

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерського проекту: 68 с., 17 рис., 3 табл., 13 джерел.

МАСЛЯНЕ ГОЛОДУВАННЯ, ТРИБОСПРЯЖЕННЯ, МОМЕНТ ТЕРТЯ, СИЛА ТЕРТЯ РУХУ, ЗМАЩУВАЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ, НАВАНТАЖЕННЯ, ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ, НАПРЯМНІ КОВЗАННЯ ТА КОЧЕННЯ, ЗНОШЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процеси зношування трибоспряжень верстатів.

Мета роботи – дослідження умов масляного голодування в трибо сполученнях верстатного обладнання.

В роботі розглянуті основні фактори, що призводять до масляного голодування у кожному конкретному випадку, визначено системи змащування та мастила, які можна використати для кожного трибо вузла. Розглянуті методи визначення зношення та методи уникнення масляного та плівкового голодування. Визначені основні закономірності зміни сил тертя від швидкості на навантажені фактори від часу руху спряжених верстатів з достатнім змащенням та без нього.

ABSTRACT

Explanatory noteto the master's project: 68 p., 17 pic., 3 tab., 13 sources.

OIL FASTING, TRIBO-COUPLING, FRICTION MOMENT, MOTION FRICTION FORCE, LUBRICANT, LOAD, SURFACE ROUGHNESS, DIRECT SLIDING AND ROLLING, WEAR.

The object of the study is wear processes of tribocouplers of machine tools.

The purpose of the work is to study the conditions of oil starvation in tribo connections of machine tools.

The work considers the main factors that lead to oil starvation in each specific case, defines lubrication systems and lubricants that can be used for each tribo unit. Methods of determining wear and methods of avoiding oil and film starvation are considered. The main regularities of changes in friction forces from speed on loaded factors from the time of movement of coupled machines with and without sufficient lubrication are determined.

ЗМІСТ

	С.
Реферат	4
Вступ.....	8
1 Трибоспряження у верстатному обладнанні, які потребують ефективного змащування	9
1.1 Гідродинамічні підшипники ковзання.....	9
1.2 Підшипники кочення.....	10
1.3 Передача ходовий гвинт-гайка ковзання	11
1.4 Кулькові гвинтові пари	12
1.5 Напрямні ковзання головного руху	13
1.6 Напрямні ковзання руху подачі та встановлюючи переміщення.....	14
1.7 Напрямні ковзання кругового руху	15
1.8 Клин-напрямна	16
2 Види зношення трибоспряжень	17
2.1 Види випробувань на зношення	18
2.2 Класифікація видів зношення деталей машин	18
3 Існуючі системи змащування та мастильні матеріали.....	21
3.1 Основні властивості масел	21
3.2 Основні властивості пластичних мастил	23
3.3 Основні характеристики мастил	23
3.4 Класифікація систем мащення	24
4 Методи визначення величини зношення у трибоспряженнях.....	29
4.1 Визначення величини зношення шляхом мікрометричних вимірювань	29
4.2 Визначення величини зношення за втратою ваги	30
4.3 Визначення величини зношення методом штучних баз	31
4.4 Визначення величини зношення за допомогою профілографування....	32
5 Методи забезпечення уникнення масляного та плівкового голодування.....	34
6 Вибір оптимального складу мастила	44
6.1 Мащення підшипників кочення шпindelьних вузлів	44
6.2 Мащення напрямних ковзання	46
6.3 Мащення напрямних кочення	47
6.4 Мащення кулькових гвинтових передач	49
7 Методи розрахунку зношення для обраного типу масла у заданому	

	7
трибо вузлі	51
Висновок	66
Список літератури	67

ВСТУП

Зазвичай наслідки тертя негативні. З ним пов'язані надійність та довговічність деталей машин і механізмів. Зношення, яке завжди має місце при терті, призводить до порушення геометричних розмірів вузлів, втрачається точність взаємного розташування деталей і переміщень. Виникають заклинювання, удари, вібрації, що призводять до несправності. Тертя призводить до втрати енергії, перегріву механізмів, зниженню передавальних навантажень, підвищенням втратам горючого та інших матеріалів.

У той же час тертя має і позитивний вплив. Без тертя неможлива праця багатьох механічних передач, а праця фрикційних механізмів, ланцюгових передач, фрикційних гальм і муфт зчеплення цілком заснована на використанні сил тертя. У результаті зношення знижується міцність двигунів внутрішнього згоряння, на 25-30% підвищується ступінь забруднення навколишнього середовища вихлопними газами, збільшуються витрати паливно-змащувальних матеріалів, зростає витік мастила, отруйних і вогненебезпечних продуктів через сальники та ущільнення, погіршується управління транспортними машинами, знижується точність і чистота обробки виробів на металорізальних верстатах і т.п.

Зношення часто стає причиною аварійних руйнувань. Заїдання деталей або їх заклинювання нерідко тягне за собою аварії і навіть катастрофи.

Трибологія грає важливу роль для конструювання, виробництва та експлуатації обладнання для енергетики, газової та нафтової промисловостей.

Це призводить до нерівномірного розподілу тиску по довжині цапфи. На окремих ділянках, зазвичай біля крамок вкладишів, тиск різко зростає (кромковий тиск), а товщина масляного несучого шару зменшується. Несучий масляний шар у цих місцях практично відсутній і тертьові поверхні поділяються лише тонкою граничною поверхневою плівкою мастила. Під час роботи підшипника ця плівка швидко перегрівається і втрачає свої змащувальні властивості, що призводить до безпосереднього контакту тертьових поверхонь і викликає їх підвищений знос і захоплювання.

1.2 Підшипники кочення

У підшипниках кочення (рис. 1.2) причиною виникнення плівкового голодування може стати непостійне та нерівномірне забезпечення підшипників змащенням (при краплинному змащуванні), неправильний вибір змащувальних матеріалів, від чого можуть значно змінитися фізико-механічні властивості змащення під час роботи.

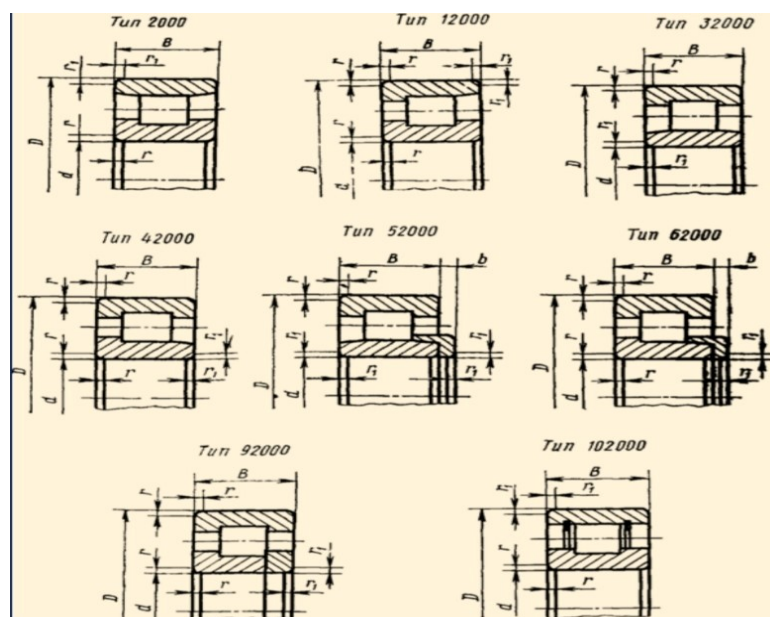


Рисунок 1.2 – Схема підшипників кочення

Результатом цього може стати втрата змащувальних властивостей мастила, пошкодження доріжок та тіл кочення, втрата точності обертання, погіршення динамічних властивостей шпindelного вузла, різкий (дзвінкий) шум чи свист, вихід підшипника з ладу.

1.3 Передача ходовий гвинт-гайка ковзання

У передачі ходовий гвинт-гайка ковзання (рис. 1.3) через низьку міцність змащувальної плівки мастило може стікати з нахильних граней різьби гвинта і гайки, що призводить до плівкового голодування, а, отже, і до збільшення зношення и тертя.

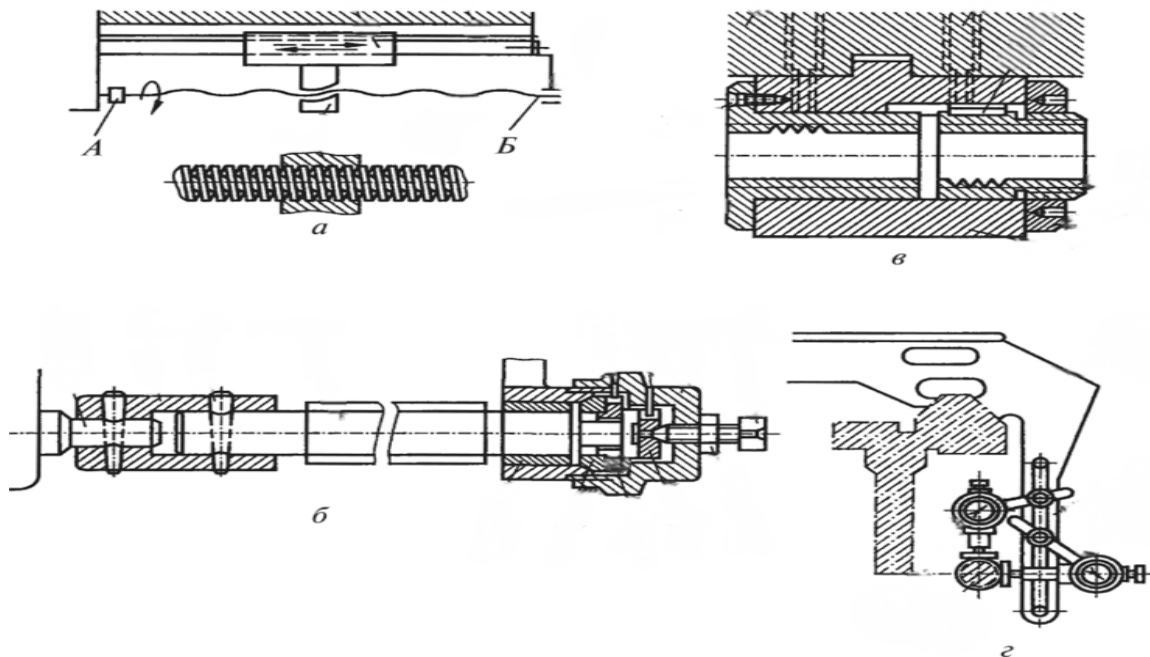


Рисунок 1.3 – Схема передачі ходовий гвинт-гайка ковзання

1.4 Кулькові гвинтові пари

У кулькових гвинтових парах або передача гвинт-гайка кочення (рис. 1.4) плівкове голодування може виникнути при таких умовах:

1) при змащуванні пластичним змащувальним матеріалом у наслідок багаторазової циркуляції кульок товщина змащувального шару зменшується, підвищується зношення;

2) при змащенні рідким змащувальним матеріалом при великих мікро- та макронерівностях контактуючих поверхонь зростає нерівномірність розподілу тиску, розривається захисна плівка та виникає задир поверхонь;

3) при змащенні рідким змащувальним матеріалом при незначних мікро- та макронерівностях захисна плівка не втримується на поверхнях контакту.

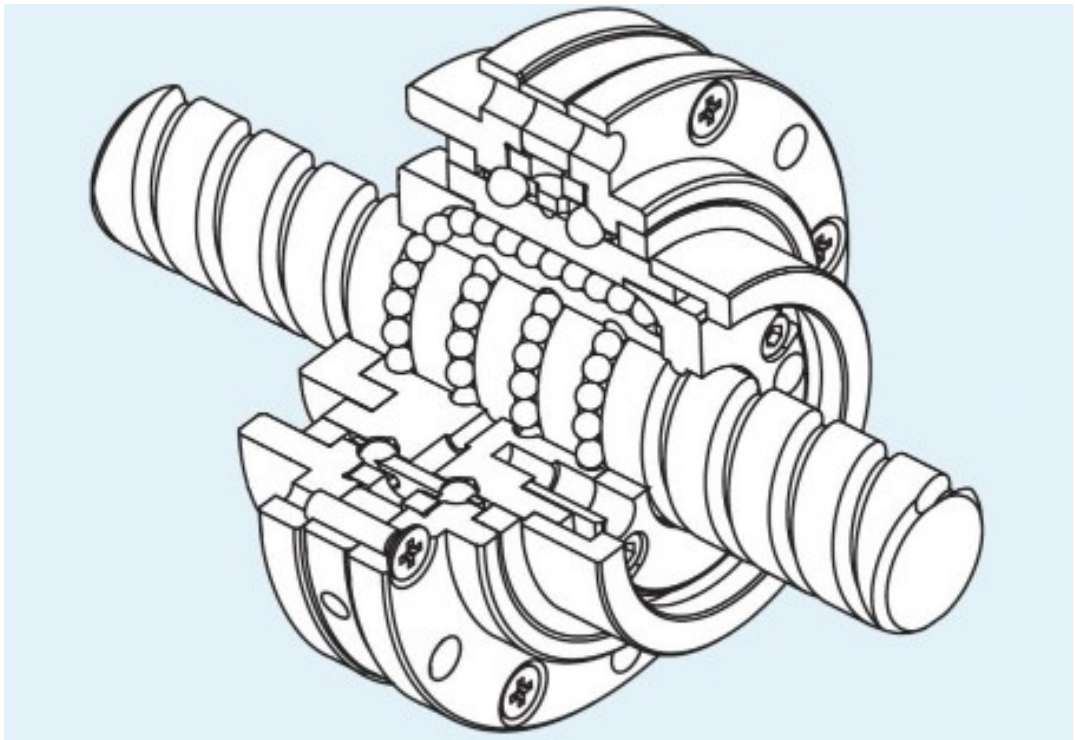


Рисунок 1.4 – Схема кульково-гвинтової пари

1.5 Напрямні ковзання головного руху

У напрямних ковзання головного руху поздовжньо-стругальних та поздовжньо-фрезерних верстатах (рис. 1.5) умовами появи змащувального голодування являються: нестача змащування, поява високого місцевого тиску у направляючих, в результаті деформацій зазвичай недостатньо жорстких столів та станин (у вертикальній площині), в тому числі гнучких деформацій стола при неправильному закріпленні або несприятливому розташуванні важких заготовок, потрапляння сталюї стружки під направляючі стола, відсутність гідро розвантаження. Результатом цього будуть нерівномірність товщини масляного шару між направляючими стола та станини, погіршення умов змащення, задири, що викликають значну інтенсивність зношення.

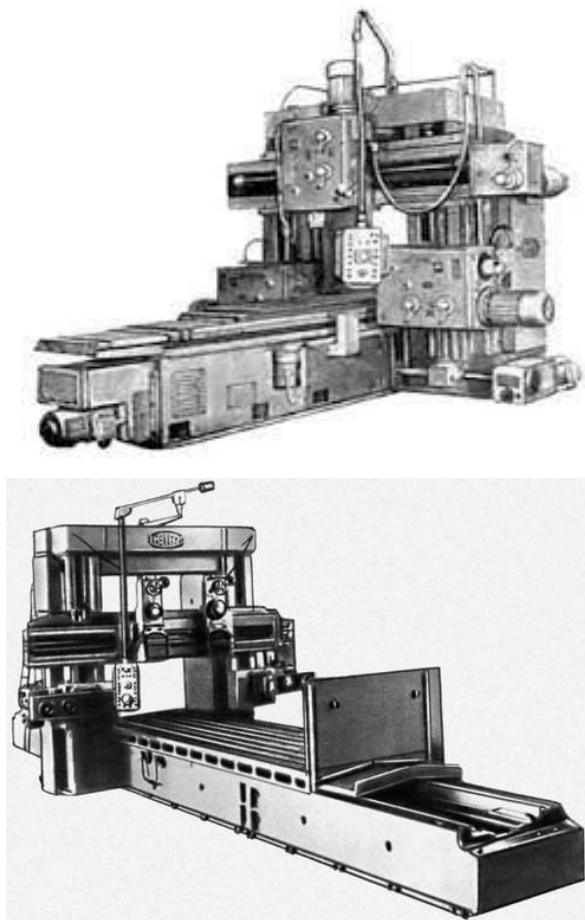


Рисунок 1.5 – Поздовжньо-стругальний та поздовжньо-фрезерний верстати

1.6 Напрямні ковзання руху подачі та встановлюючи переміщення

У напрямних ковзання руху подачі та встановлюючи переміщень причинами утворення плівкового голодування можуть служити:

1) відсутність змащення (ушкодження системи змащення, невчасна заливка мастила і т.п.). Недолік мастила може спостерігатися: на вертикальних напрямних; на горизонтальних напрямних (у більшій кількості на вертикальних та нахильних гранях) при проточному бідному змащенні, особливо при подачі мастила без примусового тиску та постійній малій довжині ходу стола (санок); на планках, куди змащення поступає самопливом з інших граней і т.п. Це призводить до зношення (окислення) масляної плівки, збільшенню зношення, посиленню схоплення, утворенню задирів;

2) при забрудненні відходами обробки тверді дисперговані елементи, маючи розвинуту поверхню, втримують значну кількість мастила. Попадаючи в область тертя, вони пластично деформуються та зрізають поверхневі шари металу разом з захисними плівками, оголюючи ювенільні поверхні.

При недостатньому змащуванні на дільницях, де забрудненням поглинена значна кількість мастила, чисті поверхні металу не можуть бути захищені змащенням, це навіть при порівняно малому тиску призводить до наростаючого схоплення одночасно на значній площині – до утворенню задирів. Тобто відбувається поглинання мастила металевими продуктами зношення та поступового зношення мастильної плівки;

3) при потраплянні значної кількості забруднення на окремі ділянки; підвищена в'язкість мастила у наслідок малої швидкості поглинання в'язкого мастила забруднюючими елементами.

Забруднюючі частинки потрапляють в область тертя майже у сухому вигляді і, зрізаючи поверхневі шари, швидко утворюють задирі. Порівняно невеликої кількості диспергованих забруднених частинок достатньо для

поглинання всього мастила, що знаходиться на відкритих направляючих станини;

4) коливання (вібрації) у вузлі тертя призводить до того, що мастило вижимается і на початку руху на сухих ділянках поверхонь виникає задир.

1.7 Напрямні ковзання кругового руху

У кругових напрямних ковзання головного руху (рис. 1.6) токарно-карусельних верстатах та верстатах з обертаючими супортами для обробки кривошипних шийок колінчатих валів умовою утворення масляного голодування спостерігається при порушенні нормального режиму змащення (65% випадків, у тому числі 45% через пошкодження змащувального апарату), порушення вимог контакту у напрямних в зв'язку з деформаціями планшайби та основи, при цьому проводиться втрата несучої здатності масляної плівки під дією високої температури на площадках контакту при роботі одночасно з високими швидкостями ковзання та тисками; в'язкість мастила різко знижується, режим тертя на окремих ділянках змінюється від рідкого до граничного і працездатність масляної плівки визначається її термостійкістю – десорбцією плівки при високій температурі, утворюються інтенсивні задир.

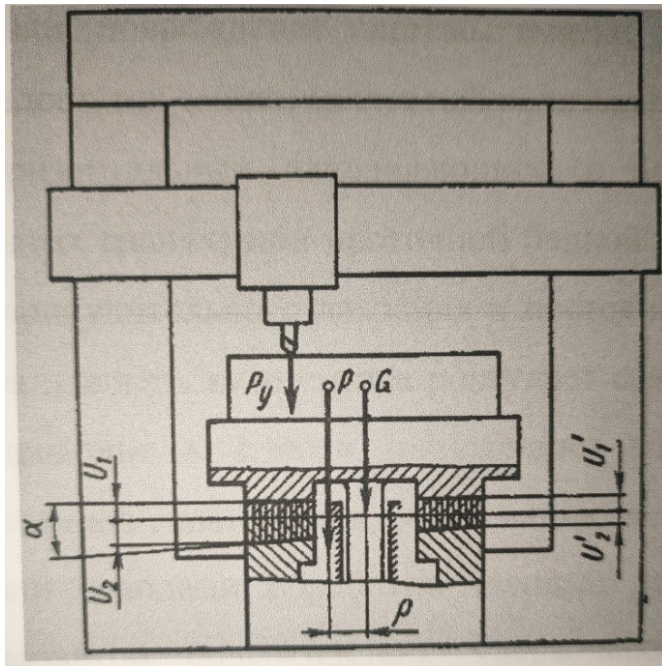


Рисунок 1.6 – Схема напрямних ковзання кругового руху

1.8 Клин-напрямна

У клин-напрявному вузлі (рис. 1.7) інтенсивність руйнування захисної плівки вище, ніж інтенсивність її відновлення або утворення під час пуску чи зупинка руху (у місцях фактичного контакту).

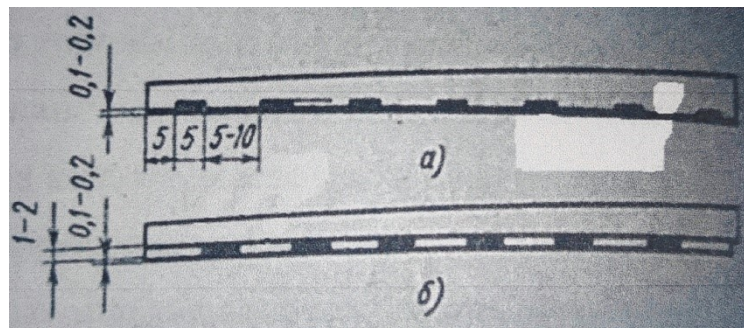


Рисунок 1.7 – Конструкція клина: а- сталюго; б – сталюго, армованого латунними пластинами

2 ВИДИ ЗНОШЕННЯ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ

Основними причинами виведення обладнання з ладу є:

- 1) порушення правил експлуатації, у тому числі перевантаження окремих механізмів та вузлів;
- 2) порушення регулювання визначеного вузла чи механізму;
- 3) знос окремих деталей та вузлів, вихід з ладу окремих механізмів, втрата точності.

Якщо виходу з ладу обладнання з перших двох причин можна запобігти забезпеченням належного догляду і правильної експлуатації, то знос механізмів – явище постійне. Здійснюючи ряд технічних рішень, можна сповільнити знос, але запобігти його майже неможливо.

Термін служби верстатів в основному визначається зношуванням, при якому відбувається втрата механізмом початкових експлуатаційних якостей. Зношування – це процес руйнування і відокремлення матеріалу з поверхні твердого тіла, незворотний процес зміни деталей під час експлуатації. В наслідок зношування змінюється форма, розміри і стан робочих поверхонь деталей. У залежності від умов роботи одні деталі зношуються швидше, інші – повільніше.

Розрізняють три періоди зносу. Процес зносу в першому періоді характеризує початкову роботу з'єднання – період припрацювання його сполучених деталей. Величина і ступінь інтенсивності зносу в період припрацювання залежить від якості поверхонь деталей.

Другий період характеризує нормальну роботу з'єднання. Знос поступово наростає, його величина залежить від тривалості роботи з'єднання.

Третій період – інтенсивне наростання зносу, коли зазори в спряженнях різко збільшуються. В міру наростання зносу працездатність механізму порушується і зрештою виходить з ладу.

2.1 Види випробувань на зношення

Основною задачею антифрикційних випробувань матеріалів являється вивчення впливів численних факторів на процес тертя та зношення.

Ці фактори можна класифікувати наступним чином:

- 1) фізико-механічні властивості матеріалів та геометрія контактуючих поверхонь, що визначають фрикційну поведінку пари тертя;
- 2) фізико-механічні властивості матеріалів та геометрія контактів залежать від температури, навантаження та швидкості ковзання;
- 3) конструкційні особливості вузла тертя, що впливають на фізико-механічні властивості та геометричні характеристики тертьових поверхонь (умови тепловіддачі, коефіцієнт взаємного перекриття, розподіл температурних полів, епюри, навантаження та швидкості, зазори між спряженими деталями і т.п.);
- 4) навколишнє середовище.

2.2 Класифікація видів зношення деталей машин

Зношення кожної пари тертя залежить від зовнішніх механічних впливів, середовища, властивостей тертьових металів та стан їх поверхонь.

Основними видами зношення деталей машин (класифікація Б.И. Костецього) являються:

1. Схоплювання 1-го роду

Механізм руйнування визначається взаємодією робочих рельєфів при тисках, що перевищують межу текучості, супроводжується інтенсивними пластичними деформаціями, в результаті яких руйнуються плівки оксидів та розриваються хімічно чисті металеві поверхні. Пластичні деформації

сприяють максимальному зближенню деталей та утворенню поверхневих шарів текстур з гранично деформованих кристалів, розташованих у напрямку відносного зміщення деталей. Якщо відстані гранично малі і порівняні з розмірами атомних ґраток, між орієнтованими кристалами двох деталей з'являються металеві зв'язки. Подальше усунення деталей призводить до зміцнення металу у місцях утворення зв'язків. При граничних значеннях твердості та крихкості металеві зв'язки розриваються.

2. Окисний

Механізм руйнування поверхонь визначається взаємодією матеріалів деталей з киснем навколишнього середовища: насичення металу киснем за рахунок хімічних реакцій, проникнення кисню у поверхневі шари деталей та розчинення кисню у поверхневих шарах. Тепловиділення при терті, що сприяє дифузії з газового або змащувального середовища викликає утворення твердих розчинів та плівок оксидів, захищаючих вихідні матеріали спряжень деталей від інтенсивного зношення. Ці процеси характерні для вузлів тертя, деталі яких виготовлені з матеріалів з високою твердістю та підвищеною межею текучості. Зношення поверхонь полягає у періодичній появі та сколюванні твердих і тендітних хімічних сполук, що виявляються у вигляді окисних плівок.

3. Тепловий (схоплення 2-го роду)

Зазвичай утворюється при таких умовах:

- тертя ковзання;
- високі тиск та швидкість відносного переміщення (понад 4 м/с), поєднання яких зумовлює великі втрати на тертя;
- високий градієнт та інтенсивне зростання температури у поверхневих шарах (до 1600°C).

4. Абразивний

Розвивається при терті ковзанні. Умови виникнення: наявність на поверхнях тертя абразивних частинок, що деформують мікрооб'єми поверхневих шарів та викликають процеси мікрорізання.

5. Втомний

Виникає при терті ковзанні, змінних або знакозмінних навантаженнях та високих тисках, що досягають межі витривалості. Багаторазові навантаження викликають втому матеріалу. На площинах максимальної напруги всередині деталі зароджуються тріщини. Їх розвиток призводить до розриву контактної поверхні, що змінює характер взаємодії деталей. Рух тіла кочення через розрив поверхні супроводжується динамічними явищами, у результаті зношення прогресує.

3 ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ЗМАЩУВАННЯ ТА МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Мащення призначене для зниження коефіцієнту тертя, зменшення зносу поверхонь контакту, відведення тепла від вузлів тертя, захисту деталей від корозії.

Для мащення поверхонь тертя застосовують мастильні масла та пластичні мастильні матеріали. Для промислового обладнання використовують індустріальні масла, які умовно поділяються на такі групи:

- малов'язкі (легкі) в'язкістю від 6 сСт за 20°C до 10 сСт за 50°C;
- середньов'язкі (середні) в'язкістю від 10 до 58 сСт при 50°C;
- в'язкі (важкі) в'язкістю від 58 сСт при 50°C до 96 сСт при 100°C.

3.1 Основні властивості масел

В'язкість масла визначається силами тертя між окремими шарами рідини і характеризується динамічною в'язкістю μ і кінематичною в'язкістю ν . Динамічна в'язкість визначається як відношення дотичної сили внутрішнього тертя до градієнту швидкості dv/dr за формулою:

$$\mu = \tau / \frac{dv}{dr} \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (3.1)$$

Кінематична в'язкість представляє собою відношення динамічної в'язкості до густини:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ м}^2 / \text{с} \quad (3.2)$$

Кінематична в'язкість може задаватися в інших одиницях, зокрема сантиметрах ($1 \text{ cSt} = 1 \text{ мм}^2/\text{с} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

При виборі масла слід враховувати три критичні значення в'язкості: оптимальне за нормальної роботи температури; максимальне за найбільш низької температури, за якої повинен бути забезпечений запуск холодної системи; мінімальне за максимальної робочої температури. Залежність в'язкості від температури характеризується індексом в'язкості. Масла з меншою залежністю в'язкості від температури мають більш високий індекс в'язкості.

Стабільність проти окислення. Мастильне масло під час експлуатації не повинне піддаватися значним хімічним та фізичним змінам. Однією з найбільш імовірних змін є окислення масла. В результаті зростає корозійна агресивність масла по відношенню до металевих поверхонь, зростає в'язкість масла або утворюються нерозчинні в маслі речовини у вигляді осадків.

Процес окислення масел прискорюється під дією високих температур або в присутності каталізаторів: металів і металевих солей органічних кислот, що утворюються внаслідок взаємодії продуктів окислення з металом. Для гальмування окислення додають антиокислювачі або інгібітори окислення.

Антикорозійні властивості. Органічні нафтові кислоти, які знаходяться в мінеральних маслах, а також утворюються внаслідок окислення масла під час роботи в кількостях, що перевищують допустимі межі, можуть стати причиною корозії. Особливо чутливі до корозійної дії цих кислот кольорові метали і їх сплави, які використовуються для заливання вкладишів підшипників. Для оцінки антикорозійних властивостей служать граничні норми за кислотним числом.

3.2 Основні властивості пластичних мастил

За своїми властивостями пластичні мастила займають проміжне місце між твердими мастилами і маслами. В основному мастила складаються з двох компонентів: рідкої основи (мінеральні, рослинні, синтетичні і інші масла) і загусників (тверді вуглеводи, мила, високодисперсні силікати і інші).

Загусники, зокрема мила, в процесі приготування мастила утворюють його тривимірний каркас, в комірках якого утримується масло.

Основними перевагами пластичних мастил є: здатність утримуватись в вертикальних вузлах тертя, працездатність в більш широких температурному та швидкісному діапазонах, краща змащувальна здатність, більш високі захисні властивості від корозії, працездатність в контакті з водою та іншими агресивними середовищами, більша економічність застосування.

До недоліків мастил слід віднести: погану охолоджувальну здатність, більш високу схильність до окислення, складність подачі до вузлів тертя.

3.3 Основні характеристики мастил

Границя міцності (P_a) представляє собою те мінімальне критичне зусилля, яке необхідно прикласти, щоб відбулась деформація структурного каркасу мастила і почався його рух. Абсолютна величина і температурна залежність характеризують здатність мастила утримуватись в вузлі тертя.

В'язкість (η , $P_a \cdot c$) характеризує витікання мастила після порушення зв'язків в його структурному каркасі у наслідок прикладання критичного навантаження. В'язкість мастила залежить не лише від температури, але і від умов витікання, тобто швидкості деформування. З підвищенням температури і зростанням швидкості деформації в'язкість мастил зменшується.

В'язкість мастила визначає умови його заправки у вузли тертя за низьких температур, впливає на пускові і усталені моменти зсуву підшипників.

Механічна стабільність характеризується зміною об'ємномеханічних властивостей мастил, наприклад границі міцності, внаслідок механічної обробки і наступного їх відпочинку. Механічно нестабільне мастило, тобто таке, що сильно руйнується і не відновлює своїх початкових властивостей після зняття деформуючих навантажень, витече з вузла тертя і призведе до передчасного його пошкодження.

Колоїдна стабільність – здатність мастила під дією зовнішніх сил утримувати в комірках структурного каркасу масло. Колоїдну стабільність визначають у відсотках масла, що виділилось.

Колоїдно-стабільні мастила можуть не виділяти масло під час зберігання і експлуатації тривалий час. Незначне виділення масла з мастила під час його роботи в вузлі тертя завжди корисне, оскільки це сприяє покращенню умов мащення деталей, що труться. Та надмірно велике виділення масла з мастила (низька колоїдна стабільність призводить до витікання масла з вузла тертя і утворення в ньому затверділої маси загусника, тобто до порушення режиму мащення.

Для характеристики пластичних мастил можуть використовуватись і інші показники. Такі як: випаровуваність, водостійкість, несуча здатність мастильної плівки, температура крапле падіння, пенетрація.

3.4 Класифікація систем мащення

Рідке мащення. У тих випадках, коли мащення пластичним мастилом виявляється недоцільним у наслідок необхідності його частої заміни або коли максимальна частота обертання надто висока для мащення пластичним

мастилом, повинно використовуватись мащення мінеральним маслом. Способи підведення рідкого масла в підшипники досить різноманітні: мащення зануренням, циркуляційне, мінімальне (з впорскуванням, масляний туман, тощо). Вибір системи мащення залежить від умов роботи та конструкції опори.

Циркуляційне мащення. Має ряд переваг, головна з яких – тепловідведення від підшипників. Це дає можливість стабілізувати температуру опор шпинделя і шпindelної бабки в цілому, і, завдяки цьому, усунути температурні деформації, які суттєво знижують точність роботи верстата. Витрати на циркуляційне мащення можна знизити, якщо використовувати насосний ефект несиметричних підшипників.

В більшості випадків в верстатах циркуляційне мащення підшипників здійснюється за допомогою спеціальних насосів, оскільки лише така система забезпечує ефективне відведення тепла.

Як зазначалось, для мащення підшипників потрібна дуже мала кількість масла. Тому створюються системи мінімального мащення, коли в робочу зону підшипника, тим чи іншим способом, вводять точно дозовані малі об'єми масла.

Режим мінімального мащення може забезпечуватися крапельним змащенням, масляним туманом, маслом повітряним мащенням та змащенням впорскуванням.

В сучасних верстатах крапельне змащення реалізується за допомогою імпульсних дозаторів (імпульсне змащення).

Змащування масляним туманом раніше було найбільш поширеною системою мінімального мащення. Однак цю систему неможливо відрегулювати на ту невелику кількість, яка потрібна, і це може призвести до надмірних температур підшипників. Змащування масляним туманом може також створювати проблеми для оточуючого середовища. Найбільш надійною системою для роботи з дуже незначними кількостями масла з точним дозуванням є система маслоповітряного мащення.

Маслоповітряне змащування. В разі застосування маслоповітряного мащення немає обмежень в відношенні типу масла і в'язкість масла може бути більш високою, ніж це можливо в разі мащення масляним туманом. Не виникає жодних проблем в зв'язку з оточуючим середовищем, оскільки від шпиндельного вузла не виходить масляний туман. Принципова схема маслоповітряного мащення наведена на рис. 3.1.

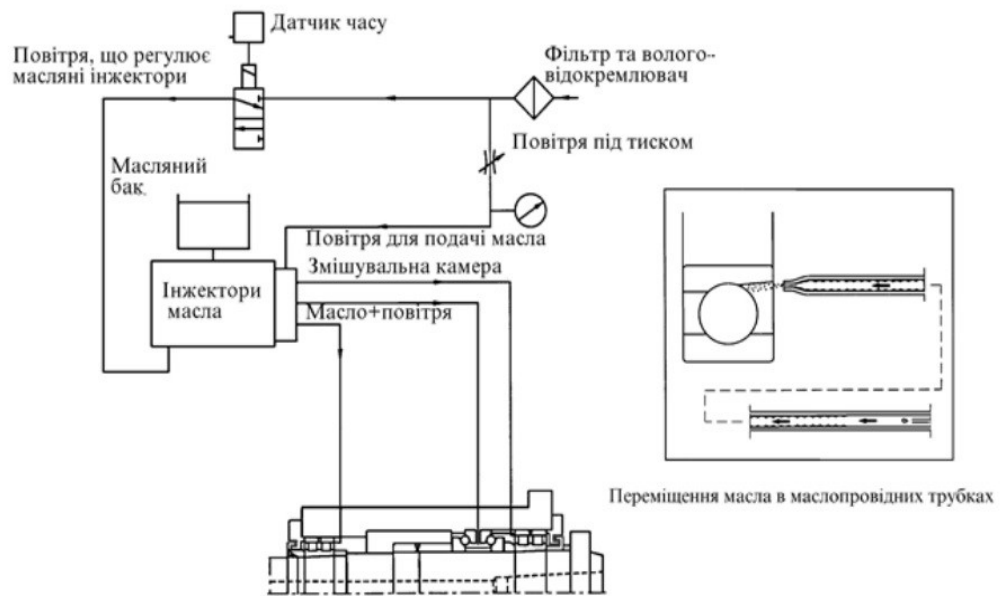


Рисунок 3.1 – Система масло повітряного мащення

Пневматично керовані інжектори подають через визначені інтервали часу точно визначені кількості масла, десь $2-35 \text{ мм}^3$. Масло подається в масловідвідні трубки за рахунок безперервно діючого стиснутого повітря через змішувальну камеру.

В трубках масло «повзе» по стінках у вигляді когезійної плівки і рухається вперед відносно повільно в вигляді хвилі. Звужені виходи трубки розміщені поряд з підшипниками. Таким чином забезпечується подача масла безпосередньо у підшипник. Оскільки масло розтікається по трубках, можуть бути допущені достатньо тривалі інтервали між подачами масла зі збереженням безперервної подачі масла в підшипники.

Необхідну кількість масла для подачі у підшипник шпинделя можна визначити за формулою:

$$Q = \frac{k \cdot d \cdot B}{100} \quad (3.3)$$

де Q – витрати масла, мм³/год;

k – коефіцієнт, що залежить від типу підшипника;

$k \approx 1$ – для радіальних роликів підшипників; $k \approx 2 \dots 3$ – для радіально-упорних кулькових підшипників.

d – діаметр отвору підшипника, мм;

B – ширина підшипника, мм.

Кулькові підшипники не такі чутливі до витрат масла, як роликові, отже, можуть бути допущені більш високі витрати масла без будь-якого негативного впливу на температуру. Для високошвидкісних шпиндельних вузлів з радіально-упорними кульковими підшипниками потрібно більш високі витрати масла, ніж це визначається рівнянням, оскільки спостерігається для насосного ефекту.

Інтервал часу між моментами змащення визначаються у відповідності з об'ємом масла, який може забезпечити інжектор за час одного імпульсу, і необхідної витрати масла за годину. Інтервали можуть змінюватись в діапазоні від 1 хвилини до 1 години, та найбільш широко використовуються інтервали, що складають 15 – 20 хвилин.

Для того, щоб добитись задовільного розподілу масла у трубопроводі, трубки не повинні бути занадто короткими. Для забезпечення більших інтервалів необхідні трубки більшої довжини. Для інтервалів 15 хвилин трубки повинні бути не коротші за 0,5 м. Тиск повітря повинен складати 0,2-0,3 МПа. Якщо трубки дуже великої довжини, то може знадобитись більш високий тиск повітря для компенсації падіння тиску у трубопроводі.

Впорскування масла. Для забезпечення достатнього змащування без підвищення робочої температури в умовах дуже високих швидкостей у підшипник має надходити достатня, але не надмірна кількість масла. Одним з найбільш ефективних методів досягнення такого режиму є впорскування масла (рис. 3.2), коли струмінь масла під високим тиском направляєтся в торець підшипника. Швидкість струменя масла повинна бути досить високою (не менше 15 м/с) для подолання завихрень, що виникають навколо обертового підшипника.

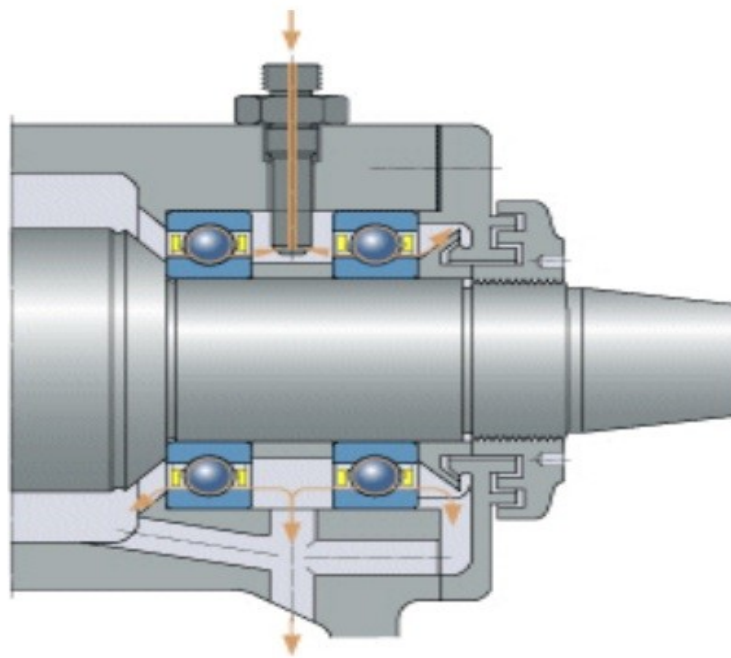


Рисунок 3.2 – Система змащення впорскуванням масла

4 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗНОШЕННЯ У ТРИБОСПРЯЖЕННЯХ

4.1 Визначення величини зношення шляхом мікрометричних вимірювань

Найбільш поширеним та доступним методом визначення деталей є метод мікрометричних вимірювань. Цей метод найчастіше використовується за умови великих абсолютних величин зношування деталей. Він заснований на вимірюванні деталей за допомогою механічних контактних або інших приладів до та після випробування на зношування.

Точність вимірів при мікрометру ванні залежить від інструменту, що застосовується. Зазвичай воно становить 0,01 мм. Застосування дуже точних, а також спеціальних інструментів, що дозволяють проводити вимірювання з точністю до 1 мкм, забезпечує визначення величини зносу з точністю не менше 5 мкм. Пояснюється це тим, що виміри проводяться в різний час і за різних температурних умов, дається взнаки неточність установки інструменту і т.д. Вимір розмірів однієї і тієї ж поверхні при різних температурах може дати значну різницю у показаннях.

Застосовуючи метод мікрометрування для оцінки величини зношування, слід враховувати похибки, причина яких полягає в наступному:

- 1) при визначенні зношування за різницею розмірів у цю величину входить і зміна розмірів деталі у наслідок її деформації. При визначенні зношення внутрішніх стінок циліндрів та зовнішніх поверхонь валів неможливо виявити, як розподіляється зношення по протилежних поверхнях;
- 2) практично неможливо зробити вимір в тому самому місці до та після випробування;
- 3) температура, при якій проводиться вимірювання до та після зносу, температура інструменту та деталі, що вимірюється, неоднакові;

4) при визначенні розмірів контактними приладами можливі помилки внаслідок непостійного характеру контакту вимірювального наконечника приладу з поверхнею деталі.

4.2 Визначення величини зношування за втратою ваги

Ваговий метод зазвичай застосовується для визначення зношення невеликих деталей. Їх зважують до та після випробування. Перед зважуванням деталі повинні бути ретельно промиті, просушені, після проведення випробування з них необхідно змити продукти зношування, мастила тощо.

Вагова характеристика зношення – це вага речовини, що видаляється з одиниці номінальної площі контакту за одиницю шляху тертя.

Визначення величини лінійного зношення за втратою ваги здійснюється шляхом обчислення, заснованих на припущенні, що зношення виникає рівномірно по поверхні тертя. Може бути обрана і інша закономірність розподілу зношення по поверхні, обумовлена умовами роботи деталі. Лінійна характеристика зношення уявляє собою висоту зношеного шару, що припадає на одиницю шляху тертя.

Ваговий знос перераховується в лінійний за формулою:

$$I_h = \frac{Q}{S\gamma L \cdot 10^8} \quad (4.1)$$

де Q – вагове зношення, мг;

S – площа поверхні тертя, см^2 ;

γ – питома вага матеріалу, $\text{г}/\text{см}^3$;

L – шлях тертя, км.

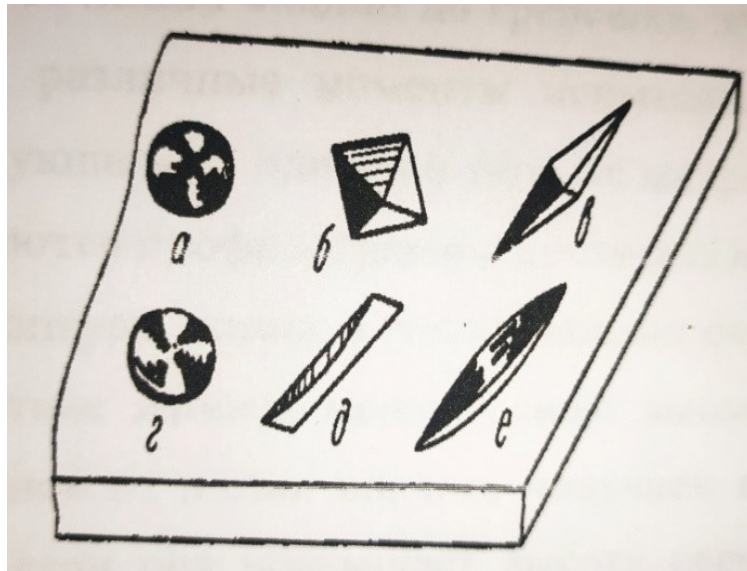
Однак не завжди необхідно робити такий перерахунок. Так, наприклад, при дослідженні впливу палива або змащування на зношення деталей поршневої групи двигунів вагове зношення приймається за безпосередню характеристику роботи деталі.

Величину зношення ваговим методом не рекомендується визначати у тих випадках, коли зміна розмірів деталі виникла не тільки внаслідок відокремлення частинок, але і через пластичну деформацію. Ваговий метод виявляється неприйнятним і при визначенні величини зношування деталей з пористих матеріалів, просочених мастилом, бо неможливо сказати, чи була однакова кількість мастила в опорах при зважуванні до та після випробування.

4.3 Визначення величини зношення методом штучних баз

Вимір величини зношення методом штучних баз полягає у визначенні шляхом обчислення відстані від поверхні тертя до дна заглиблення, штучно зробленого на цій поверхні та закономірно звужується від поверхні до дна поглиблення. Вісь поглиблення розташована перпендикулярно до поверхні тертя, і лінійне зношення поверхні визначається у напрямку цієї вісі.

Поглиблення на поверхні можуть бути нанесені алмазним індентором у вигляді піраміди або конусу шляхом вдавлювання, висвердлювання кінцевого поглиблення, вирізанням лунки обертаючим алмазним різцем з заточкою у вигляді трьохгранної піраміди, витиранням або шліфуванням лунки диском.



а – кулькового сегменту; б – піраміди з квадратною основою; в – піраміди з ромбічною основою; г – конусу; д – лунки циліндричної форми; е – лунки, утвореної двома гіперболоїдами обертання (або двома конусами)

Рисунок 4.1 – Різні форми закономірно звужуючих поглиблень

На рис. 4.1 представлені різні форми таких поглиблень. Дно поглиблення служить незмінною штучною базою, від якої вимірюється відстань до поверхні тертя, співвідношення якої з глибиною заздалегідь відомо, можна визначити величину місцевого лінійного зношення.

Метод штучних баз у залежності від способу нанесення поглиблення поділяють на: метод відбитків, метод висвердлених поглиблень, метод вирізаних (шліфувальних) лунок.

4.4 Визначення величини зношення за допомогою профілографування

На профілограмі визначається величина так званого «первинного зношення», за який можна прийняти різницю у висоті мікронерівностей від лінії впадин до гребня, виміряну на тому самому місці у різні моменти

випробування. Спосіб цей полягає у наступному. З однієї і тієї ж мікроділянки досліджуваної поверхні знімаються профілограми до лопатку випробування та після. На профілографах контури одних і тих же впадин залишаються постійними, а виступи, у наслідок зношення, змінюють свою висоту. Визначаючи загальне зменшення виступів від лінії впадин, отримуємо величину первинного зношення. У випадку, якщо вона перевищує висоту нерівностей, у якості постійної бази, від якої проводиться вимірювання, обирається непрацююча ділянка досліджуваної поверхні.

Застосування методу профілографування для визначення величини зношення дозволяє отримати графічний запис рельєфу зношеної поверхні, що дає можливість судити о розподілі зношення по цій поверхні у межах ходу голки.

Для дослідження цей метод оптимальний, так як дає високу точність замірів, що дуже важливо для подальших розрахунків. Для замірів застосовувався профілограф-профілометр мод. 170311.

5 МЕТОДИ ЗЕБЕЗПЕЧЕННЯ УНИКНЕННЯ МАСЛЯНОГО ТА ПЛІВКОВОГО ГОЛОДУВАННЯ

Існує два основних взаємовиключних підходи до рішення проблеми граничного тертя.

Перший підхід

Еластогідродинамічний підхід (ЕГД) – переважно теоретичний, заснований на динамічних процесах у тонкому змащувальному шарі, у якому виникає надлишковий тиск, ототожнюване з контактною напругою в робочих поверхнях, хоча трибоконттакт має три характерні області по напрямленню руху: звужуюча або конфузорна область (КО), перехідна область (ПО) та розширююча або дифузійна область (ДО). При цьому змащувальне середовище розглядається, як ньютонівська однорідна рідина. Цей підхід розроблений О. Рейнольдсом, М.П. Петровим, О.И. Петрусевичем та ін. в основному на рівні теоретичних описів, якими передбачається безвихідь ЕГД-контакту, що заперечує дослідженню. При цьому адгезійно-деформаційні взаємодії між поверхнями не розглядаються. Однак у рамках цього підходу виявлені кавітації та термoeфект у змащувальних шарах, підтверджуючи наявність в них динамічних процесів.

Сучасне моделювання трибосистем розвивається з урахуванням кавітаційних процесів, що спостерігаються у змащувальних шарах дифузійної ділянки трибоконттактів, шляхом модифікації класичного рівня О. Рейнольдса з використанням нових математичних апаратів його рішення, наприклад, алгоритму збереження мас. Природа кавітації до кінця не з'ясована. Відомо, що тверда поверхня надає упорядкований ефект на рідину і як би кристалізує прилеглу безпосередньо до неї тонкий прошарок рідини, яка має, так звану, епітропну рідкокристалічну (ЕРК) структуру. Дослідження показали, що структура рідини у безпосередній близькості до твердої поверхні складніша, ніж уявлялось раніше. У звичайних нормальних

умовах у рідинах завжди хоч і у малих концентраціях, але присутні розчинні гази (1...6% об'єму), а при змочені твердої стінки їх поділяє тонкий шар газу, який мігрує із об'єму рідини і осідає на поверхні твердого тіла. Цей встановлений ефект має велике значення для трибосистем, так як газовий підшар являється її новим додатковим елементом. Тому сучасні фізичні моделі трибосистем з граничним змащенням повинна відображати фазові перетворення агрегатного стану граничних шарів, у тому числі і кавітаційні ефекти.

Другий підхід

Заснований на адгезійно-деформаційній теорії граничного змащування (АД) – переважно експериментальний, являється признаним у сучасній трибології, експериментально підтвердженим та розвиненим у роботах Крагельського І.В., Боудена та ін., а також вітчизняним вченим Костецьким Б.І. та його школою (Голего Н.Л., Аксенов А.Ф., Шевеля В.В., Запорожець В.В., Дмитриченко Н.Ф. та ін.). У рамках цього підходу граничний шар розглядається, як «третє тіло», у якому тиск, ототожнюване з герцевськими контактними напругами, завжди вище тиску оточуючого середовища. При цьому будь-які динамічні процеси у граничному шарі не враховуються, що не дозволяє пояснити присутні у ньому кавітації та термoeфекти, описати кінетику адгезійно-деформаційної взаємодії поверхонь, визначити умови та область його локалізації, пояснити механізм утворення та розподілу продуктів зношування у контактній області та інші ефекти. Це обмежує установлення взаємозв'язків неоднозначних складних динамічних процесів у граничних шарах з адгезійно-деформаційною взаємодією поверхонь, що не дозволяє керувати трибологічною поведінкою трибоконтракту.

Третій підхід

З'явився не так давно до розглянутої проблеми, оснований на адгезійно-деформаційній взаємодії поверхонь у його взаємозв'язку з

динамічними процесами у граничному шарі. Для встановлення такого взаємозв'язку були проведені систематичні комплексні дослідження як закономірностей динамічних процесів у граничному шарі, так і адгезійно-деформаційної взаємодії поверхонь сумісно з трибологічною поведінкою контакту, розроблена фізична адгезійно-гідродинамічна (АГД) модель тертя.

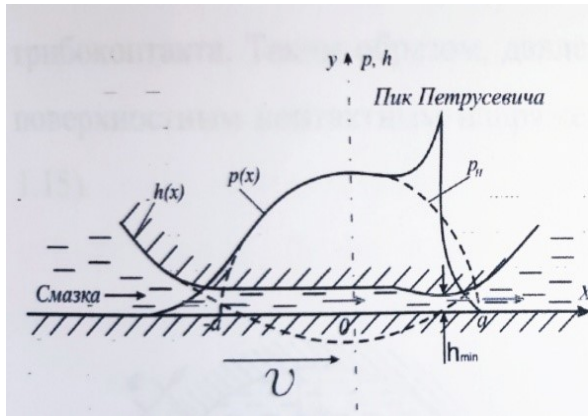
Фундаментом найбільш признаних адгезійно-деформаційної теорії граничного змащення та еластогідродинамічного підходу до опису процесів тертя та зношування служать відповідні фізичні моделі, що суперечать одна одній. Оскільки граничне тертя здійснюється у рідкій змащувальній середі, природно припустити вплив властивостей цього середовища і динамічних процесів, що протікають в ній, на трибо логічні характеристики вузла спряження, і, відповідно, на його працездатність. Для усунення протиріч між АД і ЕГД моделями представляє інтерес створення компромісної адгезійно-гідродинамічної моделі, яка усувала б розбіжності адгезійно-деформаційного та еластогідродинамічного підходів до опису процесів граничного тертя та зношування з урахуванням впливу взаємообслуговуючих гідродинамічних та адгезійно-деформаційних процесів на працездатність трибосистем.

Згідно АД моделі у процесі граничного тертя змащувальний шар розглядається, як вторинна структура «третє тіло» у вигляді аморфної «склоподібної» субстанції, яка виникає під дією високих контактних напруг [17]. Його міцність підпорядковується закону пружної деформації твердих тіл Гука, а модуль пружності молекул мастила спів мірний з такими алмаза. При цьому адгезійне зношення робочих поверхонь відбувається дискретно у межах контурної площі трибоконтракту, що експериментально не підтверджується. Такий підхід обмежує способи боротьби з зношуванням традиційними матеріалознавчими прийомами – створенням нового складу змащування, конструкційних матеріалів, їх покриття, а також структуруванням поверхонь. У рамках АГД моделі експериментально доведена локалізація адгезійної взаємодії у дифузійній області контакту і впливає на його динамічні процеси у граничних шарах. що обумовлюють

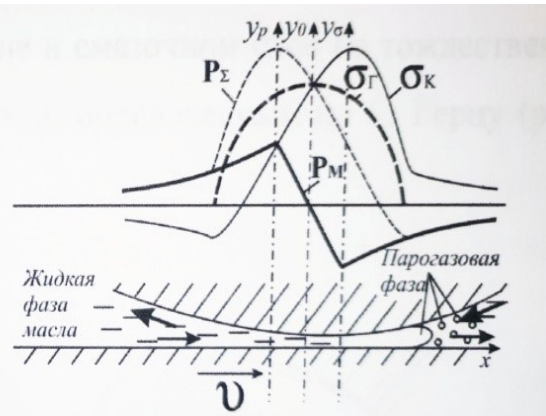
двофазний (рідко газовий) стан змащувальної середи та ступінь розрідження у дифузійній області. Це розширює можливості придрушення адгезійної взаємодії шляхом створення нових двофазних змащувальних матеріалів та конструкційних способів для їх виникнення на початковому етапі роботи трибоконтакту. На рис. 5.1 представлені характерні ознаки три контакту з позицією ЕГД та АГД моделей, які істотно відрізняються. У рамках ЕГД моделі (рис. 5.1) рухома плоска поверхня реалізує контакт із нерухомою поверхнею h_x протяжністю $[-aOa]$, у поверхнях якого у статиці (без тертя) виникають контактні напруження p_n . При русі нижньої плоскої поверхні зі швидкістю V в граничному шарі створюється тиск p_x , що ототожнюється з контактною напругою. На епюрі контактних напруг виділяють наявність піку Петрусевича в області виходу поверхні, що рухається з контакту, де товщина мастильного шару h_{min} мінімальна. У рамках ЕГД моделі трибосистема є безносною при певній і мінімальній товщині мастильного шару, яка визначається «контактними напругами», що розраховується за Герцем, і тиском у шарах. Однак прямі експериментальні вимірювання, як мінімальної товщини мастильного шару, так і тиск в них відсутній. При цьому вважається, що тиск у змащувальних шарах при терті завжди вище атмосферного. Поняття «контактні напруження», «тиск у змащувальних шарах» та «тиск на тертих поверхнях» потребують корекції відповідно до експериментальних даних, що положенні в основу АГД моделі тертя і трибокавітаційного механізму зношування.

Порівняння розподілу тиску у змащувальному шарі радіального підшипника з позицією ЕГД (рис. 5.1) та АГД (рис. 5.2) моделей вказує на доцільність обліку динамічних процесів у граничних шарах мастила, особливо у дифузійній області контакту, що являється істотним доповненням відомих схем при будованні математичних моделей. Принципова відмінність полягає в тому, що в рамках АГД моделі дифузійна область трибоконтакту практично виявляється не змащеною при підвищених навантаженнях від розрідження в граничних шарах, тоді як з позиції ЕГД моделі тиск у всіх

областях контакту більший за тиск навколишнього середовища. Встановленні раніше експериментальні закономірності свідчать про те, що в граничних шарах трибоконтакту протікають значно складніші процеси, ніж прийняті в рамках АД і ЕГД моделях.



Рисуюнок 5.1 – Характерні ознаки трибоконтакту з позицією ЕГД моделі



Рисуюнок 5.2 – Схема контактної гідродинамічних процесів з позицією АГД моделі

Як показали прями вимірювання тиску у змащувальних шарах трибоконтакту, в них виникає характерний конфузний стиск та дифузорне розрідження, що лежить в основі АГД моделі тертя, основні положення якої (табл. 1.1) не узгоджуються з ЕГД моделлю. Експериментально доведено, що при терті у змащувальному шарі відносно його мінімальному зазору мимоволі виникає стискання змащувальних шарів у конфузній та їх розтягування – у дифузійній областях трибоконтакту. Таким чином, тиск у змащувальному шарі не тотожно поверхневим контактним напругам, що визначаються за Г. Герцом (рис. 5.2).

З позицією АГД моделі при русі нижньої плоскої поверхні зі швидкістю V (рис. 5.2) у конфузійній області окрім набігаючого потоку граничних шарів виникають вторинні, зворотні рухи течії змащувального середовища (показано стрілками). У дифузійній, розширювальній області,

при певних швидкостях виникають мастильнопароповітряна фаза змащення та вторинні, зворотні рухи, течії із середовища до контакту. Це відбувається відповідно до експериментальної закономірності розподілу тиску в мастильному шарі P_M , яке у конфузійній області вище, а у дифузійній нижче тиску навколишнього середовища. При цьому реактивні тиски, що виникають на поверхні нерухомого криволінійного трибоелемента SP , являє собою суму герцевських напруг σ_r і тиску у мастильному шарі P_M , а «контактні напруги» σ_k і тиск у мастильному шарі P_M лише у дифузійній області, де найбільш вірогідно виникнення фактичного контакту напруження являються контактними.

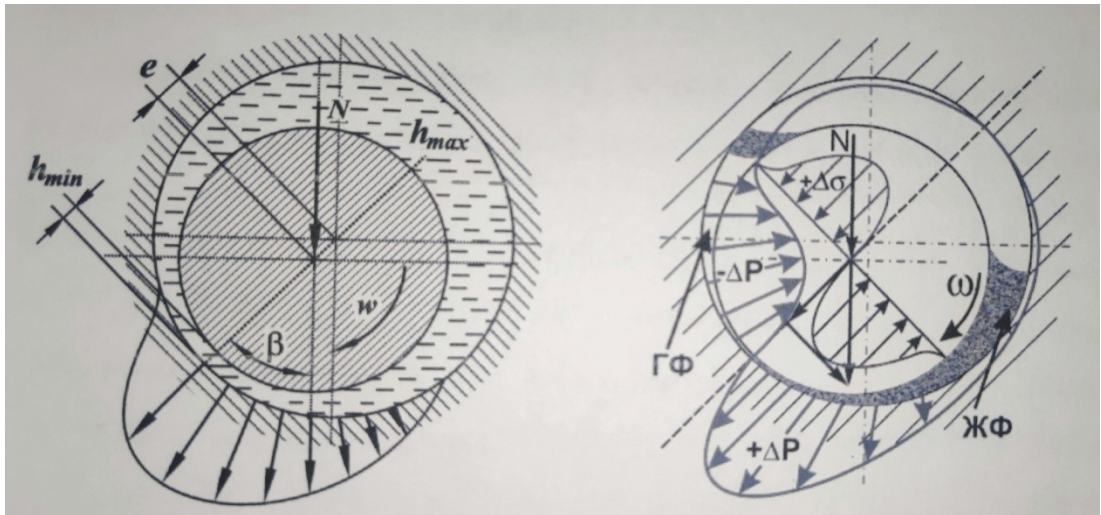


Рисунок 5.3 – Робочі схеми розподілу тиску у граничних шарах радіального підшипника ковзання з позиції ЕГД [3-5] (а) та АГД (б) моделей, де у КО рідка фаза змащування (РФ) знаходиться під надлишковим тиском і ДО газова фаза (ГФ) – у розрідженому стані

Основним положенням АГД моделі являється мимовільне виникнення відносного мінімального зазору кожного елементарного трибоконтакта двох характерних областей. В області зменшення зазору по напрямленню ковзання/кочення, тобто у конфузійній, відбувається підвищення тиску у граничних шарах змащування і виникнення вторинної течії, протилежного

напрямку руху. У цій області при високих швидкостях тертя відбувається між шарами граничного мастила, що набігають з поверхнею, що рухається, і шарами вторинної зворотної течії, викликаного градієнтом тиску у звужуючій зоні трибоконтакту, що являється основним джерелом теплоти.

У дифузійній області відбувається розрідження граничних шарів і зменшення тиску у них відносно тиску навколишнього середовища до значень, рівних і менших тиску насичених парів змащувального середовища. Тут виникає вторинна течія, що направлена з навколишнього середовища до контакту проти руху валу також, як і у конфузійній області. При цьому у дифузійних областях трибоконтактів, особливо при високих швидкостях (0,1 – 10,0 м/с), відбувається порушення однорідності змащувального шару з утворенням маслопароповітряних порожнин пухирцевої кавітації, яка характеризується мимовільним виникненням пухирців та їх схлопуванням у поверхні тертя, що також призводить до їх нагрівання.

Головним критерієм реалізації гідродинамічного та еластогідродинамічного режимів тертя вважається мінімальна товщина змащувального шару, яка повинна перевищувати суму максимальних значень шорсткості поверхонь. Однак, ця величина визначається непрямыми, а косвенними вимірами в динаміці. Крім того, відсутні прямі вимірювання розподілу локального тиску по довжині контакту у змащувальних шарах, які ототожнювались з контактними напругами, що розраховуються по Г. Герцу. Тому мінімальну товщину змащувального шару не слід розглядати як єдиний надійний критерій працездатності трибосистем.

Порівняння основних положень ЕГД, АД і моделей АГД приведенні у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння основних положень моделей ЕГД, АД і АГД

№	Положення ЕГД моделі	Положення АД моделі	Положення АГД моделі
1	Працездатність трибосистеми визначається товщиною змащувального шару/ кількістю змащення, достатнім для забезпечення нерозривності змащувального шару у контакті	Працездатність трибосистеми визначається властивостями вторинної структури/ «третього тіла» і кількістю змащення у трибоконткті, які обумовлюють адгезійні зношування робочих поверхонь	Працездатність трибосистеми визначається ступенем десорбції граничних шарів у дифузійній області контакту, яка залежить від ступеня їх розрідження і обумовлює квазісухе адгезійно-деформаційну взаємодію робочих поверхонь
2	Змащувальний шар у трибоконткті являється однофазною ньютонівською рідиною на протязі усього контакту	Змащувальний шар у трибоконткті являється «третім тілом» у вигляді склоподібної субстанції	Змащувальний шар у трибоконткті не являється однофазним ньютонівським середовищем, а являє собою у конфузорній і перехідній областях контакту маслоповітряного середовища, а у дифузійній – газову порожнину
3	Шар змащення у трибоконткті практично паралельний робочим поверхням у його центральній частині в районі виходу з нього рухомої поверхні	Геометрія змащувальних шарів не розглядається, їх міцність підкоряється закону пружної деформації Гука, а модуль пружності молекул мастила порівнюється з алмазом	Змащувальний шар трибоконткту, що утворився криволінійними поверхнями при стисканні, не паралельний в його центральній частині, а являється адекватним відображенням пружної деформації граничних шарів і зворотно пропорційною напруженням Г. Герца по закону Гука

Продовження таблиці 5.1

4	У процесі тертя напруга у поверхнях трибоконтракту, розраховується по Г. Герцу, рівні тиску у змащувальному шарі	У процесі тертя напруга у поверхнях трибоконтракту, розраховується по Г. Герцу, рівні тиску у змащувальному шарі	У процесі тертя тиск у змащувальних шарах у конфузорній області контакту збільшується, а у дифузорній – зменшується відносно тиску навколишнього середовища. Тиск у змащувальному шарі не ототожнюється з контактними напругами
5	Контактні напруги у робочих поверхнях відповідають розрахунковим значенням по Г. Герцу і відмічається наявність другого максимального тиску (так названий пік Петрусевича)	Контактні напруги у робочих поверхнях відповідають розрахунковим значенням по Г. Герцу	«Контактні напруги», «тиск у змащувальних шарах» і «тиск на тертьових поверхнях» являються рівними параметрами, так як тиск у змащувальному шарі не ототожнюється з поверхневою контактною напругою, визначається по Г. Герцу
6	Мінімальна товщина шару змащення у трибоконтракті вважається визначаючим критерієм його працездатності і знаходиться у діапазоні 0,1 – 1 мкм при герцевському тиску 1ГПа, а час проходження змащення через контакт складає 10^{-3} – 10^{-5} с	Мінімальна товщина шару змащення у трибоконтракті не являється визначаючим критерієм його працездатності	Мінімальна товщина шару змащення у трибоконтракті являється одним із факторів динамічних процесів у граничних шарах (але не визначаючим), що впливає на його працездатність

Кінець таблиці 5.1

7	Сила тертя має гідродинамічну природу (коефіцієнт тертя не більше 0,001), що забезпечує теоретично беззносне тертя	Сила тертя визначається адгезійним (99%) і деформаційним (1%) взаємодіями робочих поверхонь, що ототожнюють зношення	Сила тертя включає в себе гідромеханічну, гідродинамічну і адгезійно-деформаційну складові, що визначають інтенсивність адгезійного зношення
8	Граничні шари характеризуються об'ємними властивостями змащення, що включають в себе кавітаційний зв'язок	Граничні шари розглядаються як рідко-кристалічне трибохімічне активне середовище, без обліку гідродинамічних ефектів	Граничні шари розглядаються, як багатофазні газорідкокристалічні трибохімічні активні середовища з багат шаровою структурою, у якій при терті виникають турбулентність у КО і трибокавітації у ДО

Порівняння основних положень відомих АД і ЕГД моделей тертя в умовах граничного змащування вказує на існування протиріччя у представлених о фізиці процесів, протікаючи у граничних шарах трибоконтакту, і підтверджує спроможність розробленої АГД моделі, що значною мірою усуває ці протиріччя.

6 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ МАСТИЛА

6.1 Мащення підшипників кочення шпindelьних вузлів

Підшипники кочення змащуються маслом або пластичним мастилом. Найбільш поширене пластичне мащення, оскільки в цьому випадку, частіше за все, немає потреби використовувати спеціальні мастильні пристрої. Переваги мащення маслом – інтенсивне тепловідведення.

У підшипниках кочення, так само як і в гідродинамічних підшипниках, на поверхнях ковзання (сепаратор, торці роликів) виникає гідродинамічний несучий шар мастила.

В контактні тіла та доріжок кочення (де виникають значні контактні напруження) також утворюється шар мастила, який розділяє тіла, що взаємодіють, але закон утворення такого шару мастила описується та званою контактнo-гідродинамічною теорією мащення (пружно-гідродинамічною теорією мащення), а сам режим такого мащення скорочено називається ПГД. На формування пружногідродинамічного шару мастила вирішальний вплив мають властиві мастильні матеріали.

Мащення пластичними мастилами. Пластичні мастила мають переважне використання для мащення підшипників, особливо встановлених на вертикальних і похилих валах, оскільки в таких випадках у разі використання пластичного мастила, можна суттєво спростити конструкцію ущільнень. Пластичне мастило має достатні захисні властивості проти проникнення у підшипник забруднення.

Пластичні мастила розрізняються за базовим числом і загусником. Як загусники використовуються металеві мила, наприклад, літієві, натрієві, кальцієві та барієві, а також спеціальні речовини, які викликають набухання, такі як силікагель, глинисті речовини, барвники. Базові масла використовують мінеральні і синтетичні.

Для мащення підшипників шпindelьних вузлів металорізальних верстатів застосовують мастила на основі синтетичних масел з загусниками у вигляді літєвих, барієвих і комплексних мил. Для мащення підшипників шпindelьних вузлів можуть бути використані спеціальні пластичні мастила ЛКС-2, КБС, ВНИИ НП-505 (Старт). Мастило ЛКС-2 має в своїй основі комплексні літєві мила та працездатне до температури 130°C. Їх можна використовувати для мащення кулькових та роликкових підшипників з $dn=5 \cdot 10^5$ мм/хв⁻¹ і навантажених до 1800-2000 МПа.

Мастило КБС за механічною стабільністю переважає ЛКС-2, а за більшістю інших характеристик подібне до нього. Застосовується до температури 110°C. Розраховане на роботу за тих самих частот і навантажень, що і мастило ЛКС-2.

Можуть використовуватись пластичні мастила зарубіжних фірм такі як: SKF Grease LGLT2, Klüber Isoflex NBU 15; Klüber Isoflex LDS 18 ShecA; Esso Veason та інші.

Для роботи на високих частотах обертання не варто заправляти підшипник надто великою кількістю пластичного мастила, оскільки це зумовлює високі моменти тертя на стадії початкового припрацювання і робить період припрацювання небажано тривалим. За даними досліджень у разі заповнення мастилом всього вільного об'єму підшипника середній момент тертя зростає у 5-10 разів у порівнянні з моментом тертя за оптимального мащення. Такі ж результати спостерігаються і у разі заповнення мастилом однієї третини вільного об'єму підшипника на початку випробувань.

Необхідна кількість мастила може бути визначена за формулою:

$$G = f \frac{B \cdot d_m}{1000} \text{ см}^3 \quad (6.1)$$

де f – коефіцієнт, який залежить від діаметра отвору підшипника;

B і d_m – ширина і середній діаметр підшипника, мм.

Шпindelьні вузли сучасних верстатів можуть працювати на протязі багатьох років не потребуючи заміни пластичного мастила.

Термін служби пластичного мастила буде залежати від типу підшипника, кількості мастила, частоти обертання, робочої температури і ефективності системи ущільнень.

6.2 Мащення напрямних ковзання

Для змащення напрямних, що сприяє значному збільшенню їх довговічності, застосовують різноманітні способи. Найпростішим є мащення ручним способом та змащення за допомогою індивідуальних маслянок. Безперервна подача масла може здійснюватись спеціальними роликками, розміщеними у масляних карманах станини за допомогою насоса або з використанням масляної ванни. Для розподілу масла по всій поверхні тертя на напрямних виконують спеціальні масляні канавки.

В'язкість мастила, що використовується для мащення напрямних залежить від умов роботи: характеру змащення, швидкості ковзання, навантаження. Зі збільшенням навантаження та зменшенням швидкості ковзання застосовують масло більш високої в'язкості.

В разі роботи з чистим мастилом для мащення горизонтальних напрямних з малим та середнім тиском рекомендується масла з кінематичною в'язкістю $\nu_{40} = 27...65 \text{ мм}^2/\text{с}$ (більші значення в'язкості для більш важких умов роботи); для високих навантажень доцільні більш в'язкі масла до $\nu_{40} = 100 \text{ мм}^2/\text{с}$.

В разі роботи з мастилом, забрудненим відходами, для мащення горизонтальних напрямних рекомендують масла з в'язкістю: для проточного (бідного) мащення $\nu_{40} = 25...35 \text{ мм}^2/\text{с}$; для верстатів середніх і важких розмірів $\nu_{40} = 40...55 \text{ мм}^2/\text{с}$; для циркуляційного (достатнього) мащення або

мащення з масляної ванни $v_{50} = 30 \dots 45 \text{ мм}^2/\text{с}$; для верстатів середніх і важких розмірів $v_{50} = 45 \dots 65 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Для мащення напрямних прецизійних верстатів найбільш ефективним є застосування антистрибкових масел, які забезпечують найбільш міцну і довговічну плівку, що підвищує точність установлюваних переміщень, значно знижує коефіцієнт тертя спокою.

Індустріальні масла ИНСп-40, ИНСп-65 призначені для змащення середньо навантажених і легко навантажених горизонтальних напрямних, коли потрібно забезпечити рівномірність і точність установлюваних переміщень. Їх використовують для змащування напрямних ковзання і кочення металорізальних верстатів високої точності, верстатів з ЧПК, передач ходовий гвинт-гайка та інших вузлів і там, де необхідно знизити рівень коефіцієнтів тертя в статичних та кінетичних умовах.

Індустріальні масла ИНСп-110 призначене для змащування вертикальних напрямних ковзання і кочення металорізальних верстатів і для горизонтальних напрямних з вертикальними гранями великої площі.

Застосування пластичних мастил для напрямних ковзання верстатів, які піддаються забрудненню, неприпустиме в зв'язку зі збільшенням зносу та утворенням задирок.

6.3 Мащення напрямних кочення

Для напрямних кочення використовують масла і пластичні мастила. Використання масел є більш доцільним, оскільки вони сприяють видаленню забруднення і охолоджуючої рідини. Сила тертя в напрямних за відсутності забруднення мало залежить від кількості ті в'язкості мастила. У більшості випадків слід застосовувати індустріальні масла. Для скорочення

асортименту масел для горизонтальних і вертикальних напрямних можуть застосовуватись масла однієї в'язкості (40...50 мм²/с за 40°С).

Під час роботи напрямних кочення з малими навантаженнями опір руху визначається в основному тертям ковзання. Тому, у разі необхідності знизити тертя спокою, особливо для роликкових опор та голчастих напрямних, доцільно застосовувати анти стрибкові масла серії ИНСп.

В напрямних з надійним захистом можуть використовуватись пластичні мастила, зокрема універсальні середньо плавкі УС-2 і УС-1 ГОСТ 1033-79. Для зниження тертя, зокрема у роликкових опорах, доцільно застосовувати мастила АМС-1 та АМС-3 ГОСТ 2712-78, які мають добрі анти стрибкові властивості.

Таблиця 6.1 – Масла, що рекомендуються для мащення напрямних кочення

Вид напрямних	Особливі умови застосування масел	Марка масла	В'язкість кінематична при 40°С, мм ² /с
Горизонтальні	—	И-30А	41...51
		И-40А	51...75
		ИНСп-40	50...70
	Підвищений тиск, напрямні важких верстатів, горизонтальні напрямні з вертикальними гранями великої площі	И-40А	51...75
		ИНСп-65	100...110
		ИНСп-110	175...200
	Зниження спливання столів	ИНСп-20	18...25 (при 50°С)
Вертикальні	—	И-40А	51...75
		ИНСп-110	175...200
	Підвищений тиск, напрямні важких верстатів	ИНСп-110	175...200

Кінець таблиці 6.1

Горизонтальні і вертикальні	Мащення напрямних маслом з гідросистеми	ИГП-18	24...30
		ИГП-30	39...50
		ИНСп-20	118...25 (при 50°C)
	Загальна для горизонтальних і вертикальних напрямних систем мащення	И-40А	51...75
		ИНСп-65	100...110

6.4 Мащення кулькових гвинтових передач

Для змащування кулькових гвинтових передач використовується мащення пластичними мастилами та мащення маслами. Для пластичного мащення використовуються мастила на базі літєвих мил з кінематичною в'язкістю 30...40 мм²/с. Мінеральні масла використовуються кінематичною в'язкістю 32...140 мм²/с. Масла з низькою в'язкістю доцільно використовувати, коли гвинт працює з високою швидкістю і важливо знизити теплове видовження ходового гвинта. Масла з високою в'язкістю рекомендуються для малих швидкостей гвинта, високих температур, роботі з вібраціями та іншими високими навантаженнями.

Недостатність мастила зумовлює бідне мащення. в той час як надмірна кількість масла веде до підвищеного генерування тепла і зростання опору. Тому важливо визначити оптимальну кількість мастила для конкретних умов роботи. Приблизна кількість пластичного мастила зазвичай береться 1/3 об'єму простору в гайці.

Слід зауважити, що кількість масла залежить від ходу, типу масла, що використовується та умов роботи (необхідно запобігати теплоутворенню).

Використовують мащення таких типів: крапельне, порційне, масляний туман. Пластичний мастильний матеріал використовується, коли використання рідкого матеріалу ускладнено. В невеликих кількостях його закладають у гвинтові канавки гайки.

Ефективні масла з протизадирними присадками, особливо у зв'язку з тим, що у каналах повернення спостерігається тертя ковзання.

Таблиця 6.2 – Рекомендовані об'єми масла для змащення гвинтової передачі

Діаметр вала, мм	16...18	20...25	28...32	36...40
Кількість масла, см ³ (інтервал 3хв)	0,07	0,10	0,15	0,25

7 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗНОШЕННЯ ДЛЯ ОБРАНОГО ТИПУ МАСЛА У ЗАДАНОМУ ТРИБОВУЗЛІ

Зазвичай розглядають питання тертя не залежно від часу, запропоновані моделі процесів фрикційної взаємодії мають квазістатичний характер. У відомі формули коефіцієнту та сили тертя, фактичних площі контакту і тиску, теплофізичних параметрів тертьових та змащувальних матеріалів та ін. факторів часу не входить. Випробування трибо технічних аспектів призвели до необхідності обліку часової характеристики для описання реологічних властивостей контакту. У ряді робіт цей облік виконаний стосовно реології поверхневих шарів тертьових матеріалів та об'ємних шарів змащувальних матеріалів.

У загальному випадку для оцінки реології контакту слід розрізняти шість характерних часових інтервалів, з них чотири – на мікрорівні і два – на макрорівні:

1) середній час існування t_c ділянок фактичного дотику, або середня тривалість елементарного акту контактування:

$$t_c = \frac{l_k}{v} \quad (7.1)$$

де l_k – середня протяжність ділянок фактичного дотику у напрямку ковзання;

v – швидкість ковзання.

Це час найбільш силового і теплового впливу на матеріали у зоні тертя, що зумовлює процеси зношування третього тіла;

2) середній час відпочинку t_0 між двома послідовними ділянками фактичного дотику, або елементарними актами контактування:

$$t_0 = \frac{l_0}{v} \quad (7.2)$$

де l_0 – середня відстань між ділянками фактичного дотику у напрямку ковзання.

Цей час протікання сорбційних хімічних процесів і охолодження до чергового теплового імпульсу, обумовлюючих процеси регенерації третього тіла;

3) середній час t_{II} зношування плівки:

$$t_{II} \approx \frac{h}{v_{II}} \quad (7.3)$$

де h – товщина плівки;

v_{II} – середня швидкість її зношування (у наслідок десорбції, механічного стирання, механічно-хімічних та ін. процесів);

4) середній час t_B регенерації (відновлення) плівки:

$$t_B \approx \frac{h}{v_B} \quad (7.4)$$

де v_B – середня швидкість регенерації (абсорбцією, розтіканням, дифузією, міграцією молекул та ін.);

5) час контакту t_K по номінальній площині:

$$t_K = \frac{l_H}{v} \quad (7.5)$$

де l_H – протяжність у напрямку ковзання зони номінального контакту двох твердих тіл, або номінальний шлях тертя;

6) вільний час t_{CB} між двома послідовними циклами номінального контакту:

$$t_{CB} = \frac{l_{CB}}{v} \quad (7.6)$$

де l_{CB} – шлях до чергового номінального контакту.

Якщо l_{CB} має значення тільки для циклічно повторювальних контактів, то решта часу важливі для контактів довільного характеру. При цьому t_c і t_0 визначаються геометричними параметрами та швидкістю у тангенціальному напрямку, t_H і t_B – геометричним параметром і швидкостями у нормальному напрямку.

Регенерація плівок, як і зношування, характеризується визначеною кінетикою. По мірі збільшення товщини тонкої граничної плівки, тобто числа молекулярних шарів, її змащувальні властивості зростають.

Зношення робочих поверхонь призводить до руйнування плівок на плямах фактичного контакту, а при виході ділянок поверхні з зони безпосереднього контакту відбувається відновлення плівок у наслідок фізичної та хімічної адсорбції молекул з газового середовища (повітря) або мастило (не адсорбційні механізми відновлення у роботі не розглядаються). Динамічна рівновага процесів руйнування та відновлення адсорбційних плівок передбачає нормальну (без задирів) роботу пар тертя. У загальному випадку рівняння рівноваги має вигляд:

$$J_p t_c = J_B t_0 \quad (7.7)$$

де J_p – інтенсивність руйнування плівки, визначається властивостями поверхневих шарів металів та адсорбційних на них плівок, а також умовами навантаження;

t_c – час проходження мікроділянкою поверхні діаметра плями дотику – пружно-пластичними властивостями контактних матеріалів, виглядом контакту і діючими навантаженнями;

J_e – інтенсивність відновлення плівки – фізико-хімічними властивостями матеріалів тіл, складом оточення і характером взаємодії матеріалів з оточенням (або компонентами оточення);

t_0 – час пробігу мікроділянки між двома послідовними контактами – густиною контактів та швидкістю ковзання.

Відношення $\frac{J_p t_c}{J_B}$ визначає той час $t_{необ}$, яке необхідно для повного відновлення адсорбованої плівки. Таким чином, умова атермічного заїдання може бути записана у вигляді:

$$t_{необ} > t_0 \quad (7.8)$$

Для приблизної експрес-оцінки значень t_0 з геометричних міркувань запропонована наступна формула:

$$t_0 = \frac{S}{v} \quad (7.9)$$

де S – середній крок по вершині нерівностей спряженої поверхні у напрямку ковзання;

v – швидкість відносного ковзання поверхні.

Однак, у виразі (7.9) не враховується, що в утворенні плям дотику беруть участь не всі нерівності мікрорельєфу, а лише деяке їх число, що визначається прикладеним навантаженням та фізико-механічними властивостями матеріалів тертьових тіл, крім того, дотик відбувається по січенню профілю, що залежить від сумарної шорсткості спряжених поверхонь, величин зазорів та зближення. Тому для точних випробувань кількісних закономірностей процесу заїдання слід у формулі (7.9) підставити замість S характеристику реального контакту S' (середня відстань між найближчими плямами контакту, виміряне у напрямку ковзання).

Обчислення S' як квадратний корінь з відношення контурної площини контакту до числа утворюючих на ній плям дотику, у яких виведені залежності від контактів шорстких поверхонь:

для пружного контакту

$$S_y^I = v^{-0,5} [8R_{max}^{3v} (\pi r)^{v+2} / b^3] \frac{1}{2(2v+1)} \left(\frac{P_c y}{k_v} \right)^{\frac{1-v}{2v+1}} \quad (7.10)$$

$$S_y^I = 1,41 R a^{0,64} r^{0,36} (P_c y)^{-0,28} \quad (7.11)$$

для пластичного контакту

$$S_n^I = 3,54 \sqrt{R_{max} r / v b^{1/v} (c \sigma_T / p_c)^{\frac{2v}{v-1}}} \quad (7.12)$$

$$S_n^I = 2,57 \sqrt{R_a r} (HB / p_c)^{0,33} \quad (7.13)$$

де R_{max} – найбільша висота нерівностей профілю ($R_{max} = R_{max1} + R_{max2}$);

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю ($R_a = R_{a1} + R_{a2}$);

b і v – параметри опорної кривої ($b = k_v b_1 b_2 (R_{max1} + R_{max2})^{v_1+v_2} / R_{max1}^{v_1} R_{max2}^{v_2}$; $v = v_1 + v_2$);

k_v – коефіцієнт, що залежить від співвідношення v_1 і v_2 ;

y – узагальнена пружна постійна Кірхгофа ($y = 1 - \mu_1^2 / E_1 + 1 \mu_2^2 / E_2$);

μ і E – коефіцієнт Пуасона і модуль пружності третьових матеріалів;

σ_T – межа текучості матеріалів;

c – коефіцієнт, що залежить від форми ділянки що вдавлюється.

Для збільшення часу t_0 потрібно прагнути до підвищення параметрів шорсткості R_{max} та r (рис. 7.1). Це пояснюється тим, що зі збільшенням вказаних параметрів зменшується число виступів, що приймають участь у контакті на тій ж самій контурній площині дотику, отже, має збільшуватись відстань між цими виступами.

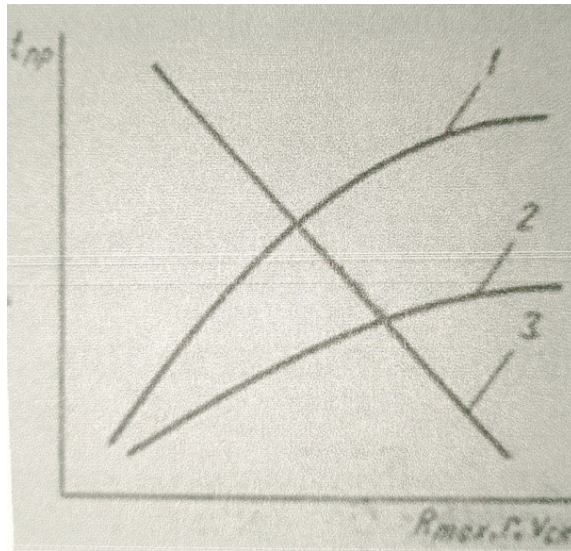


Рисунок 7.1 – Залежності часу вільного пробігу мікроділянки поверхні між послідовними контактами від максимальної висоти нерівностей (1), радіуса кривизни їх вершин (2) та швидкості відносного переміщення (3) поверхонь тертя

Однак при розгляданні впливу шорсткості на задоростійкість слід враховувати і залежність від її фактичних тисків у контакті.

Для пружного контакту:

$$p_r = k(R_{max}/r)^{\frac{v}{2v+1}} \quad (7.14)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від прикладеного навантаження, номінальної площі контакту та фізико-механічних властивостей тертьових матеріалів.

Збільшення висоти нерівностей мікрорельєфу для підвищення t_0 призводить до поліпшення задоростійкості лише до деякої межі, після якої подальше збільшення висоти обумовлює критичні пластичні деформації та використання, що зводять нанівець захисні властивості адсорбованих плівок. У той же час збільшення радіусів кривизни вершин нерівностей сприяє усуненню заїдання як за рахунок збільшення t_0 , так і за рахунок зменшення p_r .

Умова плівкового голодування:

$$v_{и}t_{и} > v_{В}t_{В} \quad (7.15)$$

Плівкове голодування слід відрізняти від масляного (змащувального), хоча в обох режимах умови тертя погіршуються у напрямку від входу до виходу області контакту. Масляне голодування спостерігається при гідродинамічному та напіврідкому режимах змащення застосованого до об'ємних змащувальних плівок. Плівкове голодування спостерігається при граничному змащенні та у відсутності змащувальних матеріалів, що застосовані до тонких плівок на поверхнях.

Розрахункова модель процесу (рис. 7.2) основана на дискретності контакту, тому приймаються такі допущення:

- плівки зношуються на ділянках фактичного дотику і регенерують в проміжках між ними;
- ділянки фактичного дотику близькі за геометричними параметрам і вимогам тертя та рівномірно розташовані у напрямку ковзання.

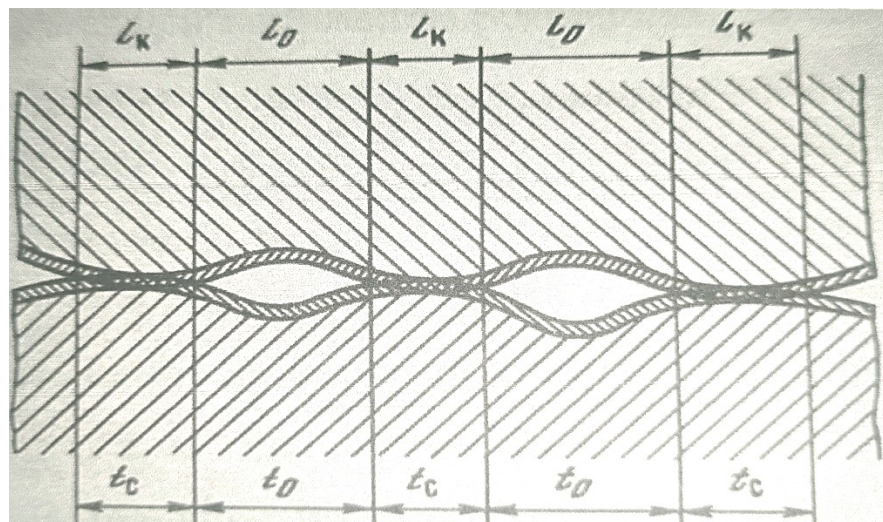


Рисунок 7.2 – Розрахункова модель плівкового голодування

Зазвичай ділянки фактичного дотику розташовані на третьових поверхнях хаотично і розрізняються між собою по геометричним і фізико-механічним параметрам контакту. Наявність на поверхнях хвилястості призводить до групування ділянок дотику у зонах контакту хвиль. Наявність субшорсткості (мікронерівностей другого порядку) ускладнює структуру самих ділянок: вони дискретні і складаються з мікроділянок фактичного дотику, які також дискретні. Тим не менш криві розподіли розміру ділянок дотику, побудовані для різних матеріалів і різних класів шорсткості у роботі і мають ярко виражені максимуми.

Нехай γ – вірогідність контакту через змашувальну плівку. Вони залежать від співвідношення часу відпочинку t_0 і часу регенерації t_B при підвищених швидкостях ковзання або від співвідношення часу зношення t_H та часу існування контакту t_C при знижених швидкостях ковзання. Якщо $t_0/t_B \gg 1$ або $t_H/t_C \gg 1$ то $\gamma \rightarrow 1$, якщо $t_0/t_B \ll 1$ або $t_H/t_C \ll 1$ то $\gamma \rightarrow 0$. Характер плівкового голодування у другому випадку може бути різним: лавиноподібним (1) при $t_0/t_B < 1$ та періодичним (2) при $t_H/t_C < 1$. Відношення t_0/t_B (при підвищених швидкостях) або t_H/t_C (при знижених швидкостях) являється функцією стану фрикційної системи і критерієм напрямку, що протікають в цих процесах. Для аналогічного вираження γ І.А.Буяновським було запропоновано використання формули, що аналогічна рівнянню І.П. Кінгсбюрі для випадку фізично адсорбованої плівки:

при підвищених швидкостях

$$1 - \gamma = \exp\left(-\frac{t_0}{t_B}\right) = \exp\left(-\frac{l_0 v_B}{h v}\right) \quad (7.16)$$

при знижених швидкостях

$$1 - \gamma = \exp\left(-\frac{t_H}{t_C}\right) = \exp\left(-\frac{h v}{l_K v_H}\right) \quad (7.18)$$

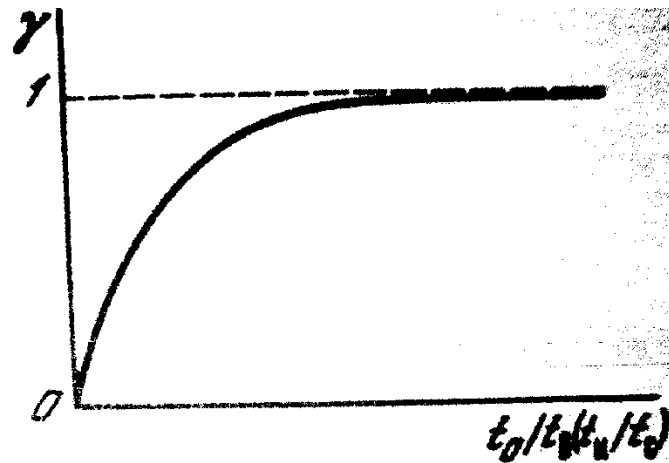


Рисунок 7.3 – Залежність γ від відношення характерних часових інтервалів

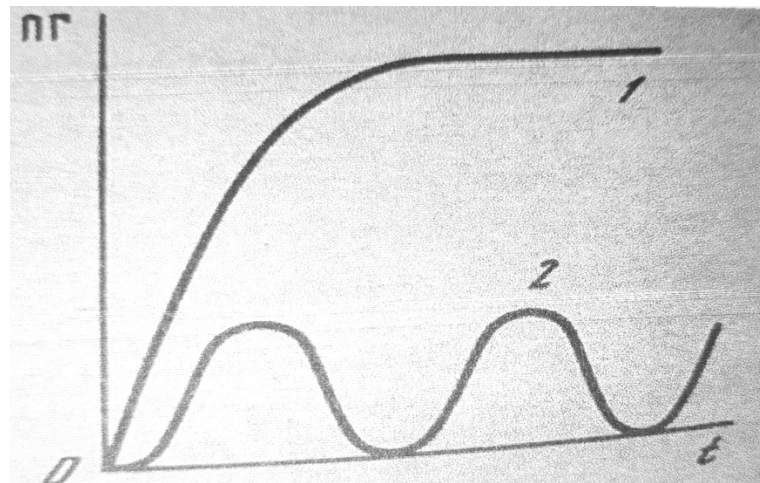


Рисунок 7.4 – Характер плівкового голодування

Зазвичай ділянки фактичного контакту за контуром схожі з еліпсом, більша вісь яких співпадає з напрямком руху. Для розрахунку їх можна прийняти круглими; тоді при пружному контактуванні нерівностей двох шорстких поверхонь, що реалізуються при невеликих навантаженнях або після закінчення припрацювання:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\pi}{v}} r \left[\frac{2\sqrt{\pi}}{k_v} p\theta \right]^{(2v+1)/(v-1)} \quad (7.19)$$

$$l_k = \frac{2r}{\sqrt{v}} \left[\frac{2\sqrt{\pi}}{k_v} \Delta^v p \theta \right]^{1/(2v+1)} \quad (7.20)$$

де r – середній радіус кривизни вершин нерівностей;

v – параметр опорної кривої;

k_v – коефіцієнт, що залежить від v (при $v=2$, $k_v=0,52$);

p – контурний тиск;

θ – узагальнена пружна постійна матеріалів.

Отже $t_u = k_p t_c$: для важкого режиму $0 < k_p < 1$, для легкого $k_p = 1$, але $t_0/t_c = l_0/l_k$, у випадку пружного контактування після припрацювання, отримаємо:

$$\frac{l_0}{l_k} = 0,6p^{-0,4}\theta^{-0,4}\Delta^{+0,2} \quad (7.21)$$

Параметри v_B і v_H залежать від властивостей плівки, що покриває тертьові поверхні. При граничному змащуванні вони визначаються властивостями в основному змащувальних шарів (як тих, які безпосередньо розташовані на поверхні і складається з орієнтованих у полі твердого тіла молекул, так і прилеглих до них неполярних шарів), при сухому терті у атмосфері – властивостями адсорбованих і хемосорбованих плівок (що складаються з молекул газів навколишнього середовища, органічних домішок і т.п.), при терті у вакуумі без змащення – властивостями раніше утворених окисних плівок (що складаються в основному з хімічних з'єднань молекул основного металу та домішок з молекулами кисню).

Тим не менш, спрощено модулюючи контактний взаємозв'язок шляхом обліку основних факторів впливу і нехтуючи другорядними, можна оцінити процеси зношування і відновлення захисних плівок аналітично.

При відновленні рідких змащувальних шарів v_B визначається швидкість розтікання v_p . Розтіканням називають мимовільний перебіг рідини по твердій поверхні, яка виникає за рахунок зменшення вільної поверхневої енергії системи. v_p характеризується при граничному змочуванні похідної крайнього

кута за часом, при повному змочуванні – швидкістю переміщення лінії змочування при зміні змочувальної площини.

При розтіканні води та полярних рідин по металу виникає випередження загальної масу рідини течії тонкого плівкового шару. Товща первинного шару – не більше радіусу дії сил молекулярного тяжіння, а товщина вторинного шару досягає декількох мікрон. Механізм утворення первинного шару двоякий: перенос молекул рідини через газ (парову фазу) і поверхнева дифузія молекул рідини по поверхні твердого тіла.

Розрізняють два режими розтікання: кінетичний, коли опір розтіканню зосереджений біля лінії змащування, та гідродинамічний, коли опір має місце у всьому обсязі що розтікається. Зазвичай розтікання відбувається у перші $10^{-2} - 10^{-3}$ с, тобто за час t_0 , у кінематичному режимі, потім – у гідродинамічному.

Отже маємо наступний вираз:

- при граничному змочуванні

$$v_p = k_0 P_{\text{ж}} (\cos \zeta_p - \cos \zeta_d) \quad (7.22)$$

- при повному змочуванні

$$v_p = k_{\text{п}} (P_{\text{т}} - P_{\text{тж}} - P_{\text{ж}}) \quad (7.23)$$

де k_0 і $k_{\text{п}}$ – коефіцієнти пропорційності;

$P_{\text{ж}}$ і $P_{\text{т}}$ – поверхневі натягнення на межі з середовищем відповідно рідині і твердого тіла;

ζ_p і ζ_d – рівноважний і динамічний краєві кути;

$P_{\text{тж}}$ – поверхневі натягнення на межі твердого тіла з рідиною.

Розрахунок v_p виконано Б.Д. Сумом на основі теорії абсолютних швидкостей реакції. При невисоких температурах:

$$v_p = J l_a \exp \left[\frac{P_{ж}}{n_a k_B T} (\cos \zeta_p - \cos \zeta_d) \right] \quad (7.24)$$

де J – різниця інтенсивностей прямого $J_{пр}$ (адсорбції) і зворотного $J_{обр}$ (десорбції) процесів переносу молекул рідини на поверхні розділу твердого тіла – середовище поблизу лінії змочування;

l_a – середня відстань між центрами адсорбції;

n_a – число цих центрів;

k_B – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура.

Інтенсивність J , вимірюється числом молекул в одиницю часу через одиницю довжини лінії змочування, рівна:

$$J = \frac{k_B T}{k_{II}} z_a \left[\frac{1}{z_{пр}} \exp \left(-\frac{W_{пр}}{k_B T} \right) - \frac{1}{z_{обр}} \exp \left(-\frac{W_{обр}}{k_B T} \right) \right] \quad (7.25)$$

де k_B – постійна Планка;

z_a , $z_{пр}$, $z_{обр}$ – вільні енергії молекул відповідно у активованому (проміжному) та адсорбованому станах і у рідкій фазі;

$W_{пр}$ і $W_{обр}$ – енергія активації прямого та зворотного потоків.

На розтікання впливає шорсткість твердої поверхні. Змащувальні мастила та жирні кислоти на полірувальній сталі утворюють кінцеву крайньої кута, а на шорсткій поверхні – безмежно розтікаються. Теча вздовж канавок виникає швидше, ніж по гладкій твердій поверхні.

Поступове збільшення поверхневої концентрації адсорбованих молекул призводить до насичення адсорбованого шару, який може бути моно- або мультімолекулярним. Зазвичай моно шари адсорбованих утворюють упорядковані островки при низьких степенях насичення і можуть змінювати структуру зі збільшенням ступеня насичення. Товща полі молекулярних адсорбованих плівок по мірі адсорбції може підвищуватись до 40...50 молекулярних шарів, на більшу відстань поле твердого тіла не діє.

Властивості адсорбованих молекул (розподіл електричних зарядів, структура, число ступенів свободи, енергія і т.д.) змінюються до умов двомірного стану. Властивості адсорбованого шару як «колективу» молекул кардинально змінюються у порівнянні з їх властивостями в об'ємних умовах. Рівновага адсорбованого шару досягається в результаті молекулярного обміну з навколишнім середовищем і визначається рівністю швидкостей адсорбції та десорбції.

Поряд з механічним стиранням (продавлюванням) та супроводжуваними фізико-хімічними процесами вважається важливим фактором зношення окисної плівки киснем з навколишнього середовища і маючими у самій плівці. Вуглець у мастилi окислюється, у плівці накопичуються продукти окиснення і серед них жирні кислоти, що прискорюють подальші окиснення. Для плівки касторового масла товщиною $h=0,03\text{мкм}$ при $N=0,5\text{Н}$ і $v=50\text{см/с}$ у атмосфері кисню довговічність становить $t_u=15\text{хв}$, у середовищі азоту – 32хв . Для плівки вазелінового масла при тих же умовах тертя довговічності становила: у повітрі – 9хв , після зниження долі кисню у середовищу до $1,0\%$ - 12хв , після подальшого зниження долі кисню до $0,001\%$ - 23хв .

Зношення і регенерацію плівок можна розглядати як кінетичні процеси, тобто такі процеси, при яких атоми або молекули переходять від однієї стабільної конфігурації до іншої, причому для здійснення переходу потрібно подолати деякі «перешкоди». Ідеї теорії кінетичних процесів в останні часи знайшли застосування для опису не тільки хімічних реакцій, алей й механізмів текучості, руйнування, втомленості і повзучих твердих тіл. Швидкість таких процесів визначається рівнянням Ареніуса:

$$v_B = k_y k_B \exp\left(-\frac{W_B}{RT_B}\right) \quad (7.26)$$

$$v_u = k_u \exp\left(-\frac{W_u}{RT_u}\right) \quad (7.27)$$

де k_y , k_e і k_u – емпіричні предекспоненти;

W_e і W_u – енергії активації процесів відновлення і зношування плівки;

R – універсальна газова постійна;

T_e і T_u – абсолютні температури протікання процесів відновлення (рівна поверхневій температурі у зоні тертя) і зношування (рівна сумі температур поверхонь і спалахів на ділянці фактичного дотику).

У формулі (7.26) k_y враховує втрату працездатності плівки у процесі тертя:

$$k_y = k_{y0} \exp(-k_{y1} c_a) \quad (7.28)$$

де k_{y0} і k_{y1} – константи;

c_a – концентрація у плівки активних молекул.

$$k_{и} = k_{и0} h^{k_1} p^{k_2} v^{k_3} \quad (7.29)$$

де $k_{и0}$ – константа;

k_1 - k_3 – позитивні показники степені;

p – тиск.

По експериментальним даним І.А. Буяновського, для реакцій хімічної модифікації $W_B \approx 55 \div 165$ кДж/моль (досліджувались змащувальні масла з активними присадками сульфол та ЛЗ-23к).

Енергія активації процесу плівкового голодування $W_{ПГ}$ визначається різницею:

$$W_{ПГ} = W_{и} - W_B \quad (7.30)$$

Для відносної швидкості зношення третього тіла $v_{ис}$ (тобто відношення швидкостей зношення у розчині присадки і у базовому маслі), що розглядається як результат швидкостей $v_{и}$ і v_B , отримана формула:

$$v_{ис} = 1 + \frac{k_B c_a^v (k_{и} - 1)}{k_B c_a^v + k_{и}} \left[1 - \exp \left(-k_{и} \frac{k_B c_a^v + k_{и}}{k_B c_a^v + 1} t \right) \right] \quad (7.31)$$

При достатньо великій тривалості тертя t (7.31) спрощується:

$$v_{ис} = 1 + \frac{k_B c_a^v (k_{и} - 1)}{k_B c_a^v + k_{и}} \quad (7.32)$$

При великих c_a залежність $v_{ис}(c_a)$ має екстремум:

$$v_{ис} = \frac{1}{k_B c_a^v} + k_{и} - 1 \quad (7.33)$$

Визначення контакту швидкостей руйнування плівок та їх регенерації являються основною задачею дослідження змащувальних шарів при граничному змащені. Для визначення констант застосовували апарат формальної хімічної кінетики. Згідно їх моделі тертя у вуглецевих змащувальних шарів (мінеральні змащення як продукт переробки нафти), основною хімічною реакцією являється окиснення з участю молекулярного кисню, реакцією – взаємодія металу з присадками. Дослідженні продукти зношення мали вигляд неорганічних з'єднань металу, тому прийнято, що зношення виникає шляхом руйнування вторинних структур (це не завжди так – у визначених умовах тертя зношується безпосередньо метал поверхневих шарів, але відокремлені металеві частинки практично миттєво утворюють у зоні тертя неорганічні з'єднання).

ВИСНОВОК

Проведено аналіз трибоспряжень верстатного обладнання, які потребують найефективнішого мащення. Систематизовано поняття про види зношення трибоспряжень верстатів. Розглянуто існуючі системи мащення верстатного обладнання та проведено аналіз мастильних матеріалів які використовуються для мащення верстатів.

На основі аналізу мастильних матеріалів, запропоновано оптимальний склад мастила для певних трибовузлів верстатів. Розглянуто методику забезпечення уникнення масляного голодування.

Систематизовано методи розрахунку плівкового голодування, визначення величини зношення та розрахунку зношення для обраного типу масла у заданому трибовузлі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Демкін Н.Б. Шорсткість, площі дотику, контактний тиск // Розрахункові методи оцінки тертя і зношення. Підручник. – Брянськ: Приокське книжкове виробництво, 1975. – с.139-151.
2. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Тертя і змащення твердих тіл: Підручник. – М.: Машинобудування, 1968. – 543 с.
3. Подольський Ю.Я., Цуркан І.Г., Корєпова І.В., Самусенко І.В. Зношення при граничному змащенні // Тертя, зношення і змащувальні матеріали: Тр. Міжнар. наук. конф. – Том2. – Ташкент, 22-26 травня 1985. – с. 15-20.
4. Крагельський І.В. Основи розрахунків на тертя і зношення. – М.: Машинобудування, 1977. – 526 с.
5. Стельмах А.У. Адгезійно-деформовані і динамічні процеси у граничних шарах. Повідомлення II. Нові прилади і методи дослідження граничних шарів трибосистем // Проблеми трибології. – Хмельницький: ХНУ. – 2012. – №2. – с. 96-107.
6. Стельмах А.У. Адгезійно-деформовані і динамічні процеси у граничних шарах. Повідомлення IV. Фізична адгезійно-гідродинамічна (АГД) модель тертя і управління працездатністю трибо системи в умовах граничного змащення // Проблеми трибології. – Хмельницький: ХНУ. – 2012. – №4. – с.68-88.
7. Ліпідус А.С., Портман В.Т., Бадинтова. К.М., Косова В.А. Антистрибкові масла для напрямних металорізальних верстатів // Вісник машинобудування. – 1981. - №12. – с. 35-38.
8. Чертавських А.К. Тертя і змащення при обробці металів: Підручник. – М.: Металургвирибник, 1955. – 176 с.
9. Костецький Б.І. та ін. Випробування металів на зношення. – М.: Машгіз. – 1955.

10. Крагельський І.В. Тертя та зношення. – М.: Машинобудування. – 1968. – 314 с.
11. Колектив авторів під ред. д-га техн. наук Д.Н. Решетова. Деталі та механізми металорізальних верстатів: В 2т. – М.: Машинобудування, 1972. – Т 1: Загальні основи конструювання; напрямні і несучі системи. – 664 с.
12. Крагельський І.В., Добичін М.Н., Комбалов В.С. Основи розрахунків на тертя та зношення: Підручник. – М.: Машинобудування, 1977. – 526 с.
13. Келе В.В., Крагельський І.В., Гітіс Н.В. Розрахункова оцінка умов «плівкового голодування» в вузлах тертя при абсорбційному та хемосорбційному механізмі відновлення плівок // Проблеми тертя і зношування. Зб. Випуск 21. – Київ: Техніка, 1982. – с. 3-10.