знову утворюються; продукти зношування складаються з окислів. Від інших видів корозійно-механічне зношування воно відрізняється відсутністю агресивного середовища, протікає при нормальних і підвищених температурах при терті без мастильного матеріалу або при недостатній його кількості.

Окисному зношуванню піддаються калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань тяг і важелів механізмів керування; шарнірно-болтові з'єднання підвісних пристроїв машин, що працюють без мастильного матеріалу, а також деякі деталі в парах тертя катання.

Підвищення температури сприяє росту окисних плівок, а вібрація – їхньому руйнуванню.

4.5 Зношування внаслідок пластичної деформації. Цей вид зношування (зминання) полягає в зміні розмірів або форми деталі в результаті пластичної деформації її мікрообсягів. Зминання є характерним видом ушкодження шпонкових пазів і шпонок, шліцевих з'єднань, штифтів і упорів, нарізних сполучень і інших деталей. Пластична деформація викликається або надмірними напруженнями, що допускаються, або випадковими значними перевантаженнями.

Зминання характерне для деталей, що входять у контакт з ударом.

Зі сталевих деталей пластичної деформації піддаються рейки, бандажі коліс рухливого складу залізниць.

Утворення вм'ятин і поглиблень на поверхнях тертя – один з видів ушкодження підшипників котіння. При здавлюванні сторонніх часток, що потрапили між тілами котіння і кільцями, можуть утворитися вм'ятини на доріжках котіння.

Одним з видів ушкоджень підшипників ковзання є видавлювання бабітового шару, що зв'язано з його низькою твердістю або з надмірними навантаженнями на підшипник. Опір зминанню бабітового шару підвищується зі зменшенням його товщини.

4.6 Коррозійно-механічне зношування, корозія, кавітаційне й ерозійне зношування.

Корозія. Корозією називають руйнування металів унаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії їхній з корозійним середовищем.

Чиста металева поверхня легко піддається хімічному впливові середовища. Однак, якщо в процесі корозії, що почалася, продукти її утворять міцно зв'язану з металом плівку, що ізолює поверхню від корозійного середовища, то метал здобуває пасивність стосовно неї. Процес штучного утворення тонких окисних плівок на поверхні металу для захисту його від корозії і додання виробі кращого виду називають пасівірованієм. Здатністю до пасівіровання володіють залізо, нікель, хром, алюміній і інші метали.

Хімічна корозія протікає при взаємодії металів із сухими газами і парами. Газової корозії піддаються циліндри двигунів внутрішнього згорання, випускні

клапани, камери згоряння газових турбін, елементи парових казанів і пароперегрівників, арматура печей і т.п.

Газова корозія найбільше часто відбувається внаслідок окислювання металу при високих температурах за рахунок кисню повітря або O_2 і CO_2 у продуктах згоряння палива.

На поверхні вуглецевої сталі газова корозія виявляється у виді плівок окислів уже при температурі 200-300⁰С. З підвищенням температури до 600⁰С в зв'язку з утворенням під дією внутрішніх напружень тріщин у захисній плівці швидкість корозії зростає. При подальшому зростанні температури швидкість корозії різко зростає й утворюється окалина.

Корозія робочих поверхонь деталей непрацюючих машин знижує зносостійкість пар тертя. У непрацюючих пар погіршується якість поверхні і після пуску машини знову починається приробляння; продукти корозії діють як абразив.

Кавітаційне зношування. Кавітація дослівно означає порожнину, порожнеча. Під кавітацією розуміють явище утворення в потоці рідини, що рухається по поверхні твердого тіла, порожнин у виді міхурів, наповнених парами, повітрям або газами, розчиненими в рідині і виділилися з неї. Що утворилися парогазові міхури розмірами порядку десятих часток міліметра, переміщуються разом з потоком, попадають в зони високих тисків. Пара конденсується, гази розчиняються й у порожнечі, що утворилися, з великим прискоренням спрямовуються частки рідини; відбувається супроводжуване ударом відновлення суцільності потоку.

Гідродинамічна кавітація спостерігається в трубопроводах і в потоках, що обтікає лопатки відцентрових, пропелерних насосів і лопати гідравлічних турбін і гребньових гвинтів. Явище кавітації викликає вібрації, стукоти і струси, що приводить до розхитування кріпильних зв'язків, обривові болтів, змінанню різьблень, фрикційної корозії стиків, порушенню ущільнень і втомлювані ушкодження.

Ерозійне зношування. Ерозія в широкому понятті – процес поверхневого руйнування речовини під впливом зовнішнього середовища. У машинобуду-

ванні ерозія має більш вузьке поняття – руйнування поверхні матеріалів унаслідок механічного впливу високошвидкісного потоку рідини, газу або пари. Руйнування металів під дією електричних розрядів також відноситься до ерозії.

Ерозійний вплив високошвидкісного потоку рідини, газу або пари складається з тертя суцільного потоку і його ударів об поверхню. У результаті тертя відбувається розхитування і вимивання окремих обсягів матеріалу. Рідина, що впроваджується при ударах у мікротріщини, що утворилися, поводить себе подібно клинові, розсовуючи стінки тріщини.

Ерозія і корозія досить часто протікають спільно. Корозійно-ерозійне зношування являє собою різновид корозійно-механічного зношування.

Корозія металу в тому або іншому середовищі може відбуватися незалежно від того, мається чи тертя ні; спільна дія корозії, навантаження і механічного зношування підсилює інтенсивність руйнування поверхонь деталей. Бувають випадки, коли корозія стає активною тільки завдяки третю сполучених деталей.

4.7 Схоплювання і заїдання поверхонь при терті. Схоплювання при терті – приварювання, зчеплення, місцеве з'єднання двох твердих тіл під дією молекулярних сил. При цьому утворюються міцні металеві зв'язки в зонах безпосереднього контакту поверхонь. У місцях схоплювання зникає границя між дотичними тілами, відбувається зрощування одне- і різнойменних металів.

На утворенні міцних металевих зв'язків між двома заготовками засновані такі технологічні процеси, як ковальське зварювання, контактне зварювання й ін.

Схоплювання між інструментом і оброблюваним металом спостерігається при обробці металів тиском, а при різанні металів воно виявляється у виді наросту на різці.

Єдиної точки зору на механізм процесу схоплювання при терті поки немає.

Схоплювання матеріалів виявляється в найрізноманітніших формах. Починається воно з мікроскопічних ушкоджень, переходячи поступово до локалі-

зованого руйнування поверхневого шару, помітному неозброєним оком, і до глибинного виривання.

При експлуатації машин для якісної оцінки ступеня ушкодження поверхонь використовують наступні терміни.

Натир – ділянка поверхні тертя, що відрізняється по кольорі від прилягаючих ділянок і які отримують найбільший тиск.

Задир – утворення в результаті схоплювання помітної неозброєним оком борозни з відтискуванням матеріалу як у сторони, так і по напрямку ковзання. Може утворитися і група борозен.

Заїдання – найбільш яскрава форма прояву схоплювання. Утворюються широкі і глибокі борозни з нерівними краями, що іноді злилися; маються великі нарости; можливий оплавлення поверхні. Може відбутися повне заклинювання деталей. Заїдання спостерігається в важконавантажених підшипниках ковзання, зубцюватих зачепленнях, що передають значні моменти, що крутять, шарнірних з'єднаннях, у деталях циліндропоршневої групи двигунів, у направляючих верстатів і інших машин, у нарізних сполученнях і т.п.

4.8 Зношування при фреттінг-корозії. Фреттінг-корозія – це процес руйнування щільно контактуючих поверхонь пара метал-метал або метал-неметал при їхніх коливальних переміщеннях. Для порушення фреттінг-корозії достатні переміщення поверхонь з амплітудою 0,025 мкм. Руйнування полягає в утворенні на дотичних поверхнях дрібних виразок і продуктів корозії у виді нальоту, плям і порошку. Цьому виду зношування піддаються не тільки вуглецеві, але і корозійно-стійкі сталі в парах тертя сталь-сталь, сталь-олово або алюміній, сурма, а також чавун-бакеліт або хром і багато інших пар тертя.

Унаслідок малої амплітуди переміщення дотичних поверхонь ушкодження зосереджуються на невеликих площадках дійсного контакту. Продукти зношування не можуть вийти з зони контакту, у результаті виникає високий тиск і збільшується їхня абразивна дія на основний метал.

Виразки і продукти корозії на сполучених поверхнях валів і напресованих на них дисків, коліс, муфт і кілець підшипників котіння, на пригнаних поверх-

нях шпонок і їхніх пазів, на опорних поверхнях пружин, на затягнутих стиках, у заклепувальних з'єднаннях між аркушами, на заклепках і в отворах, на болтах і т.п. – результат прояву фреттінг корозії.

Універсальних методів боротьби з фреттінг-корозією немає.

4.9 Трещиноутворення на поверхнях тертя.

Втомлювальне руйнування антифрикційного шару відбувається в підшипниках, тривалому навантаженню перемінними по напрямку і величині зусиллями. Втомлювальні тріщини, виникаючи на поверхні тертя, поширюються всередину шару. Поступово подовжуючи, дрібні тріщини утворюють сітку на окремих обмежених або великих ділянках поверхні. Розкриття тріщин відбувається під дією пульсуючого тиску олії. Тріщина, досягши підстави антифрикційного шару, змінює свій напрямок, поширюючи по стику між шаром і підставою, у результаті окремі ділянки поверхневого шару відокремлюються, а потім фарбуються. Велику роль у відділенні часток грає мастильний матеріал, що, проникнувши в тріщину, сприяє відривові металу. Іноді тріщина не доходить до стику і просувається поблизу його і паралельно йому. Викрашування великих шматків шаруючи може супроводжуватися поверхневими виразками.

З підшипникових матеріалів найбільший опір втоми має срібло.

Розтріскування поверхонь тертя в результаті термічного впливу спостерігається на бандажах залізничних коліс, чавунних барабанах гальм і сполучених з ними гальмових колодках, а також у плоских антифрикційних парах з кільцевою робочою поверхнею.

Утворення тріщин підвищує знос поверхонь тертя: гострі крайки роблять дія, що ріже, а поблизу крайок відбувається викрашування матеріалу. Тріщини згодом забиваються продуктами зношування, що діють як абразив. Вихід радіальних тріщин на циліндричну поверхню кілець торцевих контактних ущільнень обертових валів порушує герметичність.

Мірою боротьби з терморозтріскуванням може виявитися вибір матеріалу. Чим вище теплопровідність матеріалу, чим менше температурне розширення, чим пластичніше матеріал, тим менше імовірність утворення в ньому тріщин. Схильні до терморозтріскування тендітні матеріали і матеріали, що воло-

діють малою теплопровідністю – скло, кераміка, тверді сплави, загартовані сталі, а також сплави з великим змістом нікелю або з вісмутом, що хоча і мають невисоку твердість, але мають малу теплопровідність. Мало схильні до розтріскування вуглеграфіти, вони мають високу теплопровідність і малий коефіцієнт лінійного розширення.

ЛЕКЦІЯ № 5 СУТНІСТЬ ЕФЕКТУ НЕЗНОШУВАННЯ.

5.1. Ефект незношування (виборчий перенос при терті).

5.2. Енергетичні критерії тертя та зносу.

5.1. Ефект незношування (виборчий перенос при терті).

В останні роки в нашій країні, у ближнім і далекому зарубіжжі широко вивчається «ефект незношування» (виборчий перенос при терті – наукове відкриття № 41, СРСР, 1964). Автори: професори И.В. Крагельский і Д.Н. Гаркунов.

У середині 50-х років при дослідженні технічного стану вузлів тертя літака МУЛ на різних етапах його експлуатації було виявлене явище мимовільного утворення тонкої плівки міді на поверхнях деталей важконавантажених вузлів у парі тертя сталь – бронза при змазуванні спиртогліцериновою сумішшю. Плівка міді товщиною 1-2 мкм у процесі тертя покривала як бронзу, так і сталь. Вона різко знижувала інтенсивність зношування пари тертя і зменшувала силу тертя приблизно в 10 разів. Майже в той же час подібне явище було виявлено в парах тертя сталь-бронза при використанні змащення ЦИАТИМ-201 (у болтових-шарнірно-болтових з'єднаннях літаків), а також у парі сталь-сталь-сталь у вузлах тертя компресора домашнього холодильника при змазуванні маслофреоновий сумішшю.

Дослідження показали, що мідна плівка в парі бронза-сталь утвориться в результаті анодного розчинення бронзи (легуючі елементи цинк, олово, алюміній, залізо ідуть у мастильний матеріал, і поверхня збагачується міддю). Після того як поверхня бронзи і стали покриється міддю, розчинення припиняється,

установлюється режим виборчого переносу. У вузлах тертя компресора домашнього холодильника мідна плівка на поверхнях тертя в парі сталь-сталь виникла в результаті розчинення мідних трубок охолоджувача компресора. Іони міді, надходячи в масляно-фреонову суміш, рухалися в зону контакту, де формувалася захисна мідна плівка. Компресори холодильників можуть працювати без ремонту десятки років.

Протягом тривалого часу головним напрямком боротьби зі зношуванням і зменшенням сили тертя було підвищення твердості поверхні тертя деталей машин. У цьому випадку зменшується взаємне впровадження однієї поверхні в іншу, знижуються пластичні деформації й окисні процеси, а також дія абразиву. Розроблено багато методів підвищення твердості деталей: цементування, азотування, ціанірованіє, поверхневе загартування й ін. Багаторічний досвід показує, що це дозволило підвищити надійність і довговічність тертьових деталей.

Однак зі збільшенням навантажень у вузлах тертя, що погіршує в деяких випадках умови змазування деталей із застосуванням у машинах спеціальних рідин традиційні методи підвищення зносостійкості деталей шляхом збільшення їхньої твердості перестали себе виправдувати. Фактична площа контакту зі збільшенням твердості матеріалу зменшується. У результаті неминучих перекосів деталей при експлуатації збільшується можливість їхнього заїдання або росту інтенсивності зношування.

Про самоорганізацію у вузлах тертя.

У пошуках нових шляхів, що підвищують зносостійкість деталей машин, доцільно звернутися до живої природи. Аналіз навантажених рухливих зчленувань показує, що є два типи вузлів тертя – відкриті і закриті. У відкритих вузлах тертя працює твердий матеріал по твердому – це зуби тварин. Закриті вузли тертя це суглоби живих організмів: тут кіста покрита м'яким хрящем, на поверхні якого мається тонка рухлива полімерна плівка. Таким чином, у суглобі в парі тертя працюють два однакових матеріали, причому м'який по м'якому. Подібні пари тертя в живих організмів є універсальними вузлами, що володіють «**незношуванням**».

До останнього часу думали, що тертя є руйнівним процесом. Зворотне твердження вважалося абсурдним, як і створення вузла тертя, який би не зношувався. Однак природа подбала і про машини.

Розглянемо один із прикладів самоорганізації – вузол тертя компресора побутового холодильника. Компресор холодильника, як уже відзначалося, працюють десятки років у тяжких умовах (постійні пуски і зупинки) практично без зносу. Тертьові деталі виконані зі сталі, мастильним матеріалом служить суміш 50% олії і 50% фреону. У процесі роботи на поверхнях тертя – шейках колінчатого вала (шатунної і корінних), сполучених підшипниках, поршні і циліндри – мимовільно утвориться тонка мідна плівка товщиною 1 – 2 мкм. Плівка формується з іонів міді, що утворюються в мастильному матеріалі в результаті незначного розчинення мідних трубок охолоджувача. До місця контакту деталей тертя іони приносить охолодна суміш, що є також мастильним матеріалом.

Активність масляно-фреонової суміші стосовно мідних трубок охолоджувача підвищується в результаті утворення в зоні тертя при початковій роботі компресора слабких кислот (окислювання олії). Після того як у зоні контакту утвориться плівка міді, умови тертя деталей змінюються: знижується тиск, зменшується сила тертя і падає температура. Процеси, у результаті яких утвориться плівка міді (окислювання олії і розчинення трубок), можуть припинитися.

У випадку порушення суцільності мідної плівки режим роботи сполучення стає більш важким. Це викликає посилення окисних процесів у мастильному матеріалі і, як наслідок, розчинення міді трубок і «заліковування» ушкодженої поверхні. Автоматизм захисту поверхонь тертя від зношування забезпечує тривалу безызносную роботу компресора.

У сталому режимі тертя мідна плівка не руйнується. Вона може переходити з однієї поверхні тертя на іншу. Продукти зношування утримуються в зазорі електричними силами.

Металеву захисну плівку, що утвориться в процесі тертя, називають сервовитной (від лат. servo-witte – рятувати життя). Вона являє собою речовину, утворена потоком енергії й існуюче в процесі тертя. Тертя не може знищити плівку, воно неї створює. Утворення захисної плівки відноситься до нового

класу явищ неживої природи, що самоорганізуються. Їхнє вивчення тільки почалося.

При деформуванні сервовитна плівка не руйнується і не піддається втомлюваному руйнуванню. Вона сприймає всі навантаження, покриваючи шорсткості поверхонь тертя сталевих деталей, що практично не беруть участь у процесі тертя. У цих умовах м'який матеріал працює по м'якому. Навантаження розподіляється рівномірно по поверхні тертя, тому на одиницю площі вона незначна. Це сприяє продовженню ресурсу вузла тертя.

5.2 Енергетичні критерії тертя і зносу.

Як критерії показників якості поверхонь деталей, у залежності від умов їхньої експлуатації, можуть бути використані: граничне навантаження, час або число циклів навантаження до утворення дефектів, границі текучості і повзучості, тимчасовий опір, критичні деформації, твердість поверхні й ін.

Ці критерії більш прийнятні до неприпустимих процесів пошкоджуваності поверхонь тертя деталей і робочих органів машин: схоплювання, контактна втома, Фреттінг-процес, корозійно-механічні й абразивні процеси.

Нами ж розглядається процес нормального тертя і зношування (механохімічний знос і його основний прояв окисний знос) і заходу щодо зниження його рівня. Нормальні процеси визначають ресурси роботи машин - їхня довговічність, продуктивність і економічність.

Багато властивостей тіл зв'язані зі зміною їхньої вільної енергії при зовнішньому впливі, що, у свою чергу, визначає зміна властивостей і розмірів тіла.

Розглянемо енергетичні критерії, що роблять визначальний вплив на зносостійкість поверхневих шарів, сформованих різними технологіями. Достоїнство енергетичного підходу полягає в можливості інтегрального опису за допомогою енергетичних критеріїв впливу численних параметрів, від яких залежать процеси тертя і зносу.

Тому що великі механічні навантаження, що виникають при зовнішнім терті, приводять до різкої зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів і їхньої корінної трансформації, (механічна енергія стимулює хімічні реакції), те за критерій зносу можна прийняти енергію активації процесу зносу.

Якщо припустити, що під впливом пружної зовнішньої напруги σ , прикладеного до покриття, енергія зв'язку U_0 знижується на величину енергії деформації $\gamma\sigma$, то, оскільки розривши зв'язку являє собою дискретну стадію активації в процесі зносу, різниця $U_0 - \gamma\sigma$ розглядається як енергія активації процесу зносу E_A .

Для одержання достовірної інформації про правильність обраного способу зміцнення поверхневого шару виробу нам необхідна математична модель зносу сформованих покриттів, що зв'яже величину зносу поверхні з роботою витраченої на тертя й енергією активації процесу зносу.

Зі збільшенням величини роботи, витраченої на тертя ($A_{тр}$), знос збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації E_A .

Виходячи з експериментальної залежності Δm від $(-A_{тр})^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta m$ пропорційно $(-A_{тр})^{-1}$ і величині E_A , тобто

$$\ln \Delta m \sim (-A_{тр})^{-1}, E_A$$

Переходячи від наближеної рівності до точного

$$\Delta m = C \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}} \quad (1)$$

де $C = \Delta m_H$ – знос насичення, тобто максимально припустимий знос у період сталого зношування.

Тоді

$$\Delta m = \Delta m_H \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}} \quad (2)$$

Залежність (2) назвемо рівнянням зносу.

Приймаючи у формулі (2)

$$E_A = A_{тр}, \quad (3)$$

маємо:

$$\frac{\Delta m}{\Delta m_H} = e^{-1}. \quad (4)$$

Звідси E_A - це фізична величина, рівна такій роботі тертя, при якій $\Delta m = \frac{\Delta m_n}{e}$, тобто Δm в e раз менше Δm_n . Назвемо її константою зносу поверхонь. Розмірність $[E_A] = \text{Дж}$.

Для того щоб перейти від вагового зносу до лінійного, тобто зносу, що визначає ступінь зміни розміру виробу по глибині, необхідне рівняння зносу (2) записати у виді

$$\Delta h \cdot S \cdot r = \Delta h_n \cdot S \cdot r_n \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{\text{сп}}}}, \quad (5)$$

де S – площа поверхні, що зношується, r, r_n - відповідно щільність поверхневого шару під час сталого зношування й у період настання зносу насичення, тобто зносу на найбільшу глибину періоду сталого зношування Δh_n .

Після необхідних перетворень маємо

$$\Delta h = \Delta h_n \cdot \frac{r_n}{r} \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{\text{сп}}}}. \quad (6)$$

Таким чином, при визначенні лінійного зносу необхідно робити виправлення на зміну щільності шару, що зношується.

Підставляючи в (6) співвідношення (3), маємо:

$$\Delta h = \Delta h_n \cdot \frac{r_n}{r} \cdot e^{-1}. \quad (7)$$

Звідси

$$\frac{\Delta h \cdot r}{\Delta h_n \cdot r_n} = e^{-1}, \quad (8)$$

що збігається з (4).

Отже, E_A – це фізична величина, рівна такій роботі тертя, при якій $\Delta h \cdot r$ в e раз менше $\Delta h_n \cdot r_n$. Відзначимо, що при $r_n = r$, $\frac{\Delta h}{\Delta h_n} = e^{-1}$.

Величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу визначеної кількості речовини (Δm_x) або для одержання необхідного лінійного зносу (Δh_x), можна визначити з рівнянь (2) і (6).

Тоді відповідно:

$$A_{\text{пр.}} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta m_n}{\Delta m_x}}; \quad (9)$$

$$A'_{\text{пр.}} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta h_n \cdot r_n}{\Delta h_x \cdot r_x}}. \quad (10)$$

У загальному виді алгоритм розрахунку енергетичних критеріїв полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється вагарні і Δm і лінійний Δh знос при різних величинах, зворотних роботі тертя $(A_{\text{тр.}})^{-1}$.
2. Строяться графіки залежності $\ln(\Delta m)$ і $\ln(\Delta h)$ від $(A_{\text{тр.}})^{-1}$.
3. Визначається енергія активації (константа зносу E_A), як $E_A = |\operatorname{tg} \alpha|$, де α - кут нахилу прямих залежностей $\ln(\Delta m)$ і $\ln(\Delta h)$ від $(A_{\text{тр.}})^{-1}$.
4. По відрізку, що відтинається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $A_{\text{тр.}}^{-1} = 0$ ($\ln(\Delta m) = \ln(\Delta m_n)$ і $\ln(\Delta h) = \ln(\Delta h_n)$ при $(A_{\text{тр.}})^{-1} \rightarrow 0$), знаходиться вагарний і лінійний знос насичення, відповідно Δm_n і Δh_n .
5. По формулах (9) і (10) визначається робота, необхідна для зносу визначеної кількості речовини.

Таким чином, можна вирішувати як пряму задачу - визначення вагового і лінійного зносу по відомій роботі тертя, так і зворотну - задаючи вагарний або лінійний знос визначати необхідну для цього роботу тертя, а, отже, і час, витрачений для виконання цієї роботи. Крім того, знаючи час досягнення визначеної величини зносу, ми маємо можливість для більш раціональної експлуатації виробів, вчасно призначаючи час ремонту і не допускаючи до катастрофічного зносу поверхня тертя.

Константа рівняння зносу (енергія активації процесу зносу) може служити критерієм для вибору найбільш прийнятної технології підвищення якості поверхневих шарів виробів.

ЛЕКЦІЯ № 6 КОНСТРУКТИВНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ.

6.1. Матеріали пари тертя.

6.2. Розташування пар тертя по твердості.

6.3. Змазування деталей сполучення.

6.1. Матеріали пари тертя.

Тертьові деталі в залежності від їхнього призначення виготовляють з конструкційних, фрикційних, зносостійких і антифрикційних матеріалів широкої номенклатури. У багатьох випадках матеріали наносять у виді покриття, плівок або накладок на кістяк з основного конструкційного матеріалу.

Іноді при специфічних вимогах до електропровідності, стійкості до впливу хімічно агресивних середовищ тертьові деталі виготовляють зі сталей і інших сплавів спеціального призначення, окислів металів, металокерамічних і неметалічних матеріалів.

З **конструкційних сталей** виготовляють деталі, що повинні задовольняти умовам високої міцності, твердості або піддатливості і мати на тих або інших ділянках поверхні тертя. Це деталі типу валів, пальців, болтів шарнірів, зубчастих коліс і т.п. **Чавун** широко розповсюджений як матеріал для станин, повзунів, столів кареток, напрямні яких піддані тертю.

Фрикційні матеріали – це матеріали, що у контакті з металевою поверхнею мають високий коефіцієнт тертя. Застосовуються в гальмах і фрикційних муфтах валів, розділяються на органічні (дерево, шкіра, пробка, повсть), металеві (чавун, сталі У6, У7, марганцевиста сталь і ін.), асбестокаучукові, пластмасові (текстоліт, асботекстоліт, фібра), металокерамічні на мідній і залізній основах.

Зносостійкими називають матеріали, що навіть у тяжких умовах навантаження порівняно мало зношуються. Зносостійким матеріалом повинні володіти плунжерні пари, зуби ковшів екскаваторів і навантажувачів, лемеша плугів і робітники органи більшості технологічних машин. Як зносостійкі матеріали використовують конструкційні сталі, зміцнені по всьому обсязі або по робочих

поверхнях деталей, спеціальні сталі, чавуни, порошкові матеріали, гуму, пластмаси й ін.

Антифрикційним називають будь-який підшипниковий матеріал із твердістю меншої твердості сполученої деталі.

Поняття «антифрикційність» включає комплекс властивостей, яким повинний задовольняти підшипниковий матеріал: достатню статичну і динамічну міцність при підвищених температурах; здатність утворювати міцний граничний шар мастильного матеріалу і швидко відновлювати його в місцях, де він зруйнований; низький коефіцієнт тертя при недосконалому змащенні; відсутність заїдання на валові у випадку перерви в подачі мастильного матеріалу; високі теплопровідність, теплоємність, припрацьовуваність; гарну зносостійкість сполучення; недефіцитність і високу технологічність.

Деякого правила сполучення матеріалів.

Підбор найбільш підходящих матеріалів для пар тертя ковзання можна в кожному окремому випадку зробити тільки на підставі ретельного зіставлення умов роботи тертьових деталей, вихідних властивостей матеріалів і тих змін, які вони перетерплюють на поверхнях тертя й інших обставин. Сформулюємо деякого правила підбора матеріалів.

1. Сполучити твердий матеріал з м'яким, що має температуру рекристалізації нижче середньої температури поверхні тертя при роботі. При такому сполученні метали добре протистоять заїданню і характеризуються високою надійністю.

2. Сполучити твердий метал із твердим (сполучення пар з азотованної, хромованої і загартованих сталей). Такі пари тертя мають високу зносостійкість унаслідок малого взаємного впровадження їхніх поверхонь. Нанесення припрацьованих покриттів підвищує надійність пар у найбільш небезпечний період роботи – під час приробляння.

3. Уникати сполучень м'якого матеріалу з м'яким, а також пара з однієї менших матеріалів (незагартована сталь по незагартованій сталі, алюмінієвий сплав по алюмінієвому, хром по хрому, нікель по нікелі, пластмаса по пластмасі), за винятком пар з політетрафторетілена і поліетілена. Подібні пари мають

низьку зносостійкість і надійні в роботі. При незначних перевантаженнях у парах утворюються вогнища захоплення, і відбувається глибоке виривання матеріалів із взаємним їх налипанням на поверхні тертя.

Застосовувати у важкодоступних для змазування конструкціях пористі, порошкові матеріали й антифрикційні сплави.

5. Застосовувати в якості фрикційних і антифрикційних матеріалів пластичні маси. У ряді випадків вони підвищують надійність і термін служби вузла тертя, знижують масу конструкції і витрата дефіцитних кольорових металів, зменшують вібрації і поліпшують акустичні властивості машин.

6. Прагнути шляхом вибору матеріалів пари тертя, мастильних матеріалів і присадок до них створювати при роботі пари умови реалізації режиму виборчого переносу.

7. Застосовувати матеріали, що важко піддаються науглиценню.

6.2 Про розташування матеріалів пара тертя по твердості.

Для пари, утвореної поверхнями тертя, що мають різні твердості і розміри, можна виділити дві умови:

$$1) H_1 > H_2; S_1 < S_2; \quad 2) H_1 < H_2; S_1 < S_2,$$

де H_1, H_2 - твердість поверхонь тертя; S_1, S_2 – відповідні площі поверхонь.

Пари з розташуванням матеріалів, що задовольняють першій умові, назовемо прямою парою тертя, а задовольняючій першій умові – зворотною парою. У випадку прямої пари тертя по більшій поверхні ковзає більш тверде тіло, а у випадку зворотної пари – більш м'яке тіло. Прикладами прямої пари є ковзання загартованого супорта по чавунній термічно неопрацьоване станині і ковзання хромованого поршневого кільця по поверхні циліндра з перлітного чавуна. Зворотною парою буде хромоване робоче дзеркало циліндра і чавунне кільце. Вал і підшипник з бабітовим шаром при навантаженні постійного напрямку, прикладеної до обертового вала, являє собою зворотну пару.

Щоб визначити, яка пара тертя – пряма або зворотна переважніша для даної конструкції, варто строго установити вимоги до пари у відношенні надійності її роботи, зносостійкості, економічності й умов експлуатації. Недостатня надійність пари тертя в зв'язку з невідповідним підбором матеріалів може вирази-

тися в схоплюванні і заїданні. Досвід експлуатації машин, стендові іспити тертьових деталей і лабораторні дослідження показують, що зворотні пари тертя більш стійки до заїдання, а при наявності заїдання мають менші ушкодження поверхонь.

6.3 Змазування деталей машин.

Змазування поверхонь тертя деталей машин необхідно для зменшення сил тертя, інтенсивності зношування і нагрівання деталей, а також для запобігання поверхонь від корозії під час зупинки машини. Крім того, мастильний матеріал робить що демпфірує і прохолоджує дія. Поток мастильного матеріалу приділяється як теплота, що виникає при терті, так і теплота від нагрітих частин машини. Поток олії виносяться також із зони тертя продукти зношування. Тертя при змазуванні хоча б такими малов'язкими рідинами, як гас або вода, менше, ніж при терті без мастильного матеріалу. При терті чавуна по чавуні на машині Амслера з питомим навантаженням 1,25 МПа й однакової швидкості ковзання були отримані наступні результати: коефіцієнт тертя при змазуванні мінеральною олією 0,02, гасом 0,06, водою 0,22, без змазування 0,6; сумарний масовий знос пари зразків у відносних одиницях складав відповідно 1; 1,9; 17,2; і 437.

Мастильні матеріали можуть бути рідкі (олії, вода, сірчана кислота високої концентрації в деяких машинах хімічної промисловості й інші рідини), у виді емульсії, газоподібний, пластичний і тверді (тальк, графіт, дисульфід молібдену й ін.).

Фізико-хімічні характеристики мастильних матеріалів.

Фізико-хімічні характеристики мастильних матеріалів (СМ) – це регламентовані стандартами показники для оцінки якості. Такими показниками є: щільність номінальна (при заданій температурі), в'язкість номінальна (визначається звичайно при температурі 50 або 100⁰С); температура спалаху – щонайнижча температура спалаху пар що нагрівається СМ при наближенні полум'я в умовах звичайного тиску; температура застивання - найвища температура, при якій олія втрачає плинність по визначеному допуску (олія після нахилу стандартної пробірки під кутом 45⁰ залишається нерухомим протягом 1 мін); кислотне

число (КІН) – число міліграмів їдкою калію, що вимагається для нейтралізації 1 м СМ; коксівність – відношення (у відсотках) до навішення випробуваного СМ; зольність – наявність у СМ неспалених речовин; зміст механічних домішок; зміст води; зміст водорозчинних кислот і лугів; корозійний вплив на залізні і мідні пластинки; зміст сірки; зміст розчинників – фенолу, крезолу, нітробензолу і фурфуролу, застосовуваних при селективному очищенні СМ.

За винятком в'язкості, усі показники або побічно й обмежено характеризують поведінку СМ в експлуатації, або служать для контролю їхньої якості при виробництві транспортуванні і збереженні.

Присадки до мастил.

Для поліпшення експлуатаційних властивостей мінеральних олій застосовують спеціальні добавки до них, називані присадками. Присадки до олій повинні в них добре розчинятися, не випадати у виді осаду, не затримуватися на фільтрах мастильної системи і не осідати на поверхнях тертя. По призначенню присадки бувають: антифрикційні – для стабілізації сил тертя або зниження їх в умовах граничного тертя; протизношні – для зменшення інтенсивності зношування поверхонь; протизадирні – для запобігання і зм'якшення процесу заїдання поверхонь; в'язкостні – для поліпшення в'язкостно - температурних характеристик олій; противоокислювальні (інгібітори) - для уповільнення окислювання олії киснем повітря; застосування їх сповільнює властивості олій що кородують; антикорозійні для зменшення корозійного дії олій на метали; миючі – для зменшення вуглицевих відкладень на деталях двигунів; протипіни – для запобігання спінювання олій і для швидкого руйнування піни; багатофункціональні – для поліпшення одночасно декількох властивостей олій.

Пластичні мастильні матеріали. Вони легко деформуються під зовнішнім впливом. Пластичні властивості залежать від температури. Пластичні СМ являють собою мінеральні олії, загущені милами, тобто солями рослинних, тваринних і синтетичних жирних кислот. У залежності від складу мила пластичні СМ розділяються на кальцієві, натрієві, алюмінієві, магнієві й ін.

Основними якісними характеристиками пластичних мастильних матеріалів є температура каплепадиння, penetрація і зміст механічних домішок.

Температура каплепадіння – це температура падіння першої краплі СМ, що нагрівається в капсулі приладу в строго визначених умовах. Вона повинна бути на $15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище передбачуваної робочої температури вузла тертя.

Пенетрація виражається в градусах і являє собою глибину занурення стандартного конуса у випробовуваний СМ за 5 з, виражену в сотих частках сантиметра. Чим вище число пенетрації, тим менше пластичність.

Тверді мастильні матеріали (ТСМ) під механічним впливом розщеплюються й утворюють на поверхні тертя тонку плівку, що розділяє поверхні тертя і має низький коефіцієнт тертя. Такими властивостями володіє графіт, дисульфід молібдену й інші речовини. Коефіцієнт тертя ТСМ дорівнює $0,05\text{--}0,15$. Недоліком ТСМ є більш низький відвід теплоти від поверхні тертя, чим у рідких олій, а також мала довговічність. Поповнення ТСМ часте сполучено з труднощами конструкційного й експлуатаційного характеру. Однак у деяких вузлах тертя, що працюють в умовах вакууму, єдиним способом змазування є застосування ТСМ.

ТСМ застосовується у виді порошків, олівців, твердих мастильних полімерних плівок і брикетів.

Металоплакуючі мастильні матеріали – це матеріали, що містять (по масі від 0, до 10%) присадки: порошки металів, сплавів і їхніх окислів. При використанні металоплакуючих СМ реалізується ефект незносності, що виявляється в тім, що на тертьових деталях у процесі роботи вузлів тертя формується тонка захисна металева плівка, що самовідновлюється, із введених у СМ присадок. Товщина плівки складає від декількох атомних шарів до 1-2 мкм.

Металоплакуючі СМ застосовують у важконавантажених вузлах тертя катання і ковзання в літаках, автомобілях, двигунах внутрішнього згорання й ін.

Використання металоплакуючих СМ дозволяє підвищити довговічність вузлів тертя (у 2-3 рази), знизити втрати на тертя на (30-200%) і тим самим підвищити ККД машин і устаткування, зменшити витрату мастильних матеріалів (у 2-3 рази), збільшити період між мастильними роботами (до 3 разів).

ЛЕКЦІЯ № 7 ТЕХНОЛОГІЧНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

- 7.1 Термічна та хіміко-термічна обробка робочих поверхонь.
- 7.2 Металізація напилюванням.
- 7.3 Поверхнєве пластичне деформування.

7.1 Термічна та хіміко-термічна обробка робочих поверхонь.

Для підвищення довговічності взаємодіючих деталей застосовуються різні технологічні способи їхнього зміцнення. До основного з них відносяться: термічна, хіміко-термічна, фізико-хімічна обробка робочих поверхонь деталей, поверхнєве пластичне деформування, гальванічні покриття, металізація напилюванням і наплавлення поверхонь, ЕЕЛ і ін.

Основною задачею застосовуваних методів є підвищення якісних параметрів поверхневого шару: підвищення твердості і мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості і відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знака залишкових напруг, збільшення втомлюваної міцності і т.п.

З метою одержання високої твердості в поверхневому шарі деталі зі збереженням грузлої серцевини, що забезпечує захисні властивості поверхні з механічною міцністю основи, застосовують поверхнєве загартування або хіміко-термічну обробку.

Поверхнєве загартування відрізняється від хіміко-термічної обробки меншою тривалістю процесу. Існує кілька методів поверхневого загартування: у розплавлених металах або солях, полум'яне загартування, електрострумом високої частоти. Усі вони полягають у нагріванні поверхневого шару з наступним загартуванням деталі.

У практиці найбільш широкі застосування знайшов останній спосіб (високочастотне загартування) при нагріванні поверхневого шару деталі перемінним струмом високої частоти (СВЧ). Основні переваги методу: можливість контролювати глибину загартованого шару від часток міліметра до 10 мм і більш, мінімальне коробління, висока продуктивність. Загартування СВЧ застосову-

ється тільки в масовому і крупносерійному виробництві через високу вартість устаткування і відпрацьовування технології.

Одним з напрямків збільшення опору тертю і зношуванню деталей є створення на їхніх поверхнях шарів хімічних сполук, властивості яких відрізняються від властивостей основних металів. До такої категорії методів, що підвищують зносостійкість металів, відноситься хіміко-термічна обробка, при якій на поверхні металів утворюються з'єднання з вуглецем, азотом, сіркою й іншими хімічними елементами. Ці методи обробки, що одержали назви: цементация, азотування, ціанірованіє, борірованіє, хромування і ряд інших, останнім часом знаходять застосування в машинобудуванні переважно для поліпшення проти-возадирних і антифрикційних якостей тих деталей машин, що працюють у тяжких умовах тертя, коли мається небезпека заїдання.

При цементации, у результаті насичення поверхневого шару виробів вуглецем, виходить високовуглецевий поверхневий шар. Застосовують, як правило, низьковуглецеву сталь (до 0,3%С) і потім піддають загартуванню. У результаті утвориться твердий поверхневий шар (0,5 - 2,5 мм) і м'яка серцевина.

Розрізняють, у залежності від середовища, цементацию у твердому, газоподібному і рідкому карбюризаторах. Температура процесу 900 - 950 °С. Товщина зміцненого шару досягає 1 мм і більш у залежності від тривалості процесу.

Основний недолік цементации - це те, що в результаті процесу в поверхневому цементованому шарі виникають напруги стиску, а в серцевині - напруги розтягання. У результаті залишкові напруги приводять до значної деформації виробів.

Азотуванням називають дифузійне насичення азотом поверхонь сталевих і титанових деталей. Після азотування деталі незначно збільшуються в розмірах. Процес азотування ведуть при температурі 500 - 600 °С на готових деталях, що пройшли остаточну термообробку, і доводять до остаточного розміру поліруванням або шліфуванням. З легуючими елементами деталей (хромом, молібденом, ванадієм і алюмінієм) азот утворює тверді і стійкі нітриди. Найбі-

льшу твердість шару який азотували додає легуючий елемент деталей - алюміній.

Азотування проводять у шахтній електричній печі опору з герметичним муфелем з жаростійкої сталі, постаченим вентилятором і трубками для введення і висновку газів. Тривалість витримки в залежності від необхідної глибини шаруючи і температури процесу задають з розрахунку 15 ч на 0,1 мм шару який азотували.

У результаті наявності в шарі який азотували залишкових напруг стиску границя витривалості деталей значно підвищується, причому опір утоми тим вище, ніж товще азотований шар.

Азотуванню піддаються вироби, від яких потрібна висока зносостійкість і мікротвердість поверхневого шару, підвищена циклічна міцність, а також стійкість до корозії.

У порівнянні з цементацією і загартуванням процес азотування протікає при більш низькій температурі; поверхня яка азотувалась має більш високу твердість, зносо - і корозійну стійкість, кращу поліруємість; властивості поверхні яка азотувалась зберігаються практично незмінними при повторних нагрівах аж до 500 - 600 °С, у той час як при нагрівах цементованої і загартованої поверхні до 225 -275 °С твердість її знижується.

Останнім часом широке поширення одержав процес азотування іонізованим азотом у плазмі тліючого розряду - **іонне азотування (ІА)**. Спосіб ІА полягає в обробці деталі або інструмента потоком іонів азоту. У результаті останні проникають на контрольовану глибину до 1 мм.

Процес зміцнення проводиться на установках ІА з використанням реакційного газу - диссоційованого аміаку. Установа може бути укомплектована пристроєм для іА внутрішніх поверхонь втулок, гільз і т.п. з використанням додаткового анода. ІА проводять у розрідженій азотовмісній атмосфері з підключенням виробів які азотирують до негативного електрода (катодові). Анодом є контейнер установки (печі). Між катодом і анодом збуджується тліючий розряд. Іони газу, бомбардуючи поверхню виробу, нагрівають неї до температури насичення. Потім через камеру прокачують суміш азоту з воднем.

Дотримання технологічного процесу забезпечує мінімальних повідців, деформація незначна і складає ~ 10 мкм на сторону.

Переваги ІА в порівнянні зі звичайним рідинним і газовим азотуванням складаються в можливості цілеспрямованого контролю структури одержуваного поверхневого шару, застосуванні щодо низьких температур (до 500°C), відсутність повідців і короблення, нешкідливість і екологічна безпека процесу, скорочення тривалості обробки. Тривалість ІА коливається від 0,5 - 36 ч у залежності від необхідної глибини зміцненого шару.

Під **ціанірованні** розуміють процес одночасного насичення сталі вуглецем і азотом. Розрізняють тверде, рідке і газове ціаніровання.

На склад і властивості зміцненого шару великий вплив робить температура ціаніровання. При високій температурі процес більше нагадує цементацію, а при низкою - азотування. Ціаніровання розділяють на високотемпературне при $800 - 950^{\circ}\text{C}$ и низькотемпературне при $500 - 600^{\circ}\text{C}$.

У порівнянні з цементованим, ціанований шар має більш високий опір зносу, більшим твердістю й опором корозії.

Низькотемпературне рідинне ціаніровання одержало широке поширення для підвищення стійкості інструмента, що ріже, зі швидкорізальної сталі. У результаті на поверхні виникає тонкий (10-15 мкм) карбідонітрідний шар, що володіє гарним опором зносу і менш тендітний, чим чисті карбіди і нітриди.

Високотемпературному рідинному ціанірованні піддають: болти, гайки, ролики, зубчасті колеса і т.п. Глибина шаруючи складає 0,05-0,25 мм.

Газове ціаніровання або **нітроцементация**, виробляється в газовому середовищі, що складається з цементуючого і нітріруючого газів. Глибина ціанованого шару за час витримки до 8 ч складає до 2 мм.

Борірованіе - процес дифузійного насичення поверхні металу з'єднаннями бора у виді боридов заліза Fe_2B і FeB . Застосовують для підвищення зносостійкості і красностойкості виробів, у тому числі працюючих при підвищених або знижених температурах, знакозмінних і ударних навантаженнях або в агресивних і абразивних середовищах. Борірованню можуть піддаватися будь-які

марки сталей, його проводять у суміші порошоків, паст, газів або в розплаві солей.

Борірування переважно використовується для зміцнення металевих поверхонь, що працюють на стирання: металорізальних інструментів зі швидкорізальних сталей, штампового інструмента, прес-форм, деталей дробильних машин, жолобів грохотів, башмаків коксовиштовхувачів і деталей, що працюють при 500 - 850 °С. Борірування доцільно проводити у вакуумних печах або печах із захисною атмосферою. У результаті борірування можлива зміна розмірів деталі.

Процес **дифузійного хромування** може використовуватися для підвищення жаро -, зносо -, кавітаційної і корозійної стійкості деталей машин і інструмента в машинобудівній, хімічній, приладобудівній і іншій галузях промисловості. Хромовані вироби володіють підвищеною окислостійкістю до температури 800 °С. Процес хромування придатний для будь-яких марок сталей. Твердість хромованого шару підвищується зі збільшенням змісту вуглецю і може досягати HV 1300 при глибині шаруючи до 0,3 мм.

Термодифузійне хромування сталі, сполучене з її термообробкою, застосовують при виготовленні втулок, штоків, деталей клапанів і інших деталей, що працюють при температурі 580 °С и вище, для захисту від корозії, ерозії і задиров. Недоліком методу є: мала товщина шаруючи при великій тривалості і складності процесу, короблення деталей.

Процес насичення поверхневих шарів металу сіркою називають **сульфідіруванням**. Сульфідіруванню піддають технологічне оснащення, виготовлену зі швидкорізальної сталі, і сталей типу ХВГ, 9ХС. Найбільша товщина шаруючи - 0,04 мм.

Ефективність **сульфідірування** полягає в тім, що сульфідна плівка, що має меншу міцність, чим основний метал, легко руйнується при терті і відокремлюється від підстави, запобігаючи схоплювання поверхонь тертя. У процесі зношування сірка дифундує всередину металу і з тим більшою інтенсивністю, чим вище тиск у парі тертя. Таким чином, антифрикційні властивості, власти-

вому сульфідному шарові, зберігаються при величині зносу, значно переважаючи первісну товщину шаруючи.

Сульфідірованню піддають: поршні, втулки, поршневі кільця, сталеві підшипники ковзання, гайки ходових гвинтів, деталі рухливих частин, змазування яких утруднено.

Недоліками методу є значне збільшення шорсткості поверхні і збільшення розмірів деталі. Крім того, **сульфідіровання** не може служити засобом захисту від корозії.

Одним зі шляхів поліпшення якості поверхневого шару і зниження вартості ремонту машин є багаторазове відновлення форми деталей **металопокриттями**. Метод нанесення металопокриттів можна підрозділити на наплавлення, гальванопокриття і металізацію напилюванням.

Наплавлення відрізняється від інших способів відновлення тим, що їй можна в широких межах змінювати хімічний склад шару, а головне - необмежено нарощувати метал.

Недоліками методу є: утворення тріщин, короблення, висока пористість, наявність жувільних включень, зниження втомлюваної міцності і ряд інших.

Гальванопокриття (хромування, нікелювання, залізнення й ін.) застосовують для деталей зі зносом від декількох мкм до 1,5 мм.

Хромування, як процес відновлення і підвищення зносостійкості поверхонь тертя, займає одне з перших місць. Хромове покриття має високу твердість (HV 450 - 1000), гарну теплопровідність і зносостійкість. Недоліки методу: погана припрацьовуваність і змочування олією, зниження опору втоми.

7.2 Металізація напилюванням полягає в розпиленні розплавленого металу струменем стиснутого повітря й осадженні його на попередньо підготовлену поверхню деталі. У якості матеріалу який напилюють застосовують дрід зі сталі, бронзи, латуні, алюмінію й ін. Для кращого зчеплення часточок з підкладкою збільшують шорсткість відновлюваної поверхні.

Незважаючи на те, що процес металізації напилюванням відрізняється простотою і продуктивністю, метод має істотні недоліки. Це висока пористість (до 10%), зниження опору втоми, слабе зчеплення матеріалу який наносять з

підкладкою, незадовільна робота в умовах тертя без змащення й ін. Застосовується для відновлення шийок валів, колінвалів, вкладишів підшипників і т.п.

Для зміцнення і нанесення захисних покриттів досить перспективним є метод ЕЕЛ. Технологічна сутність ЕЕЛ складається в перенесенні матеріалу анода на поверхню яку легують при іскровому розряді в повітряному середовищі. Перенесений матеріал анода легує катод і, з'єднуючись хімічно з атомарним азотом повітря, вуглецем і матеріалом виробу який зміцнюють, утворює на поверхні останнього дифузійний зносостійкий шар. Завдяки значній гамі металів, які можна використовувати при ЕЕЛ, участі середовища в процесі формування поверхневих шарів, цим методом можна в широких межах змінювати механічні, термічні, електричні, термоемісійні й інші властивості робочих поверхонь деталей.

До основних особливостей ЕЕЛ варто віднести локальну обробку поверхні; високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою; відсутність нагрівання деталі в процесі обробки; можливість використання як обробні матеріали як чистих металів, так і їхніх сплавів, металокерамічних композицій, тугоплавких з'єднань і т.п.; дифузійне збагачення поверхні катода (деталі) складеними елементами анода (електрода) без зміни розмірів деталі; відсутність необхідності спеціальної підготовки поверхні. Необхідне устаткування надійно і транспортабельно.

Недоліками методу є: зниження шорсткості поверхні, виникнення в поверхневому шарі залишкових напруг, що розтягують, зниження втомлюваної міцності.

Спосіб **конденсованого іонного бомбардування** (КІБ) реалізується за допомогою плазмових прискорювачів і електродугових випарників, принцип дії яких заснований на єдиному методі генерації речовини. Електродугові випарники і плазмові прискорювачі найбільш ефективні при роботі на тугоплавких матеріалах. У цьому випадку ступінь іонізації плазмового потоку близька до 100%.

Деталь (анод) поміщають на шляху плазмових потоків. На неї подають негативний потенціал, що прискорює потік іонів. Вибиті з катода атоми розга-

няються до високих енергій. Вони з великою швидкістю бомбардують поверхню анода, очищають її, впроваджуються в кристалічні ґрати поверхневого шару і, накопичуючись, утворюють на поверхні мікроплівку речовини що осаджується.

Спосіб дозволяє створювати металеві зносостійкі покриття, що складаються з хімічних сполук - карбідів, нітридів, оксидів, карбонітридів тугоплавких металів Ti, Mo, Cr, W, V і ін., а також багатошарового і багатоскладні (композиційні) покриття. Товщина покриття 5 - 20 мкм.

Переваги способу в порівнянні з методами хіміко-термічної обробки: можливість одержання на робочих поверхнях зносостійкого покриття високої мікротвердості (HV 2600 - 3800); більш висока продуктивність процесу; можливість проведення процесу при температурах не перевищуючу температуру відпустки, раніше термооброблених виробів; значне підвищення зносо-, жаро- і корозійної стійкості покрить.

Недоліки методу: можливість зміцнення виробів обмежена розмірами камери, мала товщина шарів які наносять обмежує відновлення виробів.

Лазерне термозміцнення поверхні деталі є перспективним процесом підвищення експлуатаційних якостей деталей і інструмента. Метод заснований на використанні явища високошвидкісного розігріву металу під дією лазерного променя до температур, що перевищують температуру фазових перетворень AC_1 , але нижче температури плавлення і наступного високошвидкісного охолодження за рахунок відводу тепла з поверхні в основну масу металу.

При обробці променем лазера, як і при звичайному загартуванні, у поверхневому шарі утвориться мартенсит і залишковий аустеніт. Мікротвердість у зоні обробки підвищується за рахунок того, що в зоні швидкого нагрівання й охолодження утвориться більш дрібнозернистий мартенсит. Глибина зміцненого шару досягає 0,2 мм. Шорсткість після лазерної обробки не змінюється.

До переваг можна віднести:

- можливість високопродуктивного зміцнення локальних ділянок деталей у місцях їхнього інтенсивного зносу, при невеликій глибині впливу і зі збереженням вихідних властивостей матеріалу в основному обсязі;

- можливість одержувати високу твердість обробленої лазерним випромінюванням, поверхні деталі (приблизно на 20% вище твердості при термообробці за традиційною технологією);

- можливість зміцнення важкодоступних ділянок деталей шляхом уведення лучачи лазера через вікна й отвори;

- відсутність деформації деталі і можливість обробки без збільшення шорсткості, що створює можливість виключити фінішну обробку.

7.3 Поверхнєве пластичне деформування, засноване на механічному методі холодного зміцнення, виконується з метою підвищення опору утоми і твердості поверхневого шару металу і формування в ньому спрямованих внутрішніх напружень, переважно напруг стиску, а також регламентованого рельєфу мікронерівностей на поверхні.

Наклеп поверхневого шару металу сприяє підвищенню зносостійкості деталей, зменшує зминання і стирання поверхонь при наявності їхнього безпосереднього контакту, і взаємне впровадження поверхневих шарів, що виникає при їх механічній і молекулярній взаємодії.

Серед різних способів ППД розрізняють: дробеструйну обробку, карбування, поверхнєве обкатування роликком і кулькою, вигладжування та ін.

Способи механічного ППД деталей мають наступні переваги перед іншими: мала трудомісткість, простота технології (не потрібні значні витрати на устаткування й оснащення), можливість зміцнення деталей будь-якої форми і розмірів, можливість зміни глибини зміцнення, досить висока твердість зміцнених шарів. Крім того, ППД можна створювати на поверхнях які зміцнюють спеціальні мікрорельєфи.

Глибина зміцненого ППД шару може досягати декількох міліметрів.

У результаті наклепу підвищуються всі характеристики опору металу деформації, знижується його пластичність і збільшується твердість.

Зміцнення металу в незагартованій сталі відбувається за рахунок структурних змін і змін структурних недосконалостей (щільності, якості і взаємодії дислокацій, кількості вакансій і ін.), дробленням блоків і наведенням мікронапруг. При зміцненні загартованих сталей, крім цього, відбувається часткове пе-

ретворення залишкового аустеніту в мартенсит і виділення дисперсних карбідних часток.

Таким чином, слід зазначити, що в даний час існує велике количество різних методів підвищення якості поверхневих шарів виробів, кожний з них має свої достоїнства і недоліки.

Проведені дослідження дозволили, обґрунтовано, із усіх розглянутих методів підвищення якості поверхневих шарів виробів виділити, як найбільш перспективний, метод ЕЕЛ. ЕЕЛ має практично всі достоїнства перерахованих вище методів, а в багатьох випадках перевершує них.

ЛЕКЦІЯ № 8 КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ И РЕМОНТУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ВИРОБІВ

8.1 Багат шарові електроерозійні покриття.

8.2 ЕЕЛ з наступним ППД.

8.3 ЕЕЛ з наступним ІА.

8.4 ЕЕЛ з наступним епіламіруванням.

8.1 Багат шарові електроерозійні покриття.

Одним з найбільш ефективних методів нанесення захисних покриттів на металеві поверхні є ЕЕЛ.

Достоїнства методу:

- висока міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою;
- можливість проведення процесу в локальному місці;
- підвищення твердості, корозійної стійкості, зносу - і жаростійкості термових поверхонь;
- відсутність повідець і короблення.

Недоліки:

- збільшення шорсткості поверхні;
- виникнення в поверхневому шарі напруг, що розтягують;
- зниження втомлюваної міцності виробів.

Недоліки істотно знижують застосування методу для більш широкого кола деталей.

Недоліки ЕЕЛ можна усунути, удосконалюючи її технологію: застосуванням комбінованих електроерозійних покриттів (КЕП), створенням нових електродних матеріалів, оптимізацією режимів ЕЕЛ і ін. або сполученням ЕЕЛ з

іншими методами зміцнення, наприклад, поверхневою пластичною деформацією (ППД), іонним азотуванням (ІА), конденсованою іонним бомбардуванням (КІБ), епіламуванням (ЕП) і т.п.

На рис. 8.1. представлений далеко не повний перелік різних методів зміцнення виробів, у сполученні з якими ЕЕЛ може утворювати комбіновані технології. Сюди ж можна віднести багат шарові (комбіновані) електроерозійні покриття (КЕП), за допомогою яких можливо формувати поверхневий шар деталі з необхідними властивостями.

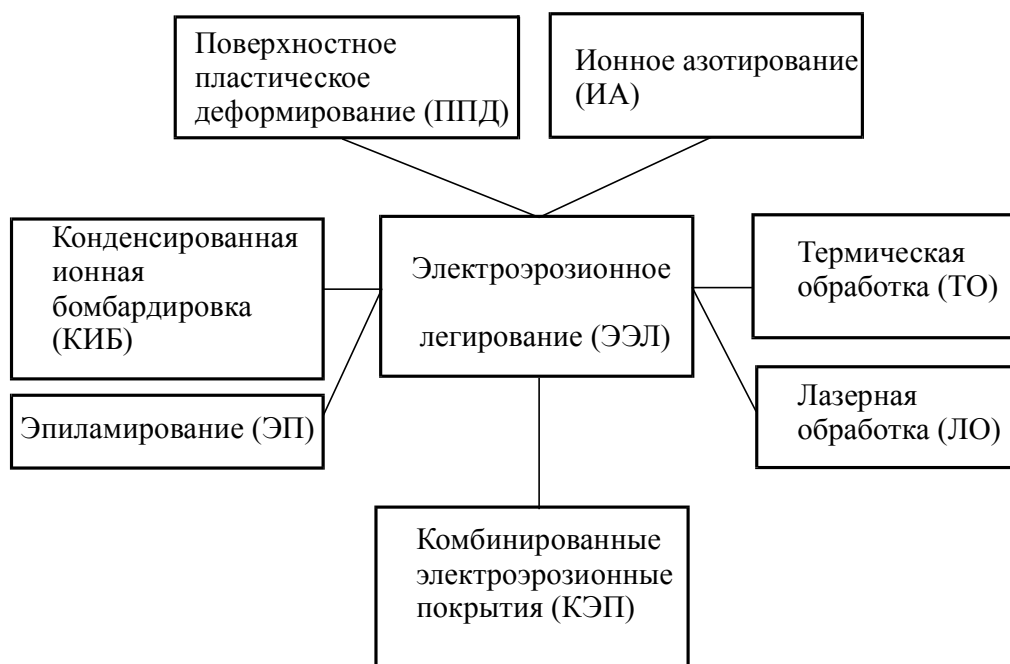


Рис. 8.1. Комбіновані технології ЕЕЛ.

Комбіновані електроерозійні покриття

З метою розробки технології нанесення КЕП пошарово наносилися покриття електродами з твердих зносостійких і м'яких антифрикційних матеріалів.

Установлено, що при нанесенні спочатку як технологічне покриття одного з легкоплавких металів (In, Sn, Cd, Pb) с наступним нанесенням основного покриття з тугоплавкого зносостійкого металу спостерігається різке зниження шорсткості поверхні з $Ra = 2,86...3,26$ до $Ra = 0,54...0,91$ мкм. Одночасно підвищується зносостійкість покриттів.

Однак досвід показує, що мікротвердість таких покриттів невелика. Так, при ЕЕЛ карбідом вольфраму стали 45 мікротвердість у міру поглиблення з поверхні зразка при «кроці» виміру 10 мкм розташовується в ряд 12500, 11000,

4700, 3300, 2800 МПа, а при первісному ЕЕЛ індієм, а потім карбідом вольфраму - 1970, 2500, 3860, 3570, 2800 МПа.

КЕП з підшаром з міді

Установлено, що мікротвердість КЕП значною мірою залежить від кількості м'якого матеріалу в технологічному підшарі. Металографічні дослідження з визначення впливу кількості м'якої складової в КЕП на мікротвердість поверхневого шару проводилися з використанням як технологічний підшар міді, зважаючи на те, що мідь забезпечує найбільш стабільні результати по масопереносу на всіх режимах легування.

Оптимізація режимів легування дозволила одержувати КЕП з підшаром з міді із шорсткістю $R_a = 0,48 \dots 0,90$ мкм і мікротвердістю 8400...12300 МПа. При цьому найменша шорсткість ($R_a = 0,48$ мкм) і найбільша мікротвердість (12300 МПа) отримані при використанні як основне покриття - твердого сплаву ВК8.

Наявність міді, як на поверхні, так і по глибині шаруючи, підтверджується дослідженнями на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі "РЭММА-200".

При нанесенні спочатку тугоплавкого покриття, потім міді мікротвердість поверхневого шару 2300... 2500 МПа. Глибина поширення шаруючи з такою мікротвердістю - до 30 мкм. Потім, у міру поглиблення, знаходиться шар товщиною 5 - 10 мкм із мікротвердістю 8000...12300 МПа і далі перехідна зона з мікротвердістю 3300...4300 МПа.

Квазібагатошарові КЕП

З метою розширення області застосування, а також збільшення товщини формованих поверхневих шарів, досліджувалися квазібагатошарові КЕП, сформовані за схемою ВК8 + C_u + ВК8. Мікротвердість таких покриттів знаходиться на рівні 6420...8740 МПа, шорсткість низька ($R_a = 0,5$ мкм), різкі перепади мікротвердості в перехідній зоні відсутні. Мікротвердість від максимальної на поверхні плавно знижується в міру поглиблення до твердості основного металу. Позитивні результати при зміцненні нікелевого сплаву ХН58МБЮД забезпечують КЕП, створені за схемою ВК8 → ВК8 → C_u і ВК8 → ВК8 → Ni.

Композиційні електроерозійні покриття

Відомо зносостійке спечене покриття, у якому наповнювачем служить тврдосплавна суміш ВК6, а легкоплавким зв'язком - твердий розчин системи Ni - Cr - Si - В. Покриття наносять на робочі поверхні деталей шлікерним методом з наступним відпалом у вакуумі.

Нами досліджувалася можливість застосування вищевказаного матеріалу як електроди для ЕЕЛ. Виготовленими електродами проводилося ЕЕЛ зразків зі сталі 45 і Р6М5 на установці « УІЛВ-8». Найбільш кращим є застосування електродів з матеріалу складу 90%ВК6 + 10%1М (де 1М - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В (вага. %)), що дозволяють формувати поверхневий шар з мікротвердістю до 14000 МПа.

8.2 Підвищення якості електроерозійних покрить ППД

Обробка поверхні після ЕЕЛ має визначені особливості. У зв'язку з відносно невеликою товщиною шарів (десятки мікрометрів), формованих при ЕЕЛ, наступне шліфування їх з метою зниження шорсткості поверхні в ряді випадків утруднені або взагалі неприйнятна.

Для усунення факторів, що погіршують експлуатаційні властивості зміцнених ЕЕЛ шарів, часто використовують поверхневу пластичну деформацію, за допомогою якої можна не тільки підвищити несучу здатність деталей машин і знизити їхню матеріалоємність, але і широко регулювати властивості поверхневого шару.

Установлено, що ефективність ППД залежить від питомого зусилля обкатування і способу ЕЕЛ; знайдені залежності твердості поверхневих шарів від питомого зусилля деформації; отримано, що найбільш раціональними режимами питомих зусиль ППД для покрить із твердих зносостійких матеріалів є 1000 МПа для АВ і 1500 МПа для ОК.

Аналіз деформованого стану ЕЕЛ шарів, підданих поверхневому пластичному деформуванню проводився з метою визначення геометричних і силових параметрів вогнища деформації.

Розглядалося два види покрить - тверде і м'яке. Коректування геометричних параметрів контактуючих тіл (вала і сферичного індентора) вироблялися з урахуванням параметрів структури ЕЕЛ шару.

При ППД твердих покриттів сферичний індентор уминає твердий «білий» шар у більш м'який перехідний підшар, зміцнюючи останній. «Білий» шар служить передатною ланкою, збільшуючи радіус впливу індентора на величину, рівну товщині «білого» шару ($2/3$ прирощеного шару Δh_c). Радіус вала збільшується при цьому на $1/3 \Delta h_c$.

При ППД м'яких покриттів величина радіуса сферичного індентора залишається без змін, а радіус вала збільшується на Δh_c . Деформуванню в цьому випадку піддаються як м'який поверхневий так і перехідний шар.

З обліком приведених вище коректувань, за відомою методикою, визначаються геометричні і деформаційні параметри вогнища деформації.

Зі збільшенням питомого зусилля обкатування шорсткість м'яких і КЕП знижується, мікротвердість м'якого поверхневого шару і підшару зростає, а твердого поверхневого шару залишається без зміни.

Для узагальнення і спрощення вибору найбільш раціонального зусилля деформації пропонуються всі електроерозійні покриття, у залежності від мікротвердості ділянки покриття яку зіцнюють, розбити на три групи: м'які (< 2000 МПа), середні ($2000 - 3000$ МПа) і тверді (> 3000 МПа).

Для м'яких покриттів рекомендуються питомі зусилля деформації $P_{cp} = 750 - 1250$ МПа, середніх - $1300 - 1500$ МПа і твердих - $2500 - 3000$ МПа.

М'які покриття рекомендується зміцнювати ОК. Покриття середньої твердості і тверді можна зміцнювати як ОК, так і АВ, зважаючи на те, що шорсткість (R_a) вихідної поверхні не повинна перевищувати 12 мкм для ОК і 5 мкм для АВ.

ЕЕЛ стали 45 міддю, приводить до формування в її поверхневому шарі напруг, що розтягують, із глибиною залягання до $0,1$ мм і максимальною величиною на поверхні до 170 МПа. Нанесення на сталь 45 КЕП мідь + хром приводить до зростання, як величини напруги, так і глибини залягання, відповідно до 210 МПа і $0,15$ мм. Застосування як попереднє покриття міді знижує величину напруг, що розтягують, при ЕЕЛ хромом з 250 МПа до 210 МПа.

Наступне ППД як м'яких антифрикційних, так і КЕП, формує в поверхневому шарі сприятливі стискаючі напруги, що цілком нейтралізують що розтягують, утворені ЕЕЛ.

При іспиті натурних валів з КЕП Cu + Cr встановлено, що в результаті ЕЕЛ втомлювана міцність знизилася в порівнянні зі зразками без покриття в 1,5 рази (з 395 до 255 МПа). Однак, вона в 1,5 рази вище, ніж у зразків, легованих тільки хромом. Обкатування кулькою КЕП Cu + Cr підвищують їхню втомлювану міцність на 16-20 % у порівнянні зі зразками без покриття.

8.3 Підвищення якості електроерозійних покриттів ІА

Застосування ЕЕЛ для зміцнення термооброблених деталей, у сукупності з додатковою обробкою (для створення наклепу), дозволяє усунути різке зменшення «провал» твердості в зоні термічного впливу, але загального підвищення твердості в перехідній зоні не спостерігається

Нами встановлено, що для поліпшення службових характеристик зміцненого шару за рахунок усунення "провалу" твердості і підвищення твердості в перехідній зоні термічно оброблені деталі піддають ЕЕЛ з попереднім або наступним ІА. Тривалість ІА повинна бути достатньою для насичення азотом на глибину зони термічного впливу. Дослідження проводилися на зразках сталі 40Х після термообробки її до твердості HRC 45...50. Як матеріали легуючих електродів використовувалися тверді зносостійкі матеріали: хром, вольфрам і твердий сплав Т15ДОб.

З метою збільшення суцільності і товщини КЕП, проводилися роботи з їх ІА. Досліджувані зразки сталі 40Х, термооброблені до твердості HRC 30-32, піддавалися ІА і ЕЕЛ у різній послідовності.

Застосування комбінованої технології ЕЕЛ з попереднім або наступним ІА істотно (з 10 - 25 мкм до 70 - 120 мкм) збільшують зону підвищеної твердості і суцільність до 100%.

До практичного застосування можуть бути рекомендовані квазібагатошарові КЕП П складу ВК8 + Cu + ВК8 з наступним ІА, що мають низьку шорсткість ($R_a = 0,6$ мкм), суцільність - 100%, значну глибину сформованого шару

(до 120 мкм) і мікротвердість, що плавно знижується в міру поглиблення і сягаючи на поверхні 9500 МПа.

8.4 ЕЕЛ з наступним епіларуванням

Сутність процесу епіламірування (ЕП) полягає в обробці поверхонь виробів, що зношуються, епіламом. Епілам - це композиція, що складається з розчинників: хладон 113, суміш хладонів 112 і 113, хладонів 114В2 і ним подібних із введенням у них поверхнево-активних речовин.

ЕП рекомендується застосовувати в інструментальному господарстві. У результаті ЕП на поверхні виробу утвориться мономолекулярний шар УПАВ-ШИ, що різко знижує тертя між інструментом і оброблюваним матеріалом, що, у свою чергу, сприяє значному зниженню зносу і збільшенню його терміну служби.

Наявність плівки ЕП визначається за допомогою краплі олії, нанесеної на поверхню інструмента. Крапля невеликого розміру повинна утримуватися на похилій поверхні і зберігати форму, близьку до сферичного (не повинна розтікатися).

Нами проводилися експериментальні роботи з вивчення впливу ЕП на зносостійкість мітчиків (М 22 x 1,5), легованих на установці «Елфа-541». Мітчики піддавалися ЕЕЛ пучком електродів із твердого сплаву ВК6М, молібдену і графіту, марки ЕГ - 4 і наступному ЕП. Потім мітчики з ЕП і ЕЕЛ + ЕП випробувалися у виробничих умовах при нарізуванні різьблення в деталях з латуні. Зносостійкість мітчиків підвищилася в 2 рази.

Таким чином, слід зазначити, що комбіновані технології ЕЕЛ є резервом підвищення якості поверхневих шарів виробів, тому що вони доповнюють один одного. Наприклад, комбінована технологія ЕЕЛ + ППД - дозволяє сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю і підвищеною втомлюваною міцністю; ЕЕЛ + ЛО - знижує шорсткість електроерозійних покриттів і збільшує глибину проникнення легуючих елементів в основу; ЕЕЛ з накладенням ультразвуку - до чотирьох разів збільшує масоперенос; ЕЕЛ + ІА - усуває «провал» твердості в перехідній зоні і збільшує глибину ша-

ру підвищеної твердості; накладення магнітного поля на зону ЕЕЛ збільшує інтенсифікацію масопереносу з анода на катод і т.п.

ЛЕКЦІЯ № 9.ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

9.1 Зміна властивостей мастильного матеріалу.

9.2 Обкатування машин.

9.3 Іспити машин.

9.1 Зміна властивостей мастильного матеріалу.

Фізико-хімічні зміни мастильного матеріалу.

Мастильний матеріал у роботі старіє, тобто його первісні властивості змінюються в результаті фізичних і хімічних процесів, яким він піддається. При експлуатації відбувається випар переважно легких фракцій олії. Воно засмічується продуктами окислювання, полімеризації, конденсації і розпаду самої олії, забруднюється продуктами зношування поверхонь, що змазуються, і пилом. У двигунах внутрішнього згоряння олія, крім того, забруднюється продуктами неповного згоряння палива і рідким паливом. У насосах і інших машинах не виключається забруднення олії іншими рідинами.

Фізико-хімічні зміни олій зв'язані, насамперед, з їхнім окислюванням, під яким розуміють сукупність хімічних перетворень в олії в присутності кисню. Окислювання олії відбувається в товстому шарі (у масляних цистернах, баках, мастилопроводах, картерах), у тонкому шарі (на поверхнях, що змазуються,) і в туманоподобному виді.

При нормальній температурі й атмосферному тиску мінеральні олії в обсязі (у товстому шарі) майже не окисляються, при підвищенні температури окислювання прискорюється: зміну фізико-хімічних властивостей олій при температурі 100⁰С обчислюється цілодобово, а при 250⁰С – хвилинами. Швидкість окислювання значно змінюється в присутності металів, особливо їхніх окислів і металевих мил. Свинець є найбільш сильним каталізатором окислю-

вання; за ним впливає мідь і залізо. Алюміній майже не впливає на процес окислювання. Наявність води в олії робить окислювання більш інтенсивним.

Основне окислювання олії відбувається в тонкому мастильному шарі, де олія піддається високому тискові і найбільшому нагріванню і де сильніше позначається каталітична дія металів, а також у контакті зі стінками мастилопроводів.

Наявність води в олії погіршує його мастильні властивості, сприяє в присутності металів каталізаторів більш швидкому окислюванню олії і створює небезпека кородування поверхонь деталей. Робочі поверхні деяких деталей (наприклад, шийок валів) при наявності в олії прісної води сутеніють, при наявності солоної води помітно кородують.

Вода в олії або паливі – одна з основних причин водневого зношування деталей. Вода в олії циркуляційної системи транспортних двигунів може стати причиною серйозних несправностей у зимовий час. Масляні фільтри можуть виявитися закупореними льодом, а масляний насос може припинити подачу олії внаслідок обмерзання сітчастих фільтрів. Це відноситься в першу чергу до автомобільних двигунів, що де знаходиться в нижньому картері олія піддається інтенсивному охолодженню при русі автомобіля. Цим порозуміваються випадки виплавлення в холодну погоду підшипників колінчатих валів цих двигунів.

Відкладення на деталях у мастильній системі.

Відкладення утворюються в результаті старіння олії, а в двигунах внутрішнього згорання, крім того, із продуктів розкладання і неповного окислювання палива. Ці відкладення не є цілком вуглецевими, хоча й одержали таку назву. Вуглецеві відкладення в двигунах розділяються на три види: нагар, лак і опади (шлам).

Для **нагару** характерний чорний колір, але він може бути білого, жовто-гарячого, коричневого й іншого кольорів, маючи різну структуру – щільну, пухк або пластинчасту. Нагарообформування, крім двигунів, можливо й в інших машинах.

Лак являє собою тонкий шар твердої або клейкої вуглицевої речовини від коричневого до чорного кольору. Лакові відкладення в двигунах на бічній і

внутрішній поверхнях поршня, на шатуні і поршневих пальцях порозуміваються тим, що олія в найтоншому шарі при підвищеній температурі на металевій поверхні в присутності кисню піддається полімеризації й ущільненню.

Шлам – це тістоподібна або напівтверда речовина від ясно-коричневого до чорного кольору, що складає з рідини і нерозчинних у ній речовин, загущаючих її в емульсію або суспензію. У мастильній системі шлам складається з олії, нерозчинних у ньому смолистих речовин і інших продуктів окислювання, води і твердих часток в олії. Шлам може зустрічатися у виді окремих згустків, що плавають в олії, або, у виняткових випадках у виді великих грудок. Шлам, що нагромадився, забиває фільтри, маслоохолоджувачі і порожнини центрифуг, зменшує пропускну здатність масляних каналів.

Змазування вузлів при експлуатації.

При роботі машин кількість олії зменшується; воно убуває унаслідок витоків через нещільності, деяка його частка переходить у шлам, частину губиться разом з водою, що видаляється, випаровується, а в двигунах внутрішнього згоряння губиться в результаті чаду. Втрати олії в системі періодично заповнюють доливом.

Олія в системі внаслідок старіння втрачає мастильні властивості і потрібно, незважаючи на дію очисних пристроїв, періодична заміна його свіжим. Незалежно від регламентованих термінів олію змінюють у випадках випадання шламу більш звичайного і виходу значень кислотного числа, в'язкості й інших показників за межі встановлених норм. У системах великої місткості рекомендується періодично робити аналіз працюючої олії.

Чистота мастильних матеріалів є однією з найважливіших умов довговічності машин, тому при їхньому транспортуванні, збереженні, видачі й у процесі заправлення повинні бути прийняті міри проти забруднення.

Змазування машин повинне вироблятися відповідно до заводських інструкцій. Терміни зміни олії залежать від умов роботи машини і можуть бути різними для однієї і тієї ж машини.

Крім загальної інструкції зі змазування машини складають для наочності і щоб уникнути пропусків мастильних крапок карту змазування. Усі крапки, що

змазуються, повинні бути зазначені; при необхідності приводять схеми вузлів. На кресленні особливо чітко повинні бути нанесені місця затоки і зливу олії, насоси, фільтри, маслоуказателі і масельнички. При централізованому змазуванні обов'язково вказують розведення мастилопроводів.

9.2 Обкатування машин.

Як нова, так і відремонтована машина або механізм перед введенням в експлуатацію відповідно до паспортних даних повинні пройти обкатування. Призначення обкатування – приробітку в єдиному комплексі всіх пар тертя, що входять до складу машини.

Погрішності поверхонь деталей, що сполучаються, і неточності у взаємному розташуванні робочих поверхонь у сполученнях обумовлюють малу фактичну площу взаємного контакту деталей. Додаток експлуатаційних навантажень до деталей при такому контактуванні їхніх поверхонь привело б при роботі машини до швидкого перегріву в багатьох парах і їхньому заїданні. Обкатування машини або механізму готує деталі до сприйняття експлуатаційних навантажень при відповідних швидкісних режимах.

Під час обкатування повинні бути реалізовані два процеси.

Перший процес можна назвати макрогеометричним прироблянням, другий мікрогеометричним. Мікрогеометричне приробляння проходить порівняно швидко. В автомобільних двигунів на це потрібно 2 – 2 ч, тим часом як повне приробляння двигуна триває 35 – 40 ч, а повне обкатування тракторних двигунів 50 – 60 ч. Значні технологічні дефекти виготовлення деталей і зборки машини і конструктивні недоліки в забезпеченні гарного взаємного прилягання поверхонь не можуть бути усунуті при обкатуванні і навіть при роботі машини протягом міжремонтного періоду.

Приробляння протікає на окремих ділянках у режимах тертя при граничному і напіврідинному змащенні. При цьому відбувається підвищене нагромадження продуктів зношування. Можливе відділення великих часток при викрашуванні і спрацьовуванні найбільш виступаючих нерівностей поверхні. Тому бажано при стендовому обкатуванні машин у залежності від їхнього типу і масштабу виробництва мати спеціальну циркуляційну мастильну систему з поси-

леною фільтрацією для запобігання поверхонь тертя від ушкоджень продуктами зношування. Це викликає необхідність збільшити час приробляння. Після приробляння олія в картерах і інших елементах системи забруднюється і його варто вважати відпрацьованим. Злив олії для кращого видалення відстою і забруднень роблять, коли олія достатня прогріто. Картер промивають малов'язкою олією або сумішшю олії і гасу. Масляні фільтри і відстійники промивають гасом або іншою промивною рідиною. Промивання тертьових поверхонь гасом після обкатування не припустимі. Гас змиває масляну плівку і після пуску машини поверхні короткочасно будуть працювати без СМ. Розбирання вузлів тертя по закінченні стендового обкатування для контролю деталей приводить надалі до необхідності додаткового обкатування.

Критерії оцінки закінчення приробітки:

- перехід на прямолінійну ділянку кривої зношування (можна установити по наявності заліза в олії);
- мінімум потужності при неодруженому ході машини;
- стабілізація моменту тертя і температури;
- найбільша ефективна потужність двигуна при заданій швидкості;
- досягнення заданого ступеня прилегання контактуючих поверхонь.

Тривалість обкатування визначається початковою шорсткістю поверхонь тертя, точністю обробки деталей і їхньої зборки, матеріалом деталей найбільш напружених пар тертя і залежить від експлуатаційних режимів роботи машини, від режиму обкатування і від властивостей мастильного матеріалу.

Обкатування машини починають з неодруженого ходу на малих швидкостях. Неодружений хід використовують також для перевірки справності всіх пристроїв і систем. Якщо при експлуатації машини деякі вузли тертя працюють при підвищених температурах, то при обкатуванні повинний бути етап, що відповідає такому тепловому режимові машини.

Оптимальний варіант режиму обкатування машини повинний задовольняти вимогам найменшого первинного зносу тертьових частин, мінімальних витрат часу і засобів.

Режим обкатування не можна розглядати ізольоване від застосовуваних олій і палив. Властивості мастильного матеріалу при обкатуванні, як і при будь-якому режимі тертя змазаних поверхонь, має велике значення. Малов'язкі олії, проникаючи через вузькі щілини, краще, ніж пластичні СМ, відводять теплоту від поверхонь тертя, краще змивають з робочих поверхонь продукти зношування, що утворилися; фільтрація таких олій і виділення з них забруднень полегшені. Поширено рекомендації про застосування під час обкатування мастил у 2 – 3 рази меншої в'язкості, чим олії, застосовуваного в експлуатації для даної машини. При обкатуванні автотракторних двигунів застосовують веретенні олії, дизельне паливо в чистому виді або в суміші з олією, на якому працює двигун.

Процес приробляння можна полегшити нанесенням прироблюваних покриттів. Заслужують на увагу спроби нанесення для цих цілей найтонших плівок з високополімерних матеріалів. Іноді практикують травлення шийок колінчатих валів на глибину 1 – 3 мкм. На деяких заводах робили травлення робочих поверхонь циліндрів великих двигунів.

9.3 Испити машин.

Стендові іспити машин серійного виготовлення служать для контролю їхньої якості; іспиту використовують також для необхідних регулювань. Унікальні машини або машини високої потужності не можуть бути випробувані на заводах виготовлювачах в умовах, що відповідають експлуатаційним (великі гідравлічні, парові і газові турбіни, могутні суднові двигуни й ін.). У таких випадках обмежуються іспитом агрегатів, вузлів або всієї машини на неодруженому ході на заводському іспитовому стенді. При цьому виявляються неточності зборки, що намічається підвищене зношування деталей і т.д. Ці іспити дозволяють завчасно усунути виявлені несправності, що скорочує період монтажу і налагодження на місці установки машини.

Стендові іспити містять у собі два види іспитів, неоднакових по своєму цільовому призначенню, організації і методиці проведення. Перший вид іспитів машини або агрегату є одним з етапів технологічного процесу, що впливає за закінченням складальних робіт. Завдання його полягає в перевірці правильності

зборки і роботи машини або агрегату. Зібрана машина повинна бути перевірена на робочій частоті обертання.

Другий вид стендових іспитів носить дослідницький характер і проводиться в лабораторних або близьких до них умовах. Ці іспити дозволяють вивчити технічні характеристики машини, перевірити правильність вибору розрахункових схем, установити гарантійний термін служби, виявити найбільш неблагополучні з погляду міцності, зносостійкості й інших ознак вузли і деталі для розробки конструктивних і технологічних заходів.

Іспити на довговічність включають у стендові іспити і виявляють час роботи деталей до граничного зносу або руйнування під дією статичного, перемінного або динамічного навантажень.

Стендові іспити не можуть замінити експлуатаційні іспити. Останні дозволяють одержати найбільше коштовні зведення про роботу машини, є основою для удосконалювання конструкції машини, установлення граничних експлуатаційних зазорів рухливих посадок, уточнення характеру профілактичних заходів технічного обслуговування машини і встановлення потреби в запасних частинах.

Часто стендові й експлуатаційні іспити є прискореними. Однак прискорені іспити нерідко можуть привести до невірних результатів. Прискорення іспитів вимагає підвищення швидкостей, додатка великих навантажень, при цьому теплові режими роботи деталей і режими змазування можуть перевантажити окремі вузли тертя, мало впливаючи на інші.

При іспитах необхідно виявити знос деталей. Методи визначення зносу: зважування і вимір розмірів деталі до і після роботи; профілографіювання поверхонь; нанесення на деталі поглиблень (лунок), відбитків алмазних пірамід і замір їх або їхніх зліпків до і після роботи; визначення кількості продуктів зносу в олії спектральним методом або методом мічених атомів.

Непрямий метод визначення зносу заснований на вимірі тих або інших параметрів, що дозволяють без розбирання механізму оцінити зміну його технічного стану в результаті зношування. Так, сумарний знос цапфи і робочої поверхні підшипника можна визначити по зсуві вала. Відомий ряд пристосувань для

виміру зазорів у сполученнях автомобільних двигунів без розбирання вузлів. Зміна рівня шуму в деяких випадках може служити критерієм оцінки зносу.

Ознаки які характеризують стан поверхні тертя, що впливають:

- вириви металу і великі подряпини (задири), характерні для твердих матеріалів;
- налипання на поверхню однієї деталі матеріалу іншої деталі (наприклад, бронзи на сталь);
- подряпини на поверхні тертя, розташовані по напрямку руху деталей (при цьому в мастильному матеріалі можуть бути виявлені абразивні частки);
- придбання поверхнею сталеві деталі суцільно або місцями кольору міді з дзеркальним блиском (спостерігається при терті стали по бронзі або латуні в умовах змазування спиртом, гліцерином, або іншими рідинами);
- наявність на поверхні тертя блискучих ділянок з малою шорсткістю;
- різні дефекти на поверхнях – тріщини, спрямовані поперек руху; відшарування гальванічних покриттів, вогнища корозії, наявність квітів мінливості й ін.

Після з'ясування причин підвищених або неприпустимого по інтенсивності зношування деталей можна рекомендувати:

- поліпшити припрацьовуваність деталей застосуванням противозадирних засобів;
- підвищити твердість матеріалу поверхневих шарів або нанесенням спеціальних покриттів;
- змінити умови роботи деталі (зменшити вібрацію або температуру);
- зробити заміну матеріалу деталей зчленування;
- поліпшити умови змазування;
- розробити заходу для захисту третього зчленування від улучення пилю.

Рекомендована література

Основні джерела

1. Тарельник В.Б. Триботехнологія деталей машин : навчальний посібник / [Тарельник В.Б., Коноплянченко Є.В., Марцинковський В.С., Антошевський Богдан]; за ред. проф. В.Б. Тарельника.- Суми: Видавництво «МакДен», 2010.- 264с.
2. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А. та ін. / За ред. Війтова В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008.- 342 с.
3. Кіндрачук М.В. Трибологія [Текст] : підручник / М.В.Кіндрачук, В.Ф.Лабунець, М.І.Пашечко, Є.В.Корбут. – Київ: НАУ, 2009. – 391с.
4. Тарельник В.Б. Триботехнічне матеріалознавство та триботехнологія в задачах / В.Б. Тарельник .- Суми : Університетська книга, 2014.- 192 с.
5. Тарельник В.Б. Сучасні методи формоутворення поверхонь тертя деталей машин: Монографія /Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Анташевський Б.- Суми: Видавництво «МакДен», 2012.-280 с.
6. Selected problems of surface engineering and tribology: Monografie, Studia, Rozprawy, M 85/ V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, B. Antoszewski, Ie. Konoplianchenko, and etc.; edited by B. Antoszewski, V.Tarelnyk - Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2016. – 111p.
7. Bhushan B. Introduction to Tribology, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, NY, 2013, 744p.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118403259>

Додаткові джерела

1. Дмитриченко М.Ф. Триботехніка та основи надійності машин / М.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик // Київ: Інформавтодор, 2006 – 216с.
2. Підвищення стійкості різального інструменту технологічними методами : навчальний посібник / [Тарельник В.Б., Коноплянченко Є.В., Марцинковський В.С. та ін.] ; за ред. проф. В.Б. Тарельника.- Суми : Університетська книга, 2011.- 189 с.
3. В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковський. Модернізація и ремонт роторних машин: Монографія.- Суми: Видавництво “Козацький вал” 2005.- 364 с.
4. В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковський, Б. Антошевський. Повышение качества подшипников скольжения: Монографія.- Суми: Издательство «МакДен», 2006.-160 с.
5. The tribology handbook [electronic resource] / edited by M.J. Neale. - 2nd ed. Butterworth-Heinemann, (1995), 640p.

Тарельник В'ячеслав Борисович

ТРИБОТЕХНОЛОГІЯ

Конспект лекцій

для студентів 4 та 3 с.т. курсу спеціальності 208 «Агроінженерія»
ОС «Бакалавр»

Суми, РВІВ, Сумський НАУ, вул. Герасима Кондраєва, 160

Підписано до друку 05.05.2023 р. Формат А5. Тираж 50 примірників
Гарнітура Peterburg Умовних друкованих аркушів Замовлення №