

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний факультет

(повне найменування факультету)

Металорізальні верстати та інструменти

(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: Вибір складу та властивостей мастильних матеріалів для зменшення інтенсивності зношування трибо спряжень вузлів верстатів

Виконала: студентка 2 курсу, групи Мз-212м

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Металорізальні верстати та системи

---

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ФРОЛОВ М.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний

Кафедра Металорізальні верстати та інструменти

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Металорізальні верстати та системи  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНКИ**

ПАНОВА Марина Сергіївна  
(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Вибір складу та властивостей мастильних матеріалів для зменшення інтенсивності зношування трибоспряжень вузлів верстатів

керівник проєкту доцент, к.т.н. ФРОЛОВ Михайло Володимирович,  
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проєкту 10.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту Креслення та технічні характеристик трибоспряжень металорізальних верстатів. Мастила Солідол С, ЦИТИМ-201, ВНДІ НП-243, ЦИТИМ-203, Літол-24

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Класифікація видів зношування в трибо спряженнях металорізальних верстатах; класифікація мастильних матеріалів які використовуються при експлуатації верстатів; аналіз факторів які впливають на зношування трибо спряжень верстатів; визначення основних до мастильних матеріалів верстатів; аналіз впливу коефіцієнту тертя на інтенсивність зношування при використанні консистентних мастильних матеріалів та запропонування рекомендації з їх використання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількості слайдів, плакатів) презентація



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магісторського проєкту: ...с., 21 рис., 12 табл., 32 джерел.

МАСТИЛО, ТЕРТЯ, ЗНОС, МАСТИЛЬНА ПЛІВКА, ТРИБОСПОЛУЧЕННЯ, В'ЯЗКІСТЬ, ВЕРСТАТ, ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШУВАННЯ

Об'єкт дослідження – вплив складу мастильних матеріалів на коефіцієнт тертя в трибосполученнях металорізальних верстатів.

Мета роботи – проаналізувати вплив складу мастильних матеріалів на інтенсивність зношування трибо сполучень металорізальних верстатів та запропонувати методику планування повного факторного експерименту для дослідження цього впливу.

В роботі розглянуті основні види зносу трибо сполучень верстатів. Розглянуто основні методи боротьби зі зносом механізмів верстатів. Систематизовано різні види мастил в залежності від складу та їх впливу на різні процеси зношування механізмів. Визначені основні режими мащення механізмів верстатів. Проведено аналіз впливу складу та властивостей мастильних речовин на зносостійкість трибосполучень верстатів. На основі літературних даних сформовано матрицю повного факторного експерименту для дослідження впливу складу мастила на інтенсивність зношування механізмів верстатів та отримана регресійна залежність.

## ABSTRACT

Пояснювальна записка до магісторського проєкту: ...с., 21 рис., 12 табл., 32 джерел.

LUBRICANT, FRICTION, WEAR, LUBRICATING LAYER, TRIBOCOUPPING, VISCOSITY, MACHINE, WEAR INTENSITY

The object of the study - influence of the composition of lubricants on the coefficient of friction in tribocouplings of ribocouplings.

The purpose of the work - to analyze the influence of the composition of lubricants on the intensity of wear of tribocouplings of metal-cutting machines and to propose a methodology for planning a full factorial experiment to study this influence.

The work considers the main types of wear of tribocouplings of metal-cutting machines. The main methods of combating the wear and tear of machine tool mechanisms are considered. Different types of lubricants are systematized depending on the composition and their influence on various processes of mechanism wear. The main modes of lubrication of machines mechanisms are defined. An analysis of the influence of the composition and properties of lubricants on the wear resistance of tribocouplings of machine was carried out. On the basis of literature data, a matrix of a full factorial experiment was formed for the study of the effect of the lubricant composition on the intensity of wear of the mechanisms of the machine tools and the obtained regression dependence.

**ЗМІСТ**

## ВСТУП

Трудомісткість ремонту деталей машин значно (в 5 разів і більше) вища, ніж виготовлення нової деталі внаслідок малої механізації процесу ремонту. У зв'язку з цим виникає потреба підвищення зносостійкості деталей машин [1].

Так як тертя визначає основні втрати корисної механічної енергії, а знос є головною причиною заміни обладнання, поглиблене розуміння та ефективне застосування основ трибоніки життєво важливі для збереження енергії та матеріалів у технічній конструкції [2].

Підвищення економічно та екологічно доцільної довговічності та надійності верстатів, технологічного обладнання та інструменту безпосередньо пов'язане з підвищенням зносостійкості. Вирішення цієї актуальної та практично необхідної задачі можливе лише на базі глибоких, науково обґрунтованих рішень [3].

Працездатність деталей та механізмів верстатів при правильній їх експлуатації визначається трьома основними факторами: конструкцією, технологією (якістю) виготовлення та мастилом. Інженерно-технічні працівники машинобудування часто бувають недостатньо обізнаними в науково-теоретичних, а іноді й практичних питаннях мастила, слабо обізнаними в природі мастила і особливостях їх впливу на знос і тертя деталей машин. Недостатнє знайомство з цими питаннями призводить до недооцінки впливу олій на довговічність і працездатність, невміння правильно призначати олію для конкретних випадків експлуатації, і навіть формулювати вимоги розробку потрібного сорту масла [4].

Для підвищення зносостійкості деталей верстатів дуже велике значення має якість мастильного матеріалу [5].

Термін служби верстатів значною мірою визначається зносом вузлів тертя, який у свою чергу залежить від якості мастильних матеріалів. Постійно

зростаючі вимоги до нової техніки, її надійності, довговічності та економічності ставлять завдання значного покращення мастильних матеріалів [6].

Управління тертям, правильний вибір матеріалів з тертя та зносостійкості, раціональне конструювання вузлів тертя та деталей верстатів та оптимізація умов експлуатації може суттєво продовжити термін життя та підвищити ефективність машин, знизити шкідливі екологічні впливи при незначному збільшенні їх вартості [3].

Вся система складних, що залежать від численних факторів явищ і процесів, сукупність яких визначає характер взаємодії масла з поверхнями, що труться, і, отже, його мастильну ефективність, вимагає вивчення шляхом теоретичних і експериментальних досліджень, різноманітних за тематикою і великих по колу питань [4].

# 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

## 1.1 Загальні поняття та положення

### 1.1.1 Зовнішнє тертя та знос

Тертя і знос являють собою дві сторони одного і того ж явища, обумовленого взаємодією тіл, що дотикаються під дією навантаження, що стискає, при відносному переміщенні цих тіл в площині їх дотику. Якщо тертя обумовлює силову характеристику процесу, знос характеризує руйнування поверхонь. Тертя визначає втрати енергії в машинах, знос - довговічність деталей [7].

Зовнішнє тертя твердих тіл - складне явище, що залежить від багатьох процесів, що протікають на межі розділу в зонах фактичного контакту і в тонких поверхневих шарах цих тіл при відносному їх тангенціальному переміщенні. Під силою тертя розуміють силу опору щодо переміщення твердих тіл, спрямовану протилежно цьому переміщенню. Сили зовнішнього тертя неконсервативні, тобто робота сил тертя залежить від відстані, на яку переміщуються тіла.

Зовнішнє тертя супроводжується інтенсивним деформуванням поверхневого шару менш жорсткого тіла більш жорсткими мікронерівностями, що втираються в тіло. Причому не всякий процес деформування поверхневого шару можна назвати зовнішнім тертям, а тільки такий, при якому відносне переміщення твердих тіл у тангенціальному напрямку не супроводжується порушенням суцільності матеріалу, а деформацією його нижче за тонкий поверхневий шар можна знехтувати.

Властивості поверхневих шарів деталі суттєво відрізняються від об'ємних властивостей матеріалу, з якого вона виготовлена.

За кінематичною ознакою відносного переміщення розрізняють тертя ковзання та тертя кочення. Найчастіше один вид тертя супроводжується іншим [1].

За наявності проміжного середовища між поверхнями деталей, що труться, розрізняють сухе, граничне і рідинне тертя.

Кількісною мірою зовнішнього тертя служить сила зовнішнього тертя – сила опору відносному ковзанню, яка лежить у площині дотику двох твердих тіл і є рівнодією елементарних сил тертя, що виникають у зонах контактів між окремими мікронерівностями [8].

Основною характеристикою двох дотичних тіл є коефіцієнт тертя  $f$ :

$$f = \frac{F}{P}, \quad (1.1)$$

де  $F$  – сила опору переміщенню (сила тертя), а  $P$  – сила, що стискає тіла в перпендикулярному до поверхні тертя напрямку.

В даний час точно встановлено, що коефіцієнт тертя рівною мірою залежить від трьох факторів [9]:

- 1) матеріалу тіл, що труться і характеру мастила, плівки, що є на поверхні;
- 2) конструкції фрикційного сполучення: розміру поверхні, геометричного обрису, переважно від співвідношення площ тертя контактуючих поверхонь – коефіцієнта взаємного перекриття;
- 3) режим роботи: температури, швидкості, навантаження, в основному температурного поля, що виникає в тонкому поверхневому шарі.

Коефіцієнт тертя для однієї і тієї ж пари матеріалів, що труться, змінюється в широкому діапазоні; так, для сталі, що третрється по сталі, - від 0,05 до 0,8. Природа матеріалів впливає менше на коефіцієнт тертя, ніж зовнішні умови. На практиці до сполучень, що труться, пред'являються різні вимоги, наприклад, в гальмівних пристроях необхідно щоб був великий і стійкий коефіцієнт тертя, в підшипниках - гранично малий. Стабільність коефіцієнта тертя необхідна у ряді виконавчих органів верстатів-автоматів. У деяких випадках потрібна зміна коефіцієнта тертя від швидкості [9].

Великий експериментальний матеріал показує, що коефіцієнт тертя підпорядковується деяким загальним закономірностям, причому для сухого, граничного та рідинного тертя вони різні. Найважливішими із цих закономірностей є такі [9]:

- при сухому терті у разі пружно-пластичного контакту:

а) зі збільшенням навантаження коефіцієнт тертя падає;

б) зі збільшенням швидкості коефіцієнт тертя переходить через максимальне значення.

в) зі збільшенням розміру поверхні малих поверхонь коефіцієнт тертя зростає.

г) зі збільшенням шорсткості поверхні коефіцієнт тертя зменшується;

- при граничному терті:

а) у зоні малих навантажень із збільшенням навантаження коефіцієнт тертя падає, потім залишається незмінним;

б) при подальшому збільшенні навантаження коефіцієнт тертя може зрости внаслідок переходу граничного тертя в сухе в окремих точках контакту;

в) у разі підвищення швидкості ковзання у зоні малих швидкостей існують залежності двох типів: А – зростання коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості ковзання чи Б – падіння його;

г) у зоні великих швидкостей завжди спостерігається незначне підвищення коефіцієнта тертя. Зі збільшенням шорсткості при терті ковзанні коефіцієнт тертя переходить через мінімальне значення;

- при рідинному терті:

а) із збільшенням навантаження коефіцієнт тертя зростає;

б) зі збільшенням швидкості ковзання коефіцієнт тертя також зростає.

Під зносом прийнято розуміти поступове зміна у розмірах деталі у процесі роботи, викликане дією зусиль, що лежать на поверхні тертя. З визначення видно, що знос - поняття дуже широке і руйнування поверхонь може набувати різноманітних форм, що залежать від переважаючих на поверхнях тертя процесів [7].

Знос - результат зношування, що проявляється у зміні розмірів деталі (зразка) і оцінюється безпосередньо за зміною розмірів або за непрямими ознаками. Знос кожної пари тертя залежить від зовнішніх механічних впливів, середовища, властивостей металів, що труться, і стану їх поверхонь [10].

Знос при терті розвивається при взаємному впливі трьох основних факторів: матеріалів двох сполучених поверхонь і змащення, що знаходиться між ними. Часто до трьох основних факторів приєднується четвертий забруднення мастила сторонніми тілами. Останній фактор суттєво збільшує знос [5].

Основними видами зносу деталей машин (класифікація Б. І. Костецького) є [10]:

- 1) схоплювання 1-го роду;
- 2) окисний;
- 3) тепловий (схоплювання 2-го роду);
- 4) абразивний;
- 5) осповидний (втомний).

Знос схоплюванням 1-го роду - це процес інтенсивного руйнування поверхонь деталей при терті, що виражається в пластичній деформації поверхневих шарів, виникненні місцевих металевих зв'язків на поверхнях, що труться, і руйнуванні їх з відділенням частинок металу або налипанням їх на поверхнях тертя. При цьому виді зносу швидкість процесів, що зумовлюють явище схоплювання, перевищує швидкість інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, і переважає.

Окислювальне знос - процес поступового руйнування поверхонь металевих деталей при терті, що виражається в складному поєднанні явищ адсорбції кисню на поверхнях тертя і дифузії кисню в поверхневих шарах, одночасному протіканні пластичної деформації металу з утворенням хімічно адсорбованих плівок і твердих та відділенням їх з поверхонь тертя. При цьому виді зносу швидкість процесу окислення перевищує швидкості інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, і процес переважає. Даний вид зносу майже не

проявляється при експлуатації металорізальних верстатів і менше всього впливає на їхню працездатність.

Тепловий знос або знос захопленням 2-го роду - це процес інтенсивного руйнування поверхонь деталей при терті ковзання, обумовлений нагріванням зони тертя до температури розм'якшення металу, десорбцією і різкою зміною властивостей змащення. Тепловий знос виявляється у виникненні місцевих металевих зв'язків на поверхнях, що труться, і руйнуванні їх шляхом розмазування, перенесення металу і відділення макрочасток з поверхні тертя. При цьому виді зносу швидкість процесів, що зумовлюють явище захоплення 2-го роду (нагрів, розм'якшення, деформація та контактування ювенільних поверхонь), перевищує швидкість інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, і стають переважаючими.

Абразивне зношування – процес інтенсивного руйнування поверхонь деталей машин при терті ковзання, обумовлений наявністю абразивного середовища в зоні тертя і що виражається в місцевій пластичній деформації, мікроподряпанні та мікрорізанні абразивними частинками поверхонь тертя. При цьому виді зносу швидкість процесу, що зумовлює абразивний знос, перевищує швидкості інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, і процес переважає.

Осповидний знос - процес інтенсивного руйнування поверхонь деталей при терті кочення, обумовлений пластичною деформацією, внутрішніми напруженнями, особливими явищами втоми металу і виражається в утворенні на поверхні тертя мікротріщин, тріщин, одиничних та групових западин. При цьому виді зносу швидкості процесів, що зумовлюють явище втоми металу, перевищують швидкості інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, тому процеси руйнування втоми стають переважними.

Зношування матеріалів - процес руйнування поверхневих шарів тіл, що труться, який призводить до зменшення тіл (зносу) в напрямку, перпендикулярному до поверхні тертя. Інтенсивність зношування пар тертя залежить від властивостей матеріалів деталей, технологічної підготовки поверхонь та їх

якості, а також від умов служби – навантаження, температури, мастила та ін. Різноманітність змін, що виникають у контактному шарі, призводить до різних видів зносу. Вид зношування не можна визначити одним терміном, назва його має містити кілька характеристик. Механізм руйнування поверхневого шару різний. За характером проміжного середовища розрізняють знос при терті без мастила, знос при граничному терті та за наявності абразиву. За характером деформування поверхневого шару розрізняють знос при пружному контакті, пластичному контакті та при мікрорізанні. Таким чином, для характеристики виду зношування доцільно застосовувати три визначення: наприклад, втомний знос при граничному терті при пружному контакті [1].

Зношування - процес поступової зміни розмірів деталі (зразка), що відбувається при терті.

Інтенсивність зношування – відношення зносу деталі (зразка) до обумовленого шляху, у якому відбувалося зношування.

Зносостійкість – властивість матеріалу (або поєднання сполучених матеріалів чи сполучених деталей) чинити опір зношування у певних умовах експлуатації чи випробувань [10].

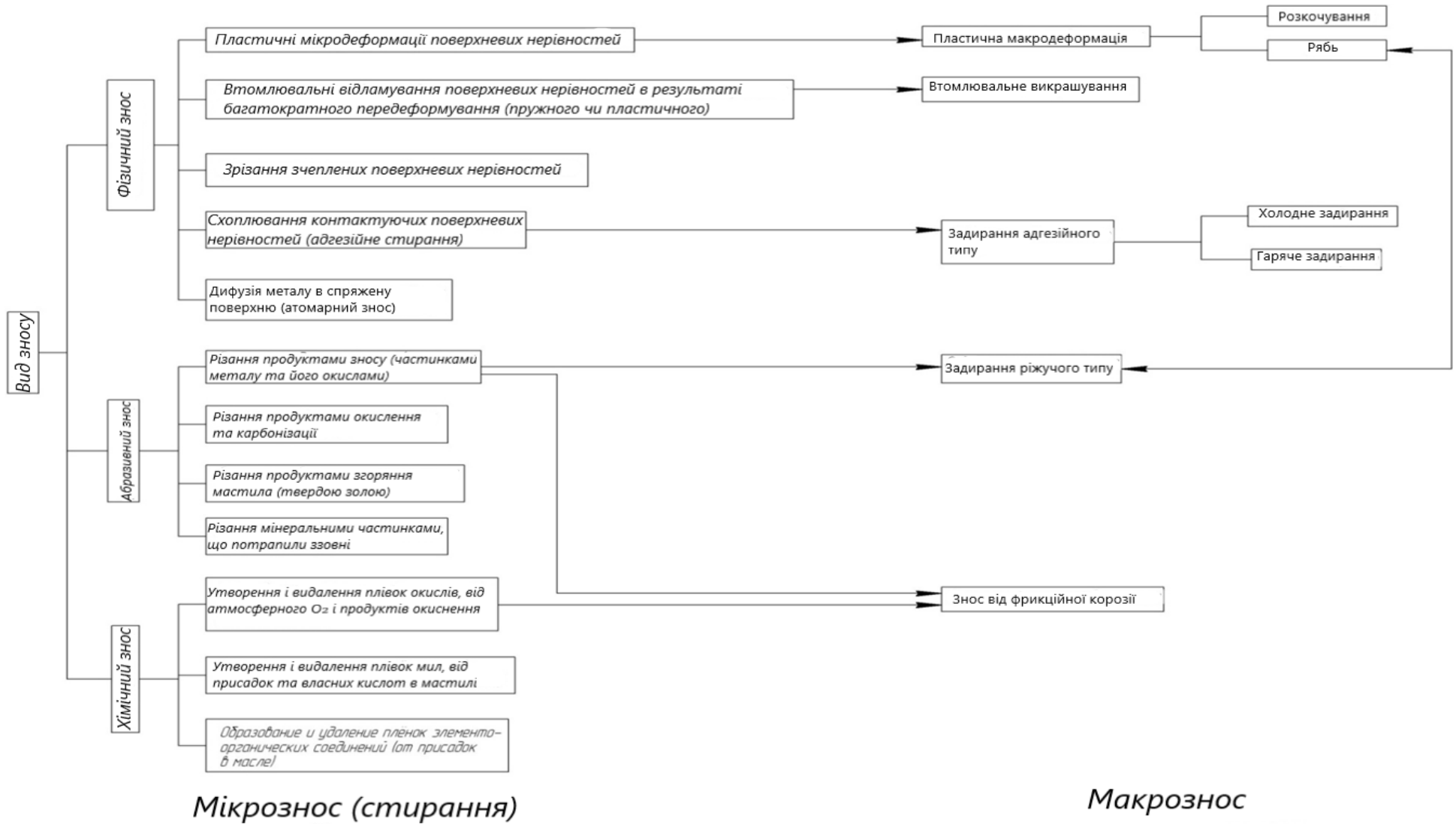
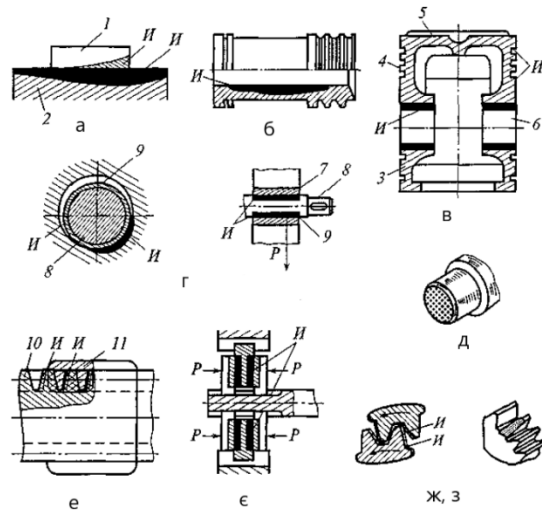


Рисунок 1.1 – Класифікація видів зносу

На рисунку 1.2 приведено приклади деталей та механізмів та характерні для них види зношування, які найчастіше проявляються під час експлуатації верстатів.



а - напрямні; б - внутрішня поверхня циліндра; в - поршень; г, д - вали;  
 е – різьба гвинта та гайки; є - дискова фрикційна муфта; ж, з - зубці колеса;  
 1 - стіл; 2 - станина; 3 - спідниця; 4 - перемичка; 5 - днище; 6 - отвір; 7 - підшипник;  
 8 - шийка валу; 9 - зазор; 10 - гвинт; 11 - гайка; И - місця зносу;  
 P - діючі зусилля

Рисунок 1.2 – Характер зносу деталей верстатів

В результаті зношування напрямних верстатів порушуються їх площинність, прямолінійність і паралельність внаслідок дії на поверхні ковзання неоднакових навантажень. Наприклад, прямолінійні напрямні 2 верстата (рис. 1.2, а) під впливом великих місцевих навантажень набувають увігнутості в середній частині (місцевий знос), а короткі напрямні 1 столу, що сполучаються з ними, стають опуклими.

Циліндри та гільзи поршнів зношуються також нерівномірно (рис. 1.2, б). Зношування відбувається на ділянці руху поршневого кільця і проявляється у

вигляді вироблення внутрішніх стінок циліндра або гільзи. Спотворюється форма отвору циліндра - утворюються відхилення від циліндричності та округлості (бочкоподібність), виникають подряпини, задирки та інші дефекти.

Зношування поршня (рис. 1.2, в) проявляється у вигляді стирання і задирок на спідниці 3, зламі перемичок 4 між канавками, появі тріщин у днищі 5 і розробці отвору 6 під поршневий палець.

Зношування валів (рис. 1.2, г, д) проявляється виникненням різних дефектів: вали стають вигнутими, скрученими, зламаними внаслідок втоми матеріалу; на їх шийках утворюються задирки; циліндричні шийки стають конусними чи бочкоподібними. Відхилення від округлості набувають також отвори підшипників ковзання та втулок. Нерівномірність зносу шийок валів та поверхонь отворів у втулках при обертанні валу – результат дії різних навантажень у різних напрямках. Якщо на вал під час обертання діє лише сила його тяжкості, то зношування з'являється в нижній частині підшипника (рис. 1.2, г).

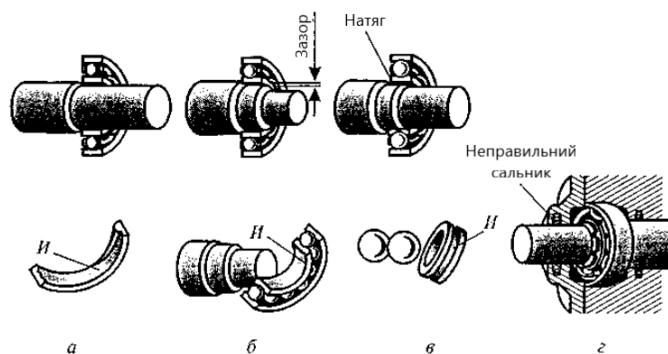
У зубчастих передачах найчастіше зношуються зуби (рис. 1.2, ж,з,): утворюються задирки, зубці змінюють свою форму, розміри та виламуються. Полломка зубів, поява тріщин у спицях, ободі і маточині зубчастих коліс, знос посадкових отворів і шпонок відбуваються з трьох основних причин: перевантаження зубчастої передачі; потрапляння до неї сторонніх тіл; неправильне складання (наприклад, кріплення зубчастих коліс на валу з перекосом осей).

Ходові гвинти мають трапецеїдальну або прямокутну різь. У гвинта та його гайки зношується різь, витки стають тоншими (рис. 1.2, е). Зношування різі у гвинтів, як правило, нерівномірне, так як переважна частина деталей, що обробляються на верстатах, має меншу довжину, ніж ходовий гвинт. Сильніше зношується та частина різі, що працює частіше. Гайки ходових гвинтів зношуються швидше, ніж гвинти. Причини цього наступні: різь гайок незручно очищати від забруднень; гайки у ряді випадків незадостатньо змащуються; у гайки, пов'язаної з гвинтом, беруть участь у роботі всі витки різі, тоді як у гвинта одночасно працює лише невелика частина його витків, що дорівнює кількості витків гайки.

У дискових муфт внаслідок дії сил тертя найбільшому зносу піддаються торці дисків (рис. 1.2, ж); їх поверхні стираються, на них з'являються подряпини, задирки, порушується площинність.

У різьбових з'єднаннях найчастіше зношується профіль різьблення, у результаті збільшується зазор. Це спостерігається в поєднаннях не тільки ходових, але і затискних гвинтів, наприклад у затискних гвинтів кріпильних болтів, що часто відкручуються. Зношування різьбових з'єднань - результат недостатньої або, навпаки, надмірної затяжки гвинтів і гайок. Особливо інтенсивне зношування, якщо працююче з'єднання сприймає великі або знакомінні навантаження: болти і гвинти розтягуються, крок різі та її профіль спотворюються, гайка починає «заїдати». У таких випадках можливі аварійні поломки деталей сполучення. Грані головок болтів та гайок найчастіше зношуються тому, що їх відвертають невідповідними ключами.

У з'єднаннях шпонки зношуються як шпонки, так і шпонкові пази. Можливі причини цього явища ослаблення посадки деталі на валу, неправильний вибір шпонки під паз.



а – в наслідок перекосу; б - при провертанні внутрішнього кільця на валу; в - через надмірний натяг; г - через несправний сальник; И - місця зносу

Рисунок 1.3 - Знос підшипників кочення

У підшипниках кочення внаслідок різних причин (рис. 1.3, а-г) зносу піддаються робочі поверхні - на них з'являються оспини, спостерігається лущення

поверхонь бігових доріжок та кульок. Під впливом динамічних навантажень відбувається їх втомне руйнування. Під впливом надмірно щільних посадок підшипників на вал і корпус кульки і ролики защемляються між кільцями, внаслідок чого можливі перекося кільця при монтажі.

При постійних умовах тертя мають місце три стадії процесу зношування (рис. 1.4): приробіток, період зносу і катастрофічний знос [1].

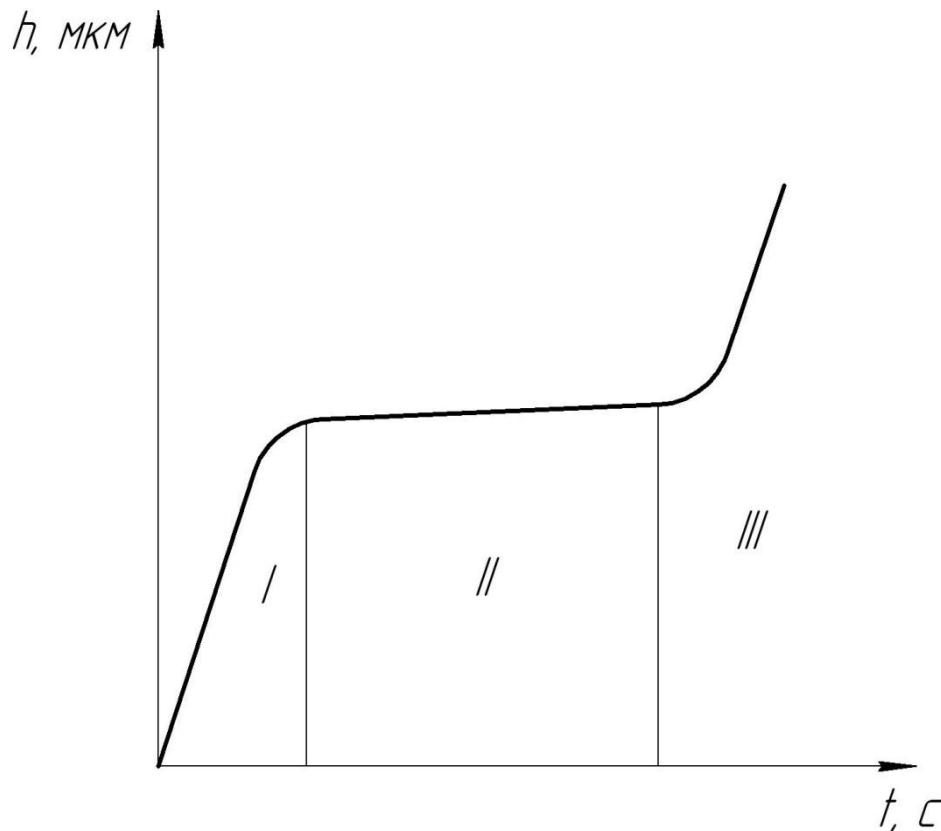


Рисунок 1.4 – Діаграма залежності зносу від часу експлуатації

Процес приробітку (зона I) полягає в тому, що виступи на поверхнях, що контактують, змінюють свою форму, сам матеріал наклепується, і в результаті цих двох процесів – наклепу та зміни мікрогеометрії – створюються умови, що забезпечують пружний контакт.

Після приробітку настає період сталого зносу поверхонь (зона II) - нерівності згладжені, пружний контакт забезпечує мінімальний знос і стійке значення сили тертя. Цей період характеризується мінімальною інтенсивністю зношування для заданих умов тертя.

При настанні катастрофічного зношування (зона III) деталі починають інтенсивно зношуватися, і більше не придатні до експлуатації. Катастрофічний знос найчастіше носить втомний характер.

Перші розрахункові співвідношення враховували вплив лише твердості та навантаження на зносостійкість матеріалу. Однак досліді показують, що не менш важливу роль зношування матеріалу надають пружні властивості матеріалу, режим роботи деталі (навантаження, швидкість, температура), зовнішні умови (мастило, навколишнє середовище) та конструктивні особливості фрикційного вузла [1].

Тертя і зношування обумовлюються взаємодією деталей, що стикаються, які знаходяться під дією навантаження і переміщуються по відношенню один до одного. У практиці спостерігаються найрізноманітніші наслідки взаємного переміщення дотичних тіл, що залежать від властивостей самих тіл (тіла можуть бути м'якими або твердими, пружними або пластичними, з гладкою і шорсткою поверхнею), від характеру їх руху (швидке або повільне, рівномірне або уривчасте) і, нарешті, від зовнішніх умов роботи трибосполучення (навантаження, середовища, властивостей мастила, температур тощо) [10].

З погляду експлуатації верстатів між рідинним та граничним тертям існують такі основні відмінності [4]:

- 1) при рідинному терті знос, як правило, відсутній (в окремих випадках він може відбуватися через шар мастила). При граничному терті знос, зазвичай, має місце;
- 2) при рідинному терті опір зсуву між поверхнями, що труться набагато менше, ніж при граничному терті, оскільки зсув відбувається в масляному шарі. З огляду на це коефіцієнти тертя при рідинному терті на один-два порядки нижче, ніж при граничному;
- 3) термін служби мастила, особливо легованого, при рідинному мастилі буде більше, ніж при граничній, так як в останньому випадку масло працює в термічно більш напружених умовах (через більш високий коефіцієнт тертя), а присадки, що містяться в маслі, значно швидше

виснажуються, оскільки вони входять в реакцію з поверхнями, що труться, набагато інтенсивніше, ніж при рідинному мастилі. До масла, призначеному для роботи в умовах рідинного мащення пред'являють набагато менше вимог щодо його антизносних властивостей, ніж до мастила для граничного мащення

Ідеальний режим тертя характеризується повною відсутністю зносу та мінімальними значеннями коефіцієнтів тертя. Цим умовам найбільшою мірою відповідає режим рідинного тертя, коли поверхні, що труться, розділені шаром масла, мінімальна товщина якого перевищує суму висот найбільших нерівностей обох поверхонь. Беззносний режим тертя може бути забезпечений не тільки в результаті гідродинамічного (або гідростатичного) ефекту, але і в умовах граничного мащення, при використанні олій з досить ефективними присадками антизносу [4].

### 1.1.2 Трибологічні процеси при роботі механізмів верстатів

Загальною особливістю всіх процесів руху є виникнення опору руху, тобто, виникнення тертя того чи іншого роду. Тертя обумовлено фізичними взаємодіями тіл чи об'єктів, які рухаються щодо одне одного. Процес руху чи динамічного поведінки системи загалом піддається збурливим впливам тертя, і деяка частина енергії руху розсіюється. Далі, якщо в динамічній системі один рухомий елемент є твердим тілом, то явища тертя, як правило, супроводжуються зносом, або поступовими втратами речовини робочої поверхні тіла в результаті відносного руху по поверхні [2].

Оскільки зовнішнє тертя обумовлено процесами, які протікають у найтонших приповерхневих шарах і межі розділу твердих тіл у зонах фактичного

контакту, то сила тертя залежить від фізико-механічних властивостей цих приповерхневих шарів. Ці шари відрізняються за своїми властивостями від шарів, що розташовані в глибині [1].

Взаємодія поверхонь при терті має подвійну природу: з одного боку, це механічна дія вершин нерівностей поверхонь щодо один одного шляхом їх стиснення та зсуву при зачепленні, з іншого боку – це фізичний процес тяжіння поверхневих частинок: молекул та атомів. Руйнування поверхонь, зумовлене механічною природою тертя, в першу чергу залежить від механічних властивостей матеріалів поверхонь, таких як міцність і пластичність; руйнування ж у результаті дії сил молекулярного тяжіння визначається величиною цих сил, що залежать від зближення поверхонь або наявності проміжних плівок на них, а також від так званої «спорідненості» матеріалів тіл, що труться. Останнє поняття означає здатність чистих поверхонь матеріалів до злипання (схоплювання) при взаємному торканні [7].

При терті однакових металів перенесені частинки більш ніж у сто разів більші, ніж при різноіменних металах. Підвищення твердості одного з металів уповільнює цей процес. Мастило різко зменшує кількість і розмір частинок, що переносяться [5].

Зношування при терті призводить до зміни речовини в найтонших приповерхневих шарах, що викликається підвищеними місцевими температурами і тисками, ударами механічних домішок, що потрапили в масло, перенесенням частинок металу сполучених поверхонь з однієї на іншу. Стан речовини в приповерхневих шарах відрізняється від стану у внутрішніх частинах деталі. Атоми зовнішніх шарів металу мають підвищену хімічну активність, що є причиною посиленого розвитку схоплювання (прилипання) та взаємного перенесення металів сполучених поверхонь з однією на іншу. Перенесення металу з однієї сполученої поверхні на іншу, що відбувається навіть за наявності шару мастила, супроводжується руйнуванням поверхонь. Це має дуже велике значення. Часто саме цим пояснюється швидкість зносу. Перенесені частинки є окислами або чистим металом [5].

Основні труднощі в пізнанні фізичних закономірностей при зношуванні матеріалів полягає в тому, що при терті поверхневі шари деталей, що труться, схильні до сильного впливу навколишнього середовища при одночасному механічному впливі сполученої поверхні. Облік фізико-хімічних і механічних чинників під час розгляду руйнації поверхневих шарів тіл під час тертя дає підстави розглядати процес зношування як кумулятивний, тобто, підсумовує дію окремих факторів при повторному багаторазовому навантаженні фрикційних зв'язків до відокремлення частки зносу [1].

Якщо між тілами тертя є плівки або шар мастильного матеріалу, необхідно враховувати фізико-механічні та фізичні константи мастильних матеріалів (в'язкість, маслянистість, хімічний склад, температуру застигання, тощо), їх кількість і характер розподілу по поверхні тертя. За наявності у зоні тертя абразивних частинок слід враховувати їх розміри, твердість, кількість [11].

Розглядаючи закономірності зношування при терті, необхідно пам'ятати про основні процеси, що виникають на поверхнях деталей, що труться, а саме: про наявність перегрітих зон при холодній основній масі металу і про молекулярні, хімічні і структурні процеси, що докорінно змінюють якість матеріалів сполучених шарів [5].

### 1.1.3 Способи боротьби зі зносом

Методи та способи боротьби зі зносом у верстатах можна розділити на такі групи: матеріалознавчі; технологічні; конструкційні; експлуатаційні [3].

Матеріалознавчі методи включають спрямований синтез зносостійких конструкційних і мастильних матеріалів, вибір раціональних конструкційних і мастильних матеріалів у вузлі тертя, вивчення та управління процесами, що протікають в матеріалах при зношуванні. При цьому важливо пам'ятати, що

зносоустійкість не є постійною властивістю матеріалу, а проявляється в конкретних умовах і режимах експлуатації, розрізняючись як характером, так і інтенсивністю процесу зношування. Матеріали деталей і вузлів тертя крім зносоустійкості повинні мати комплекс і інші властивостей, що забезпечують надійну роботу конструкції в цілому.

Технологічні способи боротьби зі зносом включають великий арсенал технологічних методів управління зносоустійкими властивостями деталей на етапі їх виробництва; фізико-хімічних, теплових, механічних методів на поверхневі шари матеріалів; методів плакування, покриття, наплавлення робочих поверхонь деталей; модифікування поверхневих структур за допомогою впливу різноманітних фізичних полів і частинок, що несуть високу енергію.

Конструкційні методи забезпечують зносоустійкість на етапі проектування верстатів. Ці методи спрямовані на пом'якшення режимів роботи матеріалів у деталях та вузлах тертя (зменшення температури, навантаження, швидкості); захист деталей, що труться від контакту з абразивним і агресивним середовищем; виключення режимів сухого тертя або роботи в умовах малого мащення; компенсацію зносу деталей; забезпечення рівномірного зношування деталей; виключення катастрофічних видів зношування при схоплюванні та задирці; забезпечення ремонтпридатності деталей та вузлів тертя. Це досягається шляхом раціонального підбору поєднання матеріалів у сполучення, вибору раціональної геометрії та кінематики роботи вузла; заміною опор ковзання на опори кочення; застосуванням різних способів мастила, різноманітних ущільнень, затворів, фільтрів, відстійників тощо; доступністю та простотою обслуговування, ремонту та заміни деталей та вузлів.

При застосуванні виробничих та експлуатаційних способів забезпечення зносоустійкості зносоустійкість виробу забезпечується у процесі його виробництва та реалізується у процесі експлуатації. На етапі створення техніки необхідне точне дотримання технології виготовлення деталей та вузлів тертя відповідно до закладених у проект вимог. У процесі виготовлення контролюються якість поверхонь тертя, відхилення форми деталей, твердість поверхонь,

точність складання, биття, регламентовані зазори і т.д. З метою контролю зносостійких показників проводяться прискорені стендові випробування окремих деталей, вузлів, агрегатів. Дослідні зразки техніки проходять полігонні та експлуатаційні випробування. На цих етапах усуваються можливі недоробки в плані зносостійкості деталей, вузлів, робочих органів машини та регламентуються режими та умови експлуатації машини та її агрегатів.

В умовах реальної експлуатації для забезпечення зносостійкості та збільшення ресурсу необхідне дотримання режимів експлуатації, регламентованих у технічних умовах, правил технічного обслуговування, своєчасне та якісне діагностування стану деталей та вузлів тертя, ремонт та заміна зношених деталей та вузлів, ресурс яких вичерпано.

Правила технічного обслуговування повинні включати періодичність мащення, технічної діагностики та контролю зносу вузлів тертя, періодичності поточних ремонтів та оглядів, карту точок мащення, періодичність заміни та поповнення мастильного матеріалу, марки мастильних матеріалів [3].

#### 1.1.4 Мастильний матеріал, властивості мастила

Мастильними матеріалами називають продукти органічного та неорганічного походження, які вводять між поверхнями сполучених деталей, що знаходяться у фрикційному контакті, з метою зменшити втрати на тертя у цьому поєднанні, запобігти заїданню та знизити знос пар тертя. Мастильний матеріал таким чином, завжди є найважливішим конструкційним елементом вузла тертя, що багато в чому визначає його надійність, довговічність та втрати енергії при функціонуванні цього вузла [3].

Мастильні олії служать для зниження тертя і зносу поверхонь, що змащуються, а також для відведення тепла від поверхонь тертя. Залежно від галузі

застосування олії головною вимогою до неї може бути або зниження зносу, або зниження тертя [7].

Масильна плівка захищає робочі поверхні від інтенсивних молекулярних процесів, що виникають під час тертя. Вона усуває безпосередній контакт металів, охолоджує поверхні, що труться, і забирає шкідливі продукти зносу. Відсутність мастила між деталями, що труться, хоча б на короткий час, призводить до значного погіршення процесу тертя і до підвищених зносів, а іноді і до катастрофічних наслідків у вигляді розплавлення заливки підшипників, поломки відповідальних деталей та ін. На всіх режимах роботи машини і при різних атмосферних умовах змащення має своєчасно, безперервно та в достатній кількості надходити до робочих поверхонь [5].

Дія мастильного матеріалу, в результаті якого зменшується тертя контактуючих тіл та/або знижується їх знос, називається мащенням. Мащення, при якому здійснюється повний поділ поверхонь, що труться, сполучених деталей рідким або пластичним мастильним матеріалом, називається рідиним. Зовнішнє тертя твердих тіл у цьому випадку, як таке, відсутнє, його замінює набагато менше внутрішнє тертя мастильного середовища, що представляє собою шар, що розділяє ці тіла [3].

Призначення мастила полягає в тому, щоб розділити поверхні, що рухаються відносно один одного, плівкою рідини, яка легко зсувається без пошкодження поверхонь [2].

Знаючи особливості та властивості мастил, визначивши умови роботи та оцінивши конструкцію пар, що труться, можна правильно вибрати мастило для конкретного вузла тертя [1].

Умовою реалізації рідинного змащення є існування шару мастильного матеріалу, товщина якого при прикладених навантаженнях перевищує сумарну висоту мікронерівностей сполучених поверхонь. Це може бути забезпечено в результаті надходження рідини в зазор між поверхнями тертя під зовнішнім тиском - так зване гідростатичне мащення, яке здійснюють, наприклад, в опорах і напрямних металорізальних верстатів, особливо важких [3].

Однак у переважній більшості вузлів тертя рідинне мащення, тобто, повний поділ поверхонь тертя, здійснюється під дією тиску, що самозбуджується в шарі рідини при відносному русі поверхонь. Такий режим мащення називається гідродинамічним. Гідродинамічний ефект визначає також еластогідродинамічний режим мастила, при якому характеристики тертя та зношування, а також товщина мастильного шару залежить і від пружних властивостей матеріалів пар тертя, і від реологічних властивостей мастил. Якщо режим роботи вузла тертя не стимулює утворення рідинного мащення, то поверхні від металевого контакту та подальшого катастрофічного зносу та заїдання оберігають тільки граничні мастильні шари, і вузол тертя працює в режимі граничного мащення. При цьому виді мащення антифрикційні та протизносні властивості тертьових сполучень визначаються не об'ємними властивостями мастильних матеріалів, а властивостями граничних шарів, утворених в результаті взаємодії активних компонентів мастильного матеріалу з поверхневими шарами пар тертя.

За агрегатним станом мастильні матеріали поділяються на рідкі (олії), пластичні (пластичні мастила), тверді, газоподібні [3].

Тверді мастильні матеріали являють собою нанесені яким-небудь методом на поверхню тертя тонкі шари матеріалу, що має менший опір зсуву, ніж той, з якого виготовлені деталі, що труться [3]. Пластичні (консистентні) мастила за своїми властивостями займають проміжне місце між твердими мастилами та оліями. В основному мастила складаються з двох компонентів: рідкої основи (мінеральні, рослинні, синтетичні та інші олії) та загусника (тверді вуглеводні, різні солі високомолекулярних жирних кислот – мила, високодисперсні силікагелі та бентоніти, інші продукти органічного та неорганічного походження). Крім того, у своєму складі вони містять присадки, що покращують експлуатаційні характеристики. Нерідко до складу мастил вводять різні наповнювачі: графіт, дисульфід молібдену, порошкоподібні метали або їх оксиди, слюду та ін [1].

Згущувачі, зокрема мила, у процесі приготування мастила утворюють її тривимірний структурний каркас, у комірках якого утримується олія. Завдяки наявності структурного каркаса мастила поведуться при невеликих навантаженнях як тверді тіла (під дією власної ваги не розтікаються, утримуються на похилих і навіть вертикальних площинах), а під впливом критичних навантажень, що перевищують міцність структурного каркасу, вони течуть подібно до олій. Однак при знятті навантаження витікання мастила припиняється, і воно знову набуває властивостей твердого тіла. Це дуже важлива відмінна та переважна особливість пластичних мастил перед рідкими оліями.

Основними перевагами консистентних мастил є:

- здатність утримуватися в негерметичних вузлах тертя,
- працездатність у ширших температурному та швидкісному діапазонах,
- краща змащувальна здатність, вищі захисні властивості від корозії,
- працездатність у контакті з водою та іншими агресивними середовищами,
- економічність.

До недоліків таких мастил слід віднести [1]:

- погану охолоджувальну здатність,
- більш високу схильність до окислення,
- складність подачі до вузла тертя.

Основні характеристики пластичних мастил, за якими можна судити про їх експлуатаційні властивості та керуватися при призначенні для конкретних вузлів тертя [1]:

- 1) межа міцності - це мінімальне критичне зусилля, яке необхідно докласти, щоб відбулася деформація структурного каркаса мастила і почався її рух. Абсолютна величина межі міцності та температурна залежність характеризують здатність мастила утримуватися у вузлі тертя, надходити в зону тертя;
- 2) колоїдна стабільність – здатність мастила під впливом зовнішніх сил утримувати в комірках свого структурного каркасу олію. Колоїдно-

стабільні мастила можуть не виділяти олії при зберіганні та експлуатації тривалий час. Невелике виділення олії з мастила під час її роботи у вузлі завжди корисно, так як це сприяє поліпшенню умов змащування деталей, що труться. Однак надмірно велике виділення олії з мастила (низька колоїдна стабільність) призведе до порушення режиму змащування;

- 3) в'язкість характеризує плинність мастила. В'язкість мастил залежить від температури та умов течії, тобто, швидкості деформації структурного каркаса. З підвищенням температури та швидкості деформації в'язкість мастил зменшується. В'язкість мастила визначає умови її заправки у вузли тертя при низьких температурах, впливає на пускові та моменти зсуву підшипників, також відносно характеризує його прокачуваність по маслопроводах і т.п.;
- 4) водостійкість - здатність мастил не розчинятися у воді, не поглинати її з навколишнього середовища, не змиватися і не змінювати при контакті з нею своїх властивостей;
- 5) несуча здатність змащувальної плівки характеризується максимальним навантаженням, яке може витримати плівка олії, не розриваючись.

Застосування у техніці того чи іншого типу мастильного матеріалу диктується умовами роботи вузла тертя. Так, для змащування двигунів внутрішнього згорання рідкі мастильні матеріали – поза конкуренцією, як і для змащування в умовах циркуляційної системи мащення інших агрегатів. Якщо мастильний матеріал закладається тільки при монтажі вузла тертя або вводиться в нього періодично (змащування підшипників кочення, вузлів тертя шасі та кермового управління, карданних шарнірів тощо), то використовують пластичні мастила. Якщо вузол тертя працює в умовах, коли рідкі або пластичні мастильні матеріали не можуть бути застосовні - при температурах нижчих, ніж температура застигання масел або втрати рухливості мастил, або при тем-

пературах вище граничних температур їх ефективної роботи, в умовах глибокого вакууму та іонізуючого випромінювання, то застосовують тверді мастильні матеріали [3].

Мастильні матеріали незалежно від їх призначення та умов застосування повинні відповідати таким вимогам [3]:

- надійно виконувати свої функції у заданому діапазоні температур, навантажень, швидкостей переміщення;
- мінімально змінювати свої властивості при зовнішніх впливах в умовах експлуатації та зберігання;
- не впливати на контактуючі з ними матеріали;
- не чинити шкідливого впливу на довкілля (екологічна безпека);
- забезпечувати максимальну вибухо- та пожежну безпеку;
- мають бути забезпечені максимально дешевими недефіцитними сировинними компонентами.

Вплив мастил на довговічність і надійність деталей верстатів визначається їх здатністю захищати поверхні, що труться від зносу, забезпечувати необхідні характеристики їх тертя, знижувати втрати на тертя. Тому розглядати вплив мастил на довговічність і надійність деталей верстатів – це означає обговорювати питання їх мастильної дії та впливу на зношування та тертя змащуваних поверхонь конкретних деталей [4].

Мастильна ефективність масла залежить від поєднання численних тісно залежних факторів, що визначають в сукупності характер впливу масла на знос і тертя поверхонь, що змащуються. Одні з цих факторів залежать від властивостей масла, у тому числі від їх змін у процесі експлуатації, інші – від стану та властивостей поверхонь, що труться, у тому числі від їх змін у процесі експлуатації, треті – від характеру взаємодій між компонентами масла, поверхнями, що труться, окисними плівками, що покривають їх, четверті – від швидкості, навантаження, температури та інших параметрів режиму тертя [4].

Взаємодія перелічених чинників має складний, часом суперечливий характер. Додаткові складності вносить мінливість більшості цих факторів внаслідок змінних умов роботи поверхонь, що змащуються, які можуть змінюватися як в межах одного робочого циклу деталі, так і протягом усього терміну її служби. У самому мастилi закладено ряд протиріч. Хоча головне призначення олії полягає у захисті від зносу, з нього, у процесі очищення видаляють майже всі полярно-активні речовини, здатні покращити захист від зносу. В результаті старіння якості олії в цілому погіршується, але при цьому в ньому утворюються нові продукти, що покращують мастильні властивості. Одна й та сама олія поводить себе по-різному залежно від режиму мащення – рідинного або граничного. При переході від одного режиму до іншого вступають у дію різні комплекси його фізичних і хімічних властивостей. Нарешті, масло, що добре захищає від одного виду зносу, може погано захищати від іншого виду зносу і навіть стимулювати його. Мастильне масло слід розглядати як елемент конструкції та конструктори включають вибрані ними сорти масел у специфікації машин, нарівні з іншими покупними виробами [4].

Тертя змащених поверхонь засноване на взаємодії системи метал-мастильне масло-метал, яку можна назвати «тріадою тертя» (за аналогією з «парою тертя», де не враховується мастильний матеріал) [4].

Мастильні масла за принципом виконуваної роботи поділяються на дві категорії [4] (рис. 1.5):

- 1) конструкційні масла, що служать для змащування поверхонь тертя деталей;
- 2) технологічні масла, що застосовуються при обробці металів різанням і тиском з метою мащення та охолодження інструменту та оброблюваного матеріалу.

Конструкційні олії у свою чергу в залежності від умов застосування можуть бути поділені на дві основні групи:

1. Моторні масла – до них відносяться всі види масел для двигунів внутрішнього згорання. Специфічною особливістю моторних масел є

те, що з мастильними властивостями вони повинні мати хороші миючі властивості, тобто, усувати або зводити до мінімуму нагаро- та лакоутворення на нагрітих до високих температур поверхнях, що змащуються.

2. Машинні масла. Призначенням їх є мащення «класичних» деталей машин: зубчастих, черв'ячних та ланцюгових передач, підшипників ковзання та кочення, муфт, кулачкових механізмів тощо. Ці масла характеризуються, по-перше, застосуванням при помірних температурах, лише в окремих випадках температура перевищує  $100^{\circ}\text{C}$ , по-друге, своєю універсальністю, оскільки як об'єкти мащення, так і умови застосування машинних масел відрізняються крайнім розмаїттям [7].

Змащувальна здатність масел при терті визначається різними механізмами, заснованими на двох видах ефектів: об'ємних і поверхневих. Поверхневі ефекти забезпечують граничне мащення; вони визначаються фізико-хімічними та хімічними властивостями масла – його здатністю адсорбуватися на поверхнях тертя та входити з ними у хімічну реакцію [4].

Мастильні характеристики в умовах граничного тертя визначаються будовою та властивостями мастильних шарів, що утворюються на сполучених поверхнях [6].



Рисунок 1.5 – Класифікація масел

Таким чином, мастильна здатність масел ґрунтується на наступних ефектах [4]:

А. При рідинному мащенні (об'ємні явища):

1. В'язкі ефекти:

а) гідродинамічний;

б) гідростатичний.

2. Ефект в'язкопружності.

Б. При граничному мащенні (поверхневі явища):

1. Ефект адсорбції.

2. Ефекти хімічної реакції з поверхнями, що труться:

а) утворення плівок оксидів;

б) утворення плівок активними елементами присадок.

Практично всі важконавантажені вузли тертя верстатів, змащені рідкими або пластичними мастильними матеріалами, в певні моменти (при пуску і зупинці, при високих контактних навантаженнях і температурах, при низьких швидкостях відносного переміщення деталей, що труться, і т.д.) працюють в режимі граничного мащення. Поверхні тертя при цьому не розділені шаром рідини, і безпосередній металевий контакт, що призводить до їх підвищеного зносу та заїдання вузла тертя, запобігає (або принаймні мінімізується) утворенням граничних шарів різного походження на робочих поверхнях пар тертя. Тертя при граничному мащенні супроводжується зношуванням сполучених деталей, причому продуктами зносу можуть бути як продукти взаємодії металу зі змащувальним матеріалом, так і частинки основного металу [3].

Здатність граничних шарів зменшувати втрати на тертя, знижувати знос і запобігати заїданню пар тертя пояснюється такими причинами [3]:

- граничні шари поділяють тертьові поверхні на відстані, що перевищують радіус дії адгезійних сил, або, у всякому разі, забезпечують значне зниження цих сил, оскільки вони різко (у 3-му або 4-му ступені) зменшуються зі збільшенням відстані між твердими тілами. Мастильний шар завтовшки в одну

молекулу вже помітно (приблизно на порядок) знижує тертя сталевих деталей, у той час як зазвичай товщина граничних шарів становить частки мікрметра;

- наявністю анізотропії механічних властивостей граничних шарів.

Найтонші граничні шари здатні, не руйнуючись, витримувати великі нормальні навантаження. У той же час, при відносно невисоких тангенціальних зусиллях у граничних шарах відбувається зсув площин найкращого ковзання;

- активні компоненти мастильного матеріалу, взаємодіючи з поверхнею пар тертя, викликають адсорбоване пластифікування найтонших поверхневих шарів (ефект П. А. Ребіндера), вибіркоче розчинення деяких складових поверхневого шару металу і перенесення їх на відповідну поверхню, що також знижує поверхневу міцність (ефект Д. Н. Гаркунова), тощо.

Завдяки цим явищам, при граничному мащенні зсувні деформації локалізуються в тонкому поверхневому шарі металу, що оберігає нижчі шари, від руйнування [3].

В умовах рідинного тертя мастильні властивості масла залежать тільки від його в'язкості. Всі інші фізико-хімічні властивості (спінюваність, емульгуваність, стабільність) можуть впливати на протизносні та антифрикційні властивості тільки шляхом зміни його в'язкості. В умовах граничного тертя мастильні властивості масла не залежать від в'язкості і повністю визначаються його поверхневими (граничними) властивостями, які у свою чергу залежать від хімічного складу [7].

У практичних умовах одночасно діють різні механізми мащення і в більшості випадків відбувається поєднання об'ємних та поверхневих ефектів (рідинного та граничного мащення), тобто, поверхні, що труться, працюють в умовах напіврідинного тертя [4].

Однією з найважливіших властивостей мастила є його в'язкість. В'язкістю називають опір переміщенню частинок рідини щодо один одного. Чим більше в'язкість, тим менше за той самий час витікає масла через отвір і, отже, менше протікає його по мастильному каналу [5].

В'язкість є найбільш важливою і легко контрольованою фізичною властивістю мастил. З усіх властивостей саме в'язкість визначає можливість створення режиму рідинного тертя поверхонь, що змащуються. Величина в'язкості має також практичне значення, що від неї залежать втрати енергії на збовтування масла в механізмах, витоку через ущільнення, можливість прокачування через маслопроводи і т.п. [7].

Зміни в'язкості залежно від температури – основна властивість мастил. При низьких температурах в'язкість багатьох масел значно підвищується, ускладнюючи подачу мастила до поверхонь, що труться, і збільшуючи опір руху. У цьому випадку пари, що труться, тривалий час працюють при недостатньому надходженні мастила. небезпечна також надмірна втрата в'язкості при високій температурі, тому бажано мати мастило, що має слабку залежність в'язкості від температури. Однак помірне падіння в'язкості при підвищенні температури є корисною властивістю мастила. Від цієї властивості не можна відмовлятися; слід лише її обмежити. Падіння в'язкості мастила при підвищенні температури створює умови, що дозволяють приводити температурний режим пар, що труться, до стійкої рівноваги на невисокому рівні. При підвищенні температури тертьових поверхонь в'язкість масляного шару зменшується, опір течії мастила по вузькому зазору падає, а тому інтенсивність потоку мастила між поверхнями, що труться, підвищується. При цьому посилюється відведення тепла тертя, що створює умови для кращого охолодження поверхонь, що труться [5].

В'язкість мастила також підвищується зі збільшенням тиску. Однак закономірність цієї залежності дуже своєрідна: при малих тисках збільшення в'язкості практично непомітно, при середніх - воно стає помітнішим, а при дуже високих тисках масло твердішає [5].

Застосування мастила, що має підвищену в'язкість, призводить до збільшення втрат на тертя. Крім того, ускладнюється запуск машини і викликається перегрів пар, що труться, на експлуатаційному режимі. Застосування висо-

ков'язких масел при великих швидкостях ковзання призводить до значного перегріву поверхонь, що труться, так як в цьому випадку протікання мастила через вузькі зазори зменшується і, отже, знижується відведення тепла тертя [5].

Малов'язке мастило легше протікає вузькими зазорами, а тому швидше досягає робочих поверхонь після запуску машини, краще охолоджує їх під час роботи і краще забирає продукти зносу. Але при цьому легкість проникнення малов'язкого мастила через вузькі зазори може призвести до падіння тиску в маслопроводі при невеликому зносі ущільнень [5].

Мастильні властивості масел діляться на протизносні та антифрикційні властивості [7].

Під протизносними властивостями мають на увазі здатність масла попереджати або знижувати чотири види зносу, що залежать від мастила: стирання, задирання, викрашування та пластичні деформації (напливи). У разі поганих протизносних властивостей масло не тільки не попереджає, але може навіть стимулювати той чи інший вид зношування. На практиці іноді буває так, що мастило, що добре попереджає один вид зносу, одночасно може прискорювати інший вид. Так, наприклад, масла з хорошими протизадирними властивостями іноді викликають прискорене стирання поверхонь, що труться, або скорочують їх термін служби до початку викрашування.

Під антифрикційними властивостями слід розуміти здатність масел, з одного боку, знижувати коефіцієнти тертя, а, отже, і втрати на тертя поверхонь, що змащуються, з іншого боку, втрати на збовтування масла і видавлювання його із зазорів між змащуваними поверхнями (у тих випадках, коли це видавлювання неминуче впливає з кінематики контактуючих поверхонь, як, наприклад, у зоні зачеплення зубчастих та черв'ячних передач тощо).

Протизносні та антифрикційні властивості масел в умовах граничного тертя залежать від того, якою мірою містяться в ньому полярно активні та хімічно активні речовини здатні утворювати на поверхнях тертя стійкі плівки, що знижують знос та коефіцієнти тертя.

Протизносні властивості мастил характеризуються такими показниками [7]:

- 1) здатність захищати поверхні тертя від стирання - інтенсивністю зношування, яка виражається в зменшенні ваги або розміру деталі, що зношується за одиницю часу, шляху або роботи (наприклад, мг/год);
- 2) протизадирні властивості - максимальним абсолютним або погонним навантаженням або питомим тиском, при яких починається задирання поверхонь, що змащуються при заданій швидкості їх переміщення;
- 3) здатність захищати поверхні тертя від викрашування – числом циклів навантаження змащуваних поверхонь до початку прогресивного викрашування (або числом та розмірами лунок викрашування після заданого числа циклів навантаження, або межею втоми поверхні тертя);
- 4) здатність захищати поверхні тертя від напливів - максимальним навантаженням або питомим тиском, при яких починається пластична деформація поверхонь, що змащуються.

Кількісні значення цих показників повністю залежать від конкретних умов застосування мастила. Антифрикційні властивості характеризуються величиною статичних та кінетичних коефіцієнтів тертя [7].

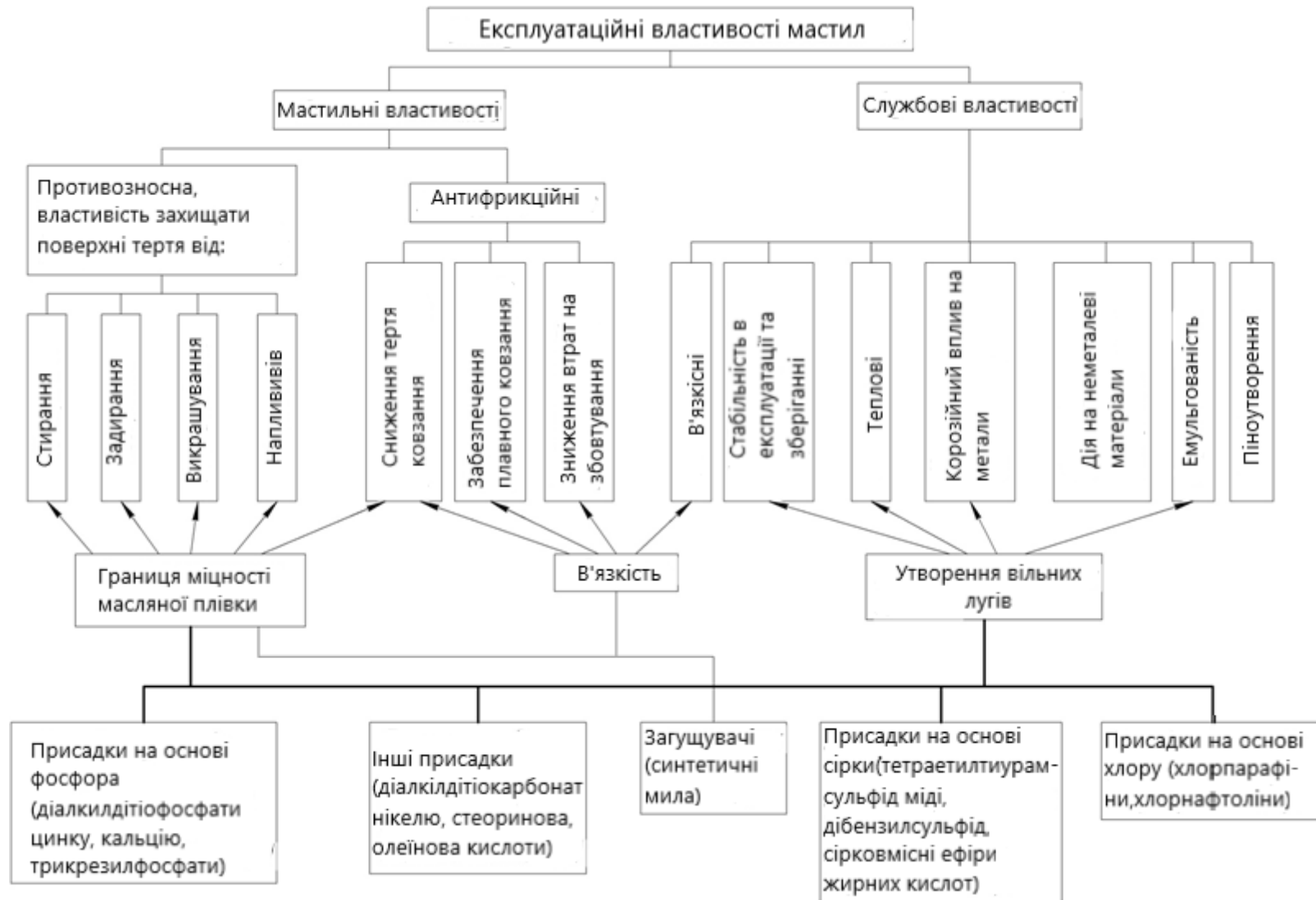


Рисунок 1.6 – Експлуатаційні властивості мастил та добавки, якими вони регламентуються

Експлуатаційні властивості мастил. Мастило в вузлі тертя будь-якого призначення забезпечує зниження тертя сполучених деталей, зменшення зносу і запобігання їх заїданню. Іншою важливою функцією масел є відведення тепла від контактуючих тіл, що нагріваються в процесі тертя, виносення продуктів зносу із зони контакту, а також захист поверхонь тертя та інших елементів конструкції вузла тертя від корозійного впливу зовнішнього середовища. Крім того, мастила ущільнюють зазори між сполученими деталями і видаляють із зони тертя продукти зносу та корозії [3].

Експлуатаційні властивості масел можна поділити на дві групи (рис. 1.6). Перша група охоплює мастильні властивості, тобто, властивості, що характеризують здатність масел забезпечувати працездатність поверхонь, що труться шляхом максимального зниження або попередження всіх видів зносу (зносні властивості) і максимального зниження (або модифікації) тертя (фрикційні властивості). Друга група експлуатаційних властивостей охоплює загальні фізико-хімічні властивості масел: в'язкісні властивості, теплові властивості, спінюваність, стабільність, емульгуваність, корозійність, миючі та інші властивості [4].

Стосовно мастильних властивостей друга група властивостей носить залежний, службовий характер. Тим не менш, ці властивості повинні задовольняти певним нормам, інакше можливі ускладнення в експлуатації верстата, аж до його виходу з ладу, навіть якщо масло володіє найкращими мастильними властивостями. Зважаючи на такий характер властивостей масел цієї групи їх можна назвати службовими (допоміжними) експлуатаційними властивостями [4].

### 1.1.5 Залежність властивостей мастил від складу

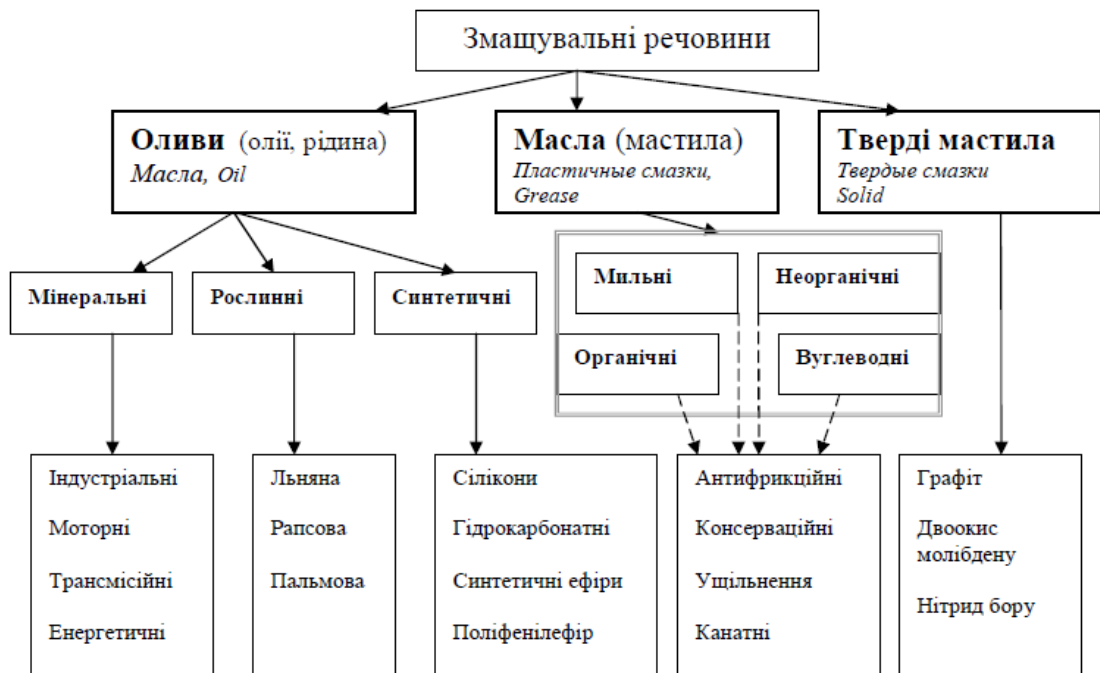


Рисунок 1.7 – Класифікація змащувальних речовин від складу

Хімічний склад змащувальних речовин надає визначальний вплив на властивості мастила і, як наслідок, на їх ефективність при роботі.

Класифікація мастильних речовин від їх складу наведена на рисунку 1.7.

Сучасні рідкі мастильні матеріали (олії) мають масляну основу – базові олії, до яких додають присадки – речовини, введення яких забезпечує підвищення рівня тих чи інших службових властивостей.

Стабільність олії може бути підвищена шляхом застосування присадок. Присадки - це складні хімічні сполуки, які в невеликій кількості вводяться в олію з метою значного покращення її властивостей [5].

Присадки до олій класифікують за різними ознаками: функціональною дією (призначенням), хімічним складом, механізмом дії. Найбільш уживана

перша класифікація, відповідно до якої виділяють групи присадок, що покращують різні властивості олій. Питання застосування присадок в оліях та їх випробувань присвячено багато досліджень [12].

Існує велика кількість різноманітних присадок. Кожна з них виконує певне завдання. Одні з них уповільнюють процес окислення олій, інші запобігають корозії, зменшують лакові відкладення та ін.

Ефективність присадок в оліях різного походження обумовлюється не лише оптимальною концентрацією (а у разі композиції присадок оптимальним поєднанням компонентів), а й температурними умовами експлуатації машин та механізмів, для яких призначена олія [12].

Різні експлуатаційні властивості масел забезпечуються цілеспрямованою корекцією хімічного складу мастильного матеріалу (див. табл. 1.1)

Таблиця 1.1 - Експлуатаційні властивості олій

Властивості	Чим забезпечуються дані властивості	Основні сфери застосування масел
1	2	3
<b>Мастильні властивості</b>		
Антизадирні	Застосуванням антизадирних присадок	Механізми, що працюють при високих навантаженнях та температурах
Антизадирні (при ударних навантаженнях)	Застосуванням антизадирних присадок або високов'язких масел	Механізми, що працюють із ударними навантаженнями
Антистиральні	Застосуванням антистиральних присадок	Механізми, термін служби яких визначається стиранням поверхонь, що труться.
Приробітні	Застосуванням присадок які активують стирання	Опрацювання нових механізмів у початковий період експлуатації
Антифрикційні	Застосуванням полярних присадок чи полярних синтетичних масел	Механізми з низькими к.к.д.: черв'ячні передачі, механізми гвинт-гайка і т.д.
Захист від релаксаційних коливань при терті (забезпечення зростаючої характеристики тертя)	Застосування полярних присадок, що забезпечують збільшення коефіцієнта тертя з підвищенням швидкості ковзання	Напрямні металорізальних верстатів та інших машин із повільними переміщеннями; механізми з фрикційними муфтами
<b>Службові властивості</b>		

В'язкі: високий індекс в'язкості	Застосування масел з парафінових нафт і загущаючих присадок (при малов'язкому базовому маслі)	Механізми, що працюють при значних перепадах температур, при необхідності максимальної сталості в'язкості
----------------------------------	---	---

Кінець таблиці 1.1

Стисність (підвищена)	-	Механізми, що працюють при ударних навантаженнях
Щільність (висока)	Застосуванням синтетичних масел: полігліколевих, полісілоксанових та особливо фторвуглецевих (економічно недоцільно)	Гідродинамічні передачі
Теплові властивості (теплопровідність, питома теплоємність, теплове розширення)	-	Ці властивості у всіх олій розрізняються лише у вузьких межах
Стабільність проти старіння (за високих температур)	Застосуванням синтетичних масел з антиокислювальними присадками	Механізми, що експлуатуються за температур 120-150°C
Спінюваність (низька)	Застосуванням антипінних присадок	Скрізь
Емульгуваність (низька)	Застосуванням антиемульсійних присадок (деемульгаторів)	Механізми, в яких олія може обводнятися (прокатні стани та деякі інші види технологічного обладнання)
Антикорозійні	Застосуванням антикорозійних присадок	Механізми, що працюють у вологій атмосфері або при можливості обводнення олії; за наявності агресивних зовнішніх середовищ
1	2	3
Відсутність впливу на неметалеві матеріали	Застосування олій з пониженим вмістом ароматичних вуглеводнів	Механізми з ущільненнями та іншими деталями з гуми з поганою маслостійкістю
Негорючість	Застосуванням негорючих та малогорючих синтетичних олій або водомасляних емульсій	При експлуатації в умовах пожежної небезпеки
Сумісність із харчовими продуктами	Застосуванням перочищених (медичних) олій	Обладнання харчової промисловості (за можливості забруднення олією готової продукції)
Нетоксичність	Застосуванням присадок, що не володіють токсичністю та неприємним запахом	Скрізь

Розробка олій з хімічно активними присадками дозволила застосовувати деталі машин в умовах, які б призвели до катастрофічних відмов при використанні чистих мінеральних масел [2].

Подаємо у вигляді якісної діаграми (рис. 1.8) зношування різних систем з граничним мастилом. На цій діаграмі показана залежність коефіцієнта зносу  $K'$  (Об'ємний знос/Навантаження $\times$ Шлях ковзання) від навантаження  $F_N$  у логарифмічному масштабі [2].

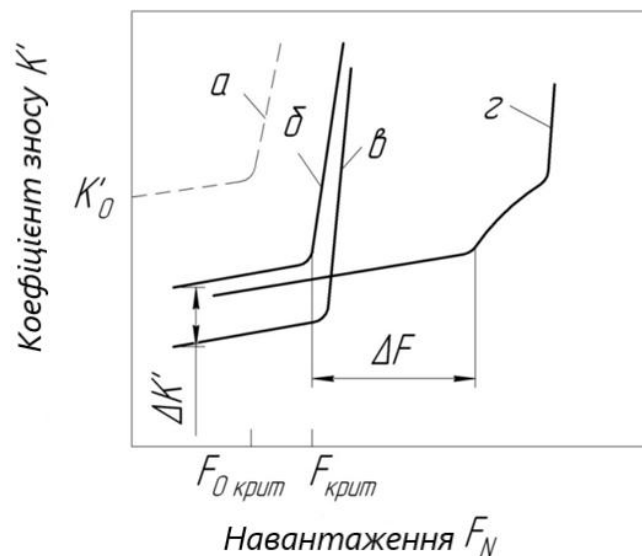


Рисунок 1.8 – Зношування систем з граничним мастилом залежно від навантаження

Крива характеризує зношування системи ковзання метал-метал без мастила. В результаті процесів зношування, що виникають спочатку, встановлюється деяка інтенсивність зношування, що відповідає коефіцієнту  $K'_0$ . Якщо навантаження порівняно мале, то зношені поверхневі шари можуть відновлюватися під дією газового середовища (режим «помірного зношування»). Однак після досягнення певної межі завантаження  $F_{0\text{крит}}$  процес зношування може проникнути у внутрішні шари, приводячи до «сильного зношування» і до зростання інтенсивності зношування  $K'$  на кілька порядків величини [2].

Крива  $\delta$  відноситься до системи, змащеною базовою олією. Вплив хімічних присадок до базової олії може приєднатися до двох різних ефектів [2]:

- 1) зниження коефіцієнта зносу  $K'$  на деяку величину  $\Delta K'$ ;
- 2) підвищенню несучої здатності  $F_{крит}$  на деяку величину  $F$ .

Якщо дія присадки призводить в основному до першого ефекту (крива на рис. 1.8), то її називають протизносною. Найбільш загальнозживані присадки цього типу містять фосфор, подібно діалкілдітіофосфату, трикрезілфосфату або діалкілфосфіту. Органічні карбоксильні кислоти, наприклад, стеаринова, олеїнова та їх ефіри, також є хорошими протизносними присадками. Якщо дія призводить переважно до другого ефекту (крива  $\epsilon$  на рис. 1.8), то вона називається «протизадирною». Найбільш поширені типи протизадирних присадок містять сірку, хлор або те й інше. Типові, що містять сірку присадки, являють собою осернені ефіри жирних кислот, терпени і олефіни або дибензилдисульфід. Найбільш широко застосовуваними хлорсодержащими протизадирними присадками є хлоровані парафіни, що мають у складі до 70% хлору [2].

## 1.2 Фактори, що впливають на зношування трибосполучень верстатів

### 1.2.1 Загальні поняття та положення

Тертя і зношування пари матеріалів є їх внутрішніми властивостями, а визначаються взаємодіями у складі системи. Звідси випливає, що [2]:

- 1) неможливо мати справу з трибонікою у рамках простих уявлень;
- 2) всякий правильний аналіз та розв'язання задач трибоніки вимагають обліку численних параметрів та факторів які впливають на процес;

- 3) отже, «моністичні» спрощені підходи до вирішення завдань трибоніки можуть призвести до грубих помилок, оскільки можна знехтувати або упустити важливі параметри або фактори які впливають на процес.

Класифікація видів зносу по Баруеллу [2]:

- 1) адгезійний знос;
- 2) абразивний знос;
- 3) корозійне зношування;
- 4) поверхневий втомний знос.

Як правило, різні механізми зношування діють одночасно. Процес адгезії та трибомеханічні реакції призводять до змін властивостей поверхонь. В результаті утворюються продукти зношування або матеріал переноситься на інше тіло. Процеси активуються механічною та тепловою енергією, що передається або розсіюється на нерівностях поверхні та в об'ємі матеріалу. Всі ці процеси сприяють утворенню відокремлених продуктів зношування, які породжуються поверхневою втомою і абразивним зношуванням.

Корозійно-механічне зношування відбувається в умовах впливу навколишнього середовища та динамічних впливів між контактуючими тілами та навколишнім середовищем. Якщо дві поверхні активно реагують з навколишнім середовищем, їх тертя у цьому середовищі призводить до безперервного утворення та відокремлення продуктів реакції. Поверхні втрачають матеріал, оскільки він міститься у продуктах реакції.

Внаслідок широкого розмаїття типів зношування неможливо визначити зношування матеріалу по одному окремому випробуванню і знайти однозначні величини зношування [2].

Процеси тертя та зношування суттєво залежать від конструктивного оформлення вузлів, підбору зносостійких матеріалів та ефективних мастильних матеріалів для них, а також умов експлуатації верстату.

Якщо між тілами тертя є плівки або шар мастильного матеріалу, необхідно враховувати фізико-механічні та фізичні константи мастильних матеріалів (в'язкість, маслянистість, хімічний склад, температуру застигання,

тощо), їх кількість і характер розподілу по поверхні тертя. За наявності у зоні тертя абразивних частинок слід враховувати їх розміри, твердість, кількість [11].

На рух і динаміку системи в цілому впливають процеси тертя на поверхнях розділу деталей, що рухаються. Ці впливи трибологічних процесів на динаміку руху можуть бути зовсім різними для різних трибомеханічних систем, наприклад, для кулькових підшипників, напрямних або металообробних систем [2].

Таблиця 1.2 - Вплив різних факторів на знос

Поверхня контакту	Показник ступеня за величиною						
	$P_a$	E	$\Delta$	$\frac{H_B}{R_B}$	f	$\tau_0$	$\alpha_r$
Шорстка без хвилястості неприроблена дешева	1,4-3	0,6-0,7	0,8-4	-	2-10	-	-
Шорстка і хвиляста не-прироблена	1,08-1,4	1,9-9,6	0,8-4	0,16-0,8	2-10	-	-
Прироблена	1	0-4	-	-	2-10	0,5	1-5

У загальному випадку трибомеханічна система складається з таких основних елементів: два контактуючих трибоелементи, мастило між ними та навколишнє середовище (атмосфера). Також істотно впливають умови, в яких працює трибосполучення.

Мастильний матеріал повинен вибиратися для кожного вузла та механізму, виходячи і його конструкції та умов роботи [7].

При великих навантаженнях і швидкостях довговічність деталей верстатів визначається як якістю матеріалу, з якого виготовляють деталі, і якістю технології їх виготовлення, а й у значною мірою якістю виготовлення мастила, правильністю вибору мастила і присадки для реального вузла тертя [12].

Наступні властивості елементів мають основний вплив на трибологічну поведінку системи [2]:

1. Властивості трибоелементів у контакті. Трибологічні властивості цих елементів можна поділити на «об'ємні» та «поверхневі»:
  - 1) об'ємні властивості – геометрична форма, хімічний склад та металургійна структура, параметри матеріалів, включаючи модуль пружності, твердість, щільність, теплопровідність;
  - 2) поверхневі властивості:
    - а) топографія поверхні:
      - Параметри шорсткості поверхні ( $\Delta$ );
      - крива розподілу профілю (хвилястість поверхонь  $\frac{H_B}{R_B}$ );
      - автокореляційна функція профілю;
      - статистичні параметри поверхні;
    - б) склад поверхні:
      - забруднення;
      - фізично адсорбовані шари;
      - хімічно адсорбовані шари;
      - плівки оксидів;
      - механічно зміцнені шари.

З іншого боку, властивості контактуючих матеріалів можна розділити на пружні (модуль пружності), міцності (межа міцності на розрив  $\sigma_0$ , параметр фрикційної втоми  $t_y$ , ін.) та фрикційні (коефіцієнт тертя  $f$ ).
2. Властивості мастила. Головними відповідними властивостями мастила є в'язкість та її залежність від температури та тиску, а також хімічний склад мастила.
3. Властивості атмосфери. Головними властивостями атмосфери є її хімічний склад, кількість та тиск окремих складових, особливо парів води.
4. Зовнішні умови роботи трибосполучення. Найбільш характерною робочою змінною трибомеханічною системою є тип відносного руху між трибоелементами в контакті. Основні типи рухів такі:

- ковзання;
- кочення;
- обертання;
- удар.

Будь-який відносний рух двох тіл можна подати у вигляді суперпозиції цих чотирьох основних типів руху. На додаток до завдання типу руху необхідно вказати його залежність від часу. Воно може бути, наприклад, безперервним, коливальним, зворотно-поступальним і уривчастим. Іншими робочими змінними є такі величини:

- 1) питоме навантаження  $P_a$ ;
- 2) швидкість  $V$ ;
- 3) температура  $T$  та температурний градієнт;
- 4) пройдений шлях  $S$ ;
- 5) тривалість роботи  $t$ ;
- 6) молекулярна дія на контакті в умовах тертя (мастила, досконалості очищення поверхонь, навколишнього газового середовища та параметрів, що характеризують її стан).

У деяких трибомеханічних системах ці фізичні робочі змінні доповнюються матеріальними входами, наприклад витратою мастила. Можливі також деякі збурюючі входи, наприклад, вібрація і випромінювання [2].

### 1.2.2 Вплив на знос різних факторів

Як говорилося вище, знос трибосистеми залежить від безлічі різних чинників, які до того ж складно корелюють один з одним. У цьому підрозділі опишемо вплив цих чинників окремо і залежно один від одного.

### 1.2.2.1 Вплив властивостей трибоелементів у контакті.

Модуль пружності матеріалу значно впливає інтенсивність зношування матеріалу, причому для матеріалів з однаковою міцністю на розрив збільшення його веде до збільшення інтенсивності зношування. Показник ступеня при модулі пружності змінюється в найбільш широких межах і має найбільше абсолютне значення. Більший інтервал зміни показника ступеня відповідає контакту шорсткої поверхні без хвилястості, а більше абсолютне значення цього показника має місце для шорсткої та хвилястої поверхні (див. табл. 1.2). Однозначний зв'язок між модулем пружності та інтенсивністю зношування експериментально встановити важко. Властивість недосконалої пружності враховують коефіцієнтом гістерезисних втрат  $\alpha_r$ , знання якого важливе для прогнозу зношування припрацьованих поверхонь [1].

Шорсткість і хвилястість поверхні негативно впливають на коефіцієнт тертя і величину зносу при роботі трибосистеми – чим вони більше, тим інтенсивніше проходить знос до настання рівноважної шорсткості в процесі приробітку, після чого ці параметри практично не впливають на зношування пари тертя.

Збільшення абсолютних значень властивостей міцності трибосполучення завжди позитивно впливає на зносостійкість - чим більше  $\sigma_0$ , тим міцніше матеріал при одноразовому розриві, і чим більше  $t_y$ , тим більша кількість циклів потрібна для відділення частки зносу.

Інтенсивність зношування також сильно залежить від коефіцієнта тертя, і ця залежність приблизно однакова як неприроблених, так прироблених поверхонь, тому коефіцієнт тертя доцільно використовувати для характеристики інтенсивності зношування  $I$  [1].

### 1.2.2.2 Вплив мастила

Мастило є найбільш важливим засобом впливу на процеси перенесення енергії та матеріалів у трибомеханічних системах, зниження тертя та зменшення зношування. Будь-яке порушення режиму мащення чи втрата його працездатності має неприємні наслідки для трибомеханічної системи. Таким чином, крім розуміння механізмів змащування, потрібно мати уявлення про процеси та фактори, що визначають можливі «межі» його працездатності [2].

Збільшення кількості мастила у певних межах, зазвичай, позитивно впливає знос так як рідинний режим мастила кращий для машин, тому що в цьому випадку знос і втрати на тертя мінімальні. Товщина мастильного шару має перевищувати сумарну висоту нерівностей двох сполучених поверхонь. Наявність мастила значно ускладнює процес утворення оксидів, проте мастило сприяє посиленому розвитку хімічних і механічних процесів [5]. За такого режиму зовнішнє тертя твердих тіл перетворюється на внутрішнє тертя мастильного шару. Відомі два напрями організації рідинного тертя: гідродинамічна і гідростатична мастила. Можливість реалізації гідродинамічного (або контактно-гідродинамічного) ефекту визначається в'язкістю масла, геометрією контакту і режимом навантаження – швидкістю і навантаженням. Гідростатичне мащення використовуються тих випадках коли необхідну несучу здатність за рахунок гідродинамічного ефекту отримати не вдається (малі швидкості, великі навантаження тощо). У цьому випадку тертьові поверхні поділяються мастилом, що подається під тиском від зовнішнього джерела [13].

Залежно від товщини плівки мастила (від десятих часток міліметра до кількох нанометрів), розподілу висот нерівностей у плівці мастила та ступеня геометричного прилягання можна виявити різні режими мщення.

У період 1900-1902 р.р. Штрибек провів великі експерименти з тертям підшипників ковзання та кочення. Він виміряв коефіцієнт тертя залежно від навантаження  $F_N$ , швидкості  $V$  і температури  $T$ . Щоб виключити вплив на результати залежності в'язкості від температури, Штрибек перерахував і виміряв

коефіцієнт тертя функції навантаження і швидкості при постійній об'ємній температурі масла 25°C [2].

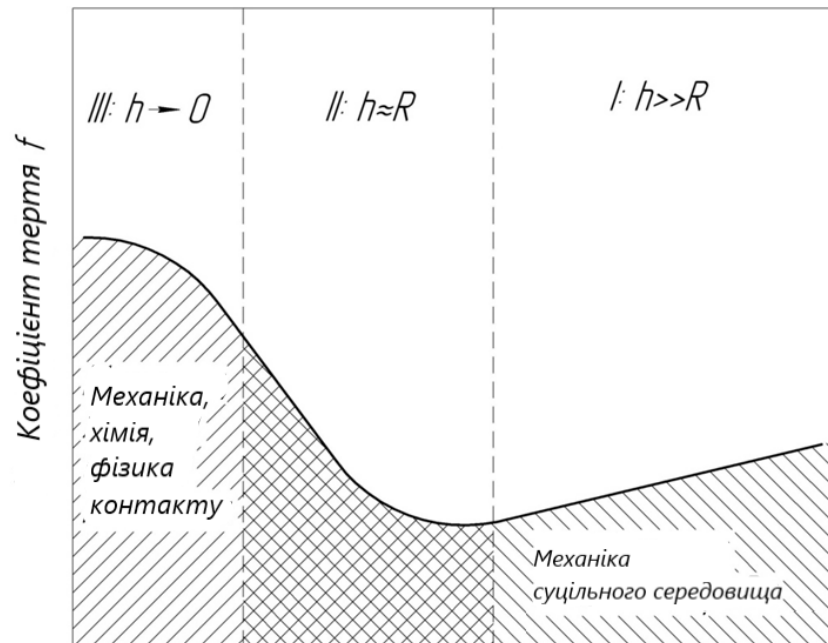


Рисунок 1.9 – Крива Штрибека та режими мащення

Крива Штрибека (рис. 1.9) представляє загальну характеристику змащених поверхонь, що рухаються в залежності від динамічної в'язкості мастила  $\eta$ , швидкості  $V$  і нормального навантаження  $F_N$  (або тиску  $P$ ). Залежно від форми поверхонь тертя, матеріалів, робочих умов та проміжку  $h$  між поверхнями можна виділити три головні режими мащення [2]:

- I. Гідродинамічне мащення (або пружногідродинамічне, ПГД).
- II. Часткове ПГД-мащення, або змішане.
- III. Граничне мащення.

У режимі I тверді поверхні розділені безперервною плівкою мастила, товщина якої багато більше міри  $R$  шорсткості поверхонь. Опір руху обумовлено внутрішнім тертям мастила. У цьому режимі трибологічна поведінка системи визначається реологією мастила і може бути розрахована або оцінена методами механіки рідин. Так як у режимі I немає прямих фізичних контактних взаємодій між поверхнями, то процеси зношування відсутні (крім поверхневого втомного зношування, кавітаційного зношування або рідинної ерозії).

Якщо в умовах гідродинамічного або ПГД-мащення знижується в'язкість мастила або швидкість, або зростає навантаження, то плівка мастила стає «тоншою» і зазор між поверхнями зменшується. Коли з'являються перші контактні взаємодії нерівностей, виникає режим II часткового ПГД-мащення, або змішаного мащення. У цьому режимі навантаження сприймається частково плівкою рідини, частково нерівностями поверхонь, що контактують. Отже, в цьому режимі опір тертя складається в основному з опору зсуву плівки і частково взаємодій нерівностей.

Якщо умови роботи мастильної системи в режимі II на рис. 1.10 зсуваються вліво по кривій Штрибека, то кількість взаємодій зростає, а товщина плівки зменшується до кількох мономолекулярних шарів і менше. У режимі III граничного мащення об'ємні реологічні властивості речовини мастила стають менш важливими, а навантаження майже повністю сприймається деформацією нерівностей. Очевидно, що в режимі III фізико-хімічні взаємодії на поверхнях розділу тверде тіло-рідина-тверде тіло визначають характер тертя та зношування в системі.

У процесі гідродинамічного мастила трибомеханічної системи між поверхнями, що рухаються відносно один одного, утворюється безперервна плівка рідини, що мінімізує тертя і виключає зношування. Трибологічна поведінка гідродинамічно змащеної системи в основному визначається двома такими особливостями [2]:

- 1) опір руху задається «внутрішнім тертям» рідини, тобто, опором зсуву чи «в'язкістю» рідкої плівки;
- 2) зношування виключається, якщо форма поверхонь така, що несучий тиск, що встановлюється в плівці мастила при русі поверхонь призводить до повного поділу поверхонь.

Недолік мастила істотно впливає на пружно-гідродинамічні характеристики системи.

Пояснення режиму змішаного мащення засноване на припущенні про те, що повне прикладене навантаження сприймається частково гідродинамічною

дією плівки мастила та частково контактами нерівностей. Отже, повна сила тертя складається з в'язкого тертя та тертя у контактах нерівностей.

Режим мастила в крайній лівій частині кривої Штрибека називається граничним мащенням. Робота трибосполучення в цьому режимі характеризується такими особливостями [2]:

а) тверді поверхні розташовані настільки близько одна до одної, що між нерівностями існує помітний контакт;

б) гідродинамічні явища та вплив об'ємних реологічних властивостей мастила малі чи несуттєві;

в) трибологічна поведінка визначається поверхневими взаємодіями між тонкими шарами граничних мастил та твердими поверхнями.

Внаслідок цих особливостей процеси, що визначають трибологічну поведінку твердих поверхонь, мають місце і в умовах граничного мащення, а саме [2]:

- 1) механіка контакту, процеси пружної та пластичної деформації поверхонь;
- 2) фізика та хімія контакту, дія поверхневих сил;
- 3) процеси тертя, особливо зрізання адгезійних сполук та деформація нерівностей;
- 4) процеси зношування, які в загальному випадку включають поверхневу втому, стирання, адгезію та трибохімічні реакції.

Всі ці взаємодії між твердими тілами видозмінюються під дією граничного мащення, тому трибологічна поведінка системи з граничним мащенням визначається процесами на поверхнях розділу тверде тіло-рідина-тверде тіло, на які впливає навколишня атмосфера. Порівняння режиму граничного мащення з іншими режимами на кривій Штрибека та сухим контактом показує його особливу складність через вплив безлічі взаємодій та параметрів [2].

Розглядаючи дію граничного мащення, зауважимо, що його основне призначення полягає у створенні між поверхнями, що рухаються, плівки, здатної зменшити число прямих взаємодій твердих тіл і що володіє малим опором

зсуву. Найкраще це завдання вирішується за допомогою проміжної плівки з довгих молекулярних ланцюгів, що мають такі властивості [2]:

- а) міцне зчеплення ланцюгів, що перешкоджає проникненню нерівностей поверхні (і тим самим зменшує зношування);
- б) мала міцність на зріз, що забезпечує низьке тертя;
- в) висока точність плавлення, що забезпечує тверду захисну плівку до високих температур.

Збільшення в'язкості масла збільшує міцність масляної плівки на зсув, і, оскільки плівка між трибоелементами внаслідок цього утворюється легше і руйнується за більш важких умов, ніж плівка малов'язкого масла, тертя, як правило, проходить здебільшого всередині масляного шару, що суттєво зменшує зношування трибоелементів.

Найвигіднішим з точки зору забезпечення рідинного мащення буде в'язка олія. Воно вигідніше також і в умовах граничного тертя, оскільки при граничному терті зі збільшенням в'язкості зменшуються коефіцієнти тертя. Щоб звести до мінімуму стирання та попередити задирання, слід застосовувати для мащення олії якомога більшої в'язкості [7].

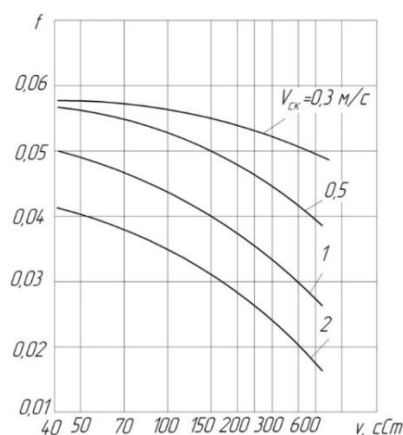
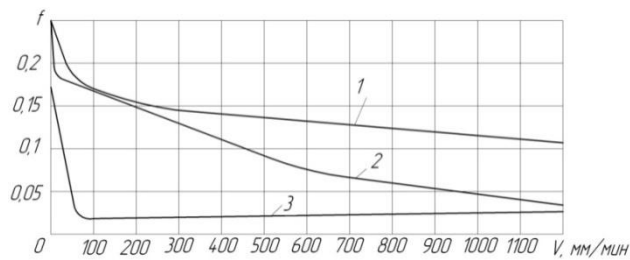


Рисунок 1.11 – Вплив в'язкості олії на коефіцієнт тертя ковзання ( $P_{\max}=83,3$  кН/см<sup>2</sup>,  $V_{\Sigma k}=1100$  см/с)

При швидкостях ковзання в контакті менше значень, що відповідають максимальному коефіцієнту тертя, зміна в'язкості масла не викликає суттєвої

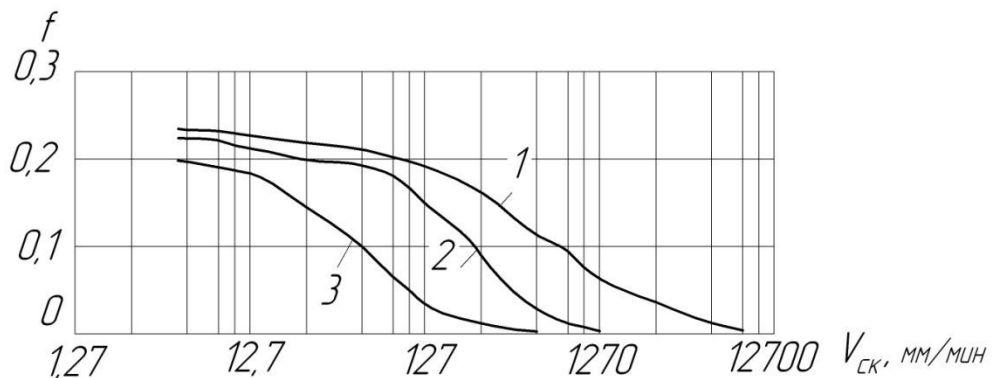
зміни коефіцієнта тертя: зазвичай більшої вихідної в'язкості відповідає більше значення коефіцієнта тертя. Збільшення швидкості ковзання до значень, що перевищують відповідні максимальному коефіцієнту тертя, призводить завжди до того, що зі зменшенням в'язкості масла коефіцієнт тертя збільшується. Великим швидкостям ковзання відповідає великий рівень зміни коефіцієнта тертя (рис. 1.11) [1].

З рис. 1.12 видно, що в'язкість мастила дуже впливає на коефіцієнт тертя ковзання, який із підвищенням в'язкості мастила значно знижується [9].



1 – індустріальна олія 12; 2 – індустріальна олія 45; 3 – олія вапор

Рисунок 1.12 – Залежність коефіцієнта тертя  $f$  від швидкості ковзання  $V$  для масел різної в'язкості



1 - олія в'язкістю  $\nu_{50} = 8$  сСт; 2 - олія в'язкістю  $\nu_{50} = 24$  сСт; 3 - олія в'язкістю  $\nu_{50} = 60$  сСт

Рисунок 1.13 – Залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання при мащенні оліями різної в'язкості

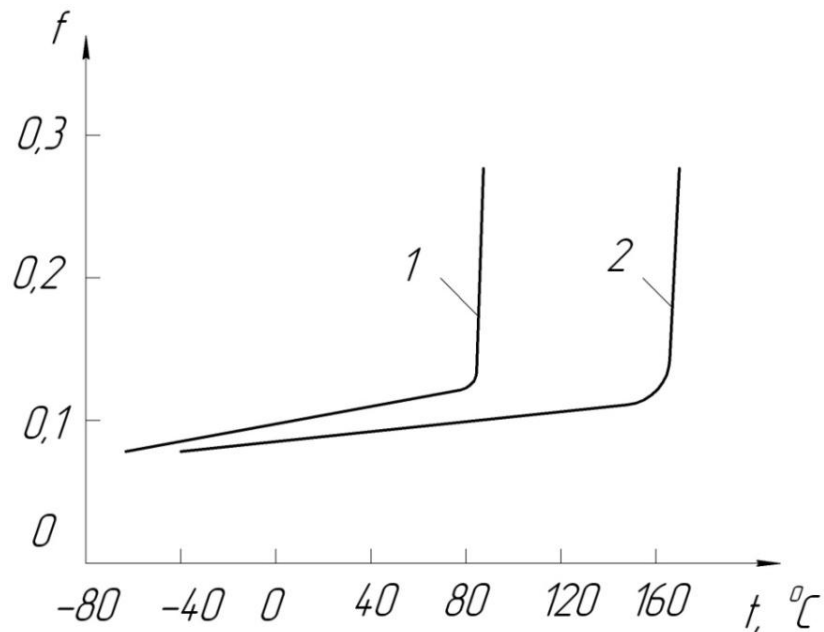
Вигідність застосування високов'язких олій у трибосполученні ковзання наочно ілюструється на рис. 1.13. З нього видно, наскільки зі зростанням в'язкості зменшуються коефіцієнти тертя і головне – найменша швидкість ковзання, коли виникає рідинне тертя [7].

Але в'язкість сильно залежить від зовнішніх умов роботи трисполучення, таких, як питома навантаження на контакт і температура в зоні тертя.

На рис. 1.14 показані результати випробувань на чотирикульковій машині КТ-2 олій різної в'язкості (малов'язка олія вазелінова приладова МВП та олія нормальної в'язкості грозненська МСГ) у дослідах з нагріванням та охолодженням. Досліди при кожному ступені температури тривали 1 хв. У процесі кожного досвіду фіксувалися величина коефіцієнта тертя та його зміни. У діапазоні температур від кімнатної (20°C) до температури, що відповідає затвердінню масел (-60°C для МВП і -40°C для МСГ), коефіцієнти тертя зі зниженням температури поступово зменшуються. Зношування кульок, вимірянк після випробування при різних температурах в дослідах з обома оліями, був дуже малий. Ці результати вказують на деяку тенденцію до підвищення міцності граничного мастильного шару зі зниженням температури мастил. У той самий час різке збільшення в'язкості у вказаному діапазоні температур мало позначається зміні коефіцієнтів тертя випробуваних олій. При температурах менше 80°C для МВП і 160°C для МСГ зберігаються плавне ковзання та порівняно низькі коефіцієнти тертя. При зазначених критичних температурах і вищих температурах спостерігалось руйнування граничного шару, що характеризується уривчастим ковзанням, стрибками тертя та підвищеним зносом кульок [14].

Однією з переваг наявності мастила в трибохімічній системі є можливість впливу на фактичний склад ковзної поверхні за допомогою присадок. Завдяки

трибохімічним реакцій поверхні розділу можуть утворюватися поверхневі шари сприятливого складу [2].



1 – вазелинове приладове; 2 – грозненське

Рисунок 1.14 – Залежність коефіцієнта тертя від температури під час випробування масел

Зазначена вище інформація дозволяє зробити висновок, що мінеральні олії (без хімічно-активних присадок) здатні утворювати граничні шари на сталі, що забезпечують поділ поверхонь тертя і не допускають виникнення заїдання, починаючи від температури затвердіння до критичної температури, що характеризує межу температурної стійкості олій [14].

Різні види мастил можна розділити на три загальні групи [2]:

1. "Неактивні", або "нейтральні", мастила. До цього класу відносяться вуглеводні та більшість інших базових олій. Зазвичай найбільш важливою властивістю цих матеріалів є в'язкість, яка залежить від їхньої хімічної структури. Вуглеводні або базові олії з нафти можна кла-

сифікувати, згідно з їхньою структурою, на граничні (парафіни та наф-тени) та неграничні (олефіни та ароматичні). Усі мінеральні олії скла-даються з молекул, які зазвичай містять більш як один тип вуглевод-невих пар.

2. Присадки, що підвищують «маслянистість». Присадки до мастил, що містять полярну групу, з'єднані з довгими ланцюгами метиленових груп, забезпечують маслянистість або змащувальну здатність; кисень найчастіше зустрічається доповненням до вуглецю і водню. Типовими прикладами служать стеаринова та олеїнова кислоти. Крім довго-ланцюгових жирних кислот використовуються також деякі спирти та складні ефіри з аналогічною структурою. Невеликі кількості цих ре-човин (~1%) можуть бути розчинені в базовій олії, і тоді вони будуть зчеплюватися з металевими поверхнями.
3. «Противозадирні» та «протизносні» присадки. Ці присадки до масел зазвичай містять атоми фосфору, сірки або хлору і можуть додатково або навіть спеціально включати кисень, свинець, бор, селен і т.д. При-кладами є дибензилсульфід та діоктилдітіофосфат цинку. Ці присадки функціонують в умовах граничного мащення, реагуючи з металевими нерівностями, що контактують, і утворюючи плівки, що сприяють зни-женню міжметалевого контакту і зношуванню та запобігають ката-строфічним пошкодженням поверхонь. Основним визначальним чин-ником такої їхньої дії є робоча температура поверхні розділу.

Щоб описати фрикційну поведінку різних граничних плівок використо-вуємо якісну діаграму, представлену на рис. 1.15. На цій діаграмі наведено графіки залежності коефіцієнта тертя  $f$  від температури  $t$ . Крива 1 побудована для системи, змащеною неполярною базовою олією, що не містить природних присадок. Вона показує, що тертя спочатку відносно високе і підвищується зі зростанням температури, оскільки слабкі адсорбційні зв'язки розриваються. Крива 2 відноситься до жирної кислоти, розчиненої в базовій олії. Це мастило реагує з поверхнею металу, утворюючи металеве мило, яке легко зсувається

на площі реального контакту. Коефіцієнт тертя різко знижується приблизно до 0,1. Аж до температури плавлення металевого мила  $t_{кр}$  тертя має мале та постійне значення, але вище за цю температуру різко зростає, внаслідок дезорієнтації та десорбації адсорбованих раніше на поверхнях тертя молекул поверхнево активних речовин. За функціональною ознакою ці присадки називаються антифрикційними. Крива 3 характерна для протизадірної присадки, розчиненої в базовій олії. Присадка реагує дуже повільно нижче за деяку температуру реакції  $t_0$ . Після досягнення температури  $t_0$  починається хімічна реакція, і коефіцієнт тертя знижується, оскільки інтенсивність утворення плівки дозволяє їй нести завантаження. Крива 4 – гіпотетична крива для ефективної комбінації варіантів 2 і 3. Надійне змащування забезпечується жирною кислотою до температури  $t_{кр}$ , а вище цієї температури більшу частину мастильної дії має протизадірна присадка [2].

Полярні похідні вуглеводнів типу жирних кислот, а також деякі високомолекулярні вуглеводні широко застосовуються на практиці для поліпшення змащувальної здатності мастилу при мащенні механізмів і вузлів тертя верстатів [14].

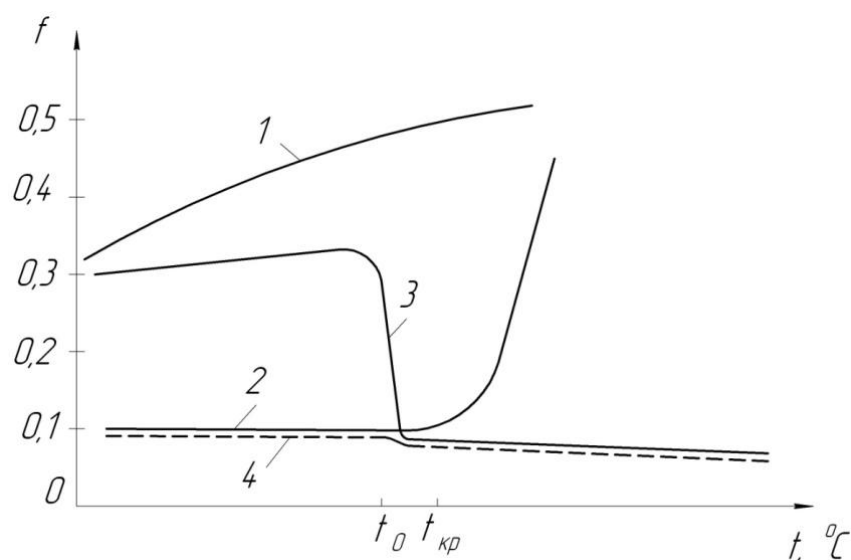
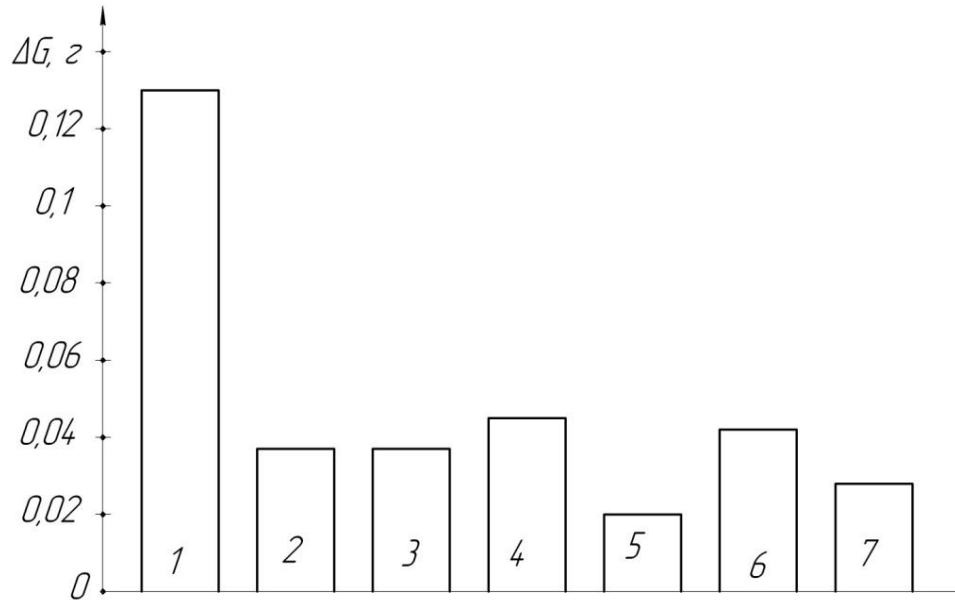


Рисунок 1.15 – Тертя системи з граничним мащенням залежно від температури

Кислоти та інші хімічні сполуки, що містяться в маслі, діють на метали. Вони утворюють з'єднання з металами, що мають абсолютно нові та в різних умовах різні фізичні властивості, які значно відрізняються від вихідних властивостей металів [5].



1 - без мастила; 2 – солідол 3; 3 – І-13; 4 – ЦИАТИМ-201; 5 – літол-24; 6 – І-20А;  
7 – І-40А

Рисунок 1.16 – Втрата ваги  $\Delta G$  зразка під час тертя

На рис. 1.16 показані результати випробувань на зношування сталі 40Х при терті без мастила та зі стандартними мастилами, що найбільш широко використовуються у вузлах тертя різного обладнання: пластичними мастилами солідол С (ГОСТ 4366-76), І-13 (ГОСТ 1631-61), ЦИАТИМ-2 (ГОСТ 6267-74), літол-24 (ГОСТ 21150-75); індустріальними оліями загального призначення І-20А та І-40А (ГОСТ 20799-75).

З пластичних мастил найбільше зношування спостерігається при використанні мастила ЦИАТИМ-201, що можна пояснити тим, що цей мастильний матеріал виготовлено на малов'язкому маслі МВП. Найкращі результати за-

безпечує використання при терті літєвого пластичного мастила з антиокислювальною присадкою – літол-24. При мащені оліями менший знос спостерігається при використанні олій з більшою в'язкістю (олія І-40А) [15].

У табл. 1.3 наведено деякі рекомендації щодо вибору мастильного матеріалу для вузлів металорізальних верстатів залежно від умов їх роботи [7].

Таблиця 1.3 – Основні вимоги до мастил для змащування металорізальних верстатів

Особливості конструкцій та умов експлуатації верстатів	Відповідні вимоги до мастила
1	2
Питомий тиск на зубах шестерень зазвичай невеликий. Задирання та викрашування шестерень та інших деталей не спостерігається. Знос носить переважно характер абразивного стирання.	Мастила повинні бути чисто нафтовими, добре захищати тертьові поверхні від стирання. Застосування протизадирних присадок, як правило, не потрібне.
У верстатах із довгими кінематичними ланцюгами втрати на тертя можуть досягати значної величини.	Мастила повинні бути малов'язкими (при відсутності мащення зануренням можливе застосування високов'язких олій з метою забезпечення рідинного тертя).
В одному вузлі верстата може підлягати мащенню багато різноманітних деталей.	Мастила мають бути універсальними, тобто, забезпечувати мастило різноманітних деталей, що працюють за різних режимів.
Шпиндельні підшипники ковзання швидкохідних верстатів можуть мати малі зазори.	Мастила повинні мати дуже малу в'язкість.
Багато верстатів працюють з ударними навантаженнями.	Мастила повинні мати високу в'язкість.
Вібрації верстатів неприпустимі.	Мастила повинні мати високу в'язкість.
Температурні деформації у верстатах повинні зводитися до мінімуму.	Олії повинні мати малу в'язкість для кращого відведення тепла.
Мастило працює в невеликому діапазоні температур.	Допустима порівняно крута в'язкісно-температурна крива.
В олію може потрапляти охолодна рідина.	Мастило повинно мати стійкість проти утворення емульсій.
Більшість верстатів забезпечується циркуляційними системами мастила з розгалуженими маслопроводами.	Мастило повинно бути малов'язким та високостабільним.

### 1.2.2.3 Вплив довкілля (атмосфери)

Хімічний склад атмосфери впливає на тертя та знос трибосполучення. Відомо, що зношування навіть нержавіючих сталей при терті в присутності кисню значно вище, ніж без нього. Зношування сталі в атмосфері азоту набагато менше, ніж у повітрі [5].

Підвищення концентрації кисню сприятливо впливає на величину зносу, а також несучу здатність ковзаючих поверхонь.

Якщо мастило містить присадки, що покращують змашувальну здатність, наприклад жирні кислоти, то в присутності води і кисню утворюються карбоксильні мила. Неорганічні плівки, утворені «за місцем» із протизадирних присадок на металевих поверхнях, наприклад сульфідів, хлоридів та фосфідів, забезпечують мащення за дуже високих температур. Це поверхневі плівки, утворені в результаті трибохімічних реакцій, більш стійкі ніж будь-яка фізично або хімічно адсорбована плівка [2].

#### 1.2.2.4 Вплив умов роботи трисполучення

Для неприпрцьованих поверхонь питоме навантаження нелінійно впливає на зношування, причому більш істотно для поверхонь з малою площею контакту, тобто, без хвилястості; хвилястість поверхонь значно зменшує нелінійний характер цієї залежності. Для напрацьованих поверхонь інтенсивність зношування прямо пропорційна питомому навантаженню.

Вплив швидкості ковзання на фрикційні властивості вивчено недостатньо. Швидкість ковзання визначає час існування одиничного фрикційного зв'язку і, отже, швидкість деформування матеріалів. Тому на тертя та знос матеріалів впливає в'язкість фрикційного контакту. Від швидкості ковзання залежить потужність тепловиділень та температура на контакті. Нагрів поверхневих шарів тіл, що труться, призводить до зміни в них механічних і фрикційних властивостей і механо-хімічних структурних змін.

Можна вважати, що тертя та зношування без мастильного матеріалу або при недосконалому мащенні при стаціонарних режимах функціонально пов'язані з об'ємною температурою, яку можна заміряти в процесі випробувань. Об'ємна температура і температурний градієнт залежать від геометричної форми поверхонь, співвідношення їх площ, коефіцієнта перекриття, кількості тепла, що виділяється в процесі тертя, значень коефіцієнтів тепловіддачі з поверхонь, теплотехнічних властивостей випробовуваних матеріалів (теплоємності, теплопровідності, щільності, температуропровідності, тощо, режиму тертя та інших зовнішніх та внутрішніх факторів.

Збільшення шляху тертя та часу контакту негативно впливає на величину зношування.

Молекулярний вплив на контакт в умовах тертя (мащення, досконалості очищення поверхонь, навколишнього газового середовища та параметрів, що характеризують його стан) враховується коефіцієнтом тертя та параметром опору зсуву  $\tau_0$ . Чим менший зсувний опір, тим менша інтенсивність зношування поверхонь тертя. Тому введення мастила підвищує зносостійкість вузлів тертя [1].

Далі зовнішні умови роботи трибосполучення будуть розглядатися як такі, що впливають на знос не безпосередньо, а через свій вплив на властивості мастильного матеріалу і контактуючих трибоелементів.

Збільшення температури поверхні і граничного шару значно впливає на міцність шару при терті. Збільшення температури призводить до різкого зростання сили тертя та пошкодження поверхонь, що свідчить про руйнування граничного мастильного шару. Якщо в мастильному матеріалі присутній тільки ПАР, така руйнація пов'язана з дезорієнтацією та десорбцією молекул у ПАР. У присутності хімічно активних добавок у мастильному матеріалі підвищення температури призводить до виникнення на поверхнях тертя хімічно модифікованих шарів, що забезпечують зниження тертя та підвищують працездатність деталей верстатів при підвищених температурах. Подальше зростання темпе-

ратури може призвести до руйнування таких модифікованих шарів, виникнення металевого контакту та катастрофічного зношування деталей. Таким чином, основною причиною руйнування граничних шарів є збільшення температури в контакті тертя вище за критичні значення для відповідного поєднання матеріалів поверхонь і мастильного матеріалу [16].

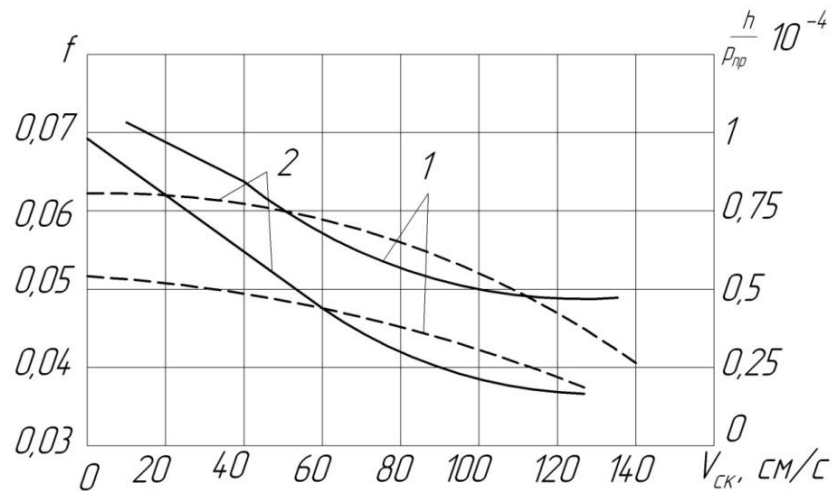
Температура, за якої руйнується або плавиться адсорбована плівка, може розглядатися як міра «міцності» цієї плівки. Ця температура називається критичною температурою переходу до сухого тертя [7].

Здатність масла витримувати навантаження на ковзному контакті визначається постійною (для поєднання даного масла та матеріалів сполучених поверхонь) граничною температурою, при якій відбувається руйнування граничного орієнтованого мастильного шару на поверхнях. Ця температура у свою чергу визначається відповідним граничним постійним значенням питомої потужності тертя в контакті поверхонь, в момент, що безпосередньо передує руйнуванню орієнтованого шару мастила [14].

Дотик сильно подрібнених частинок мастила з перегрітими поверхнями призводить до корінних змін його властивостей. Частина масла перетворюється у газ. За активної участі атмосферного кисню відбувається утворення нових важких вуглеводнів, випадання вуглецю та інші складні процеси.

Швидкість процесу окиснення залежить від температури. Чим вища температура, тим вища швидкість цього процесу. У середньому вона подвоюється з підвищенням температури кожні  $10^{\circ}\text{C}$ . Процес окиснення супроводжується виділенням тепла, що, зі свого боку, сприяє його прискоренню. Окиснення спочатку йде повільно, а потім, у міру нагрівання, дедалі більше прискорюється. Для окиснення перегрітого мастила досить невеликої частки секунди. Продукти розкладання і окиснення крапельок олії найчастіше змиваються потоком олії, що знову надійшло, і потрапляють у масляну ванну. Скупчення продуктів розкладання на перегрітих ділянках деталей, ще більше ускладнює їх охолодження, призводить до подальшого перегріву і до посилення процесу розкладання мастила, що ще більше погіршує роботу пар, що труться [5].

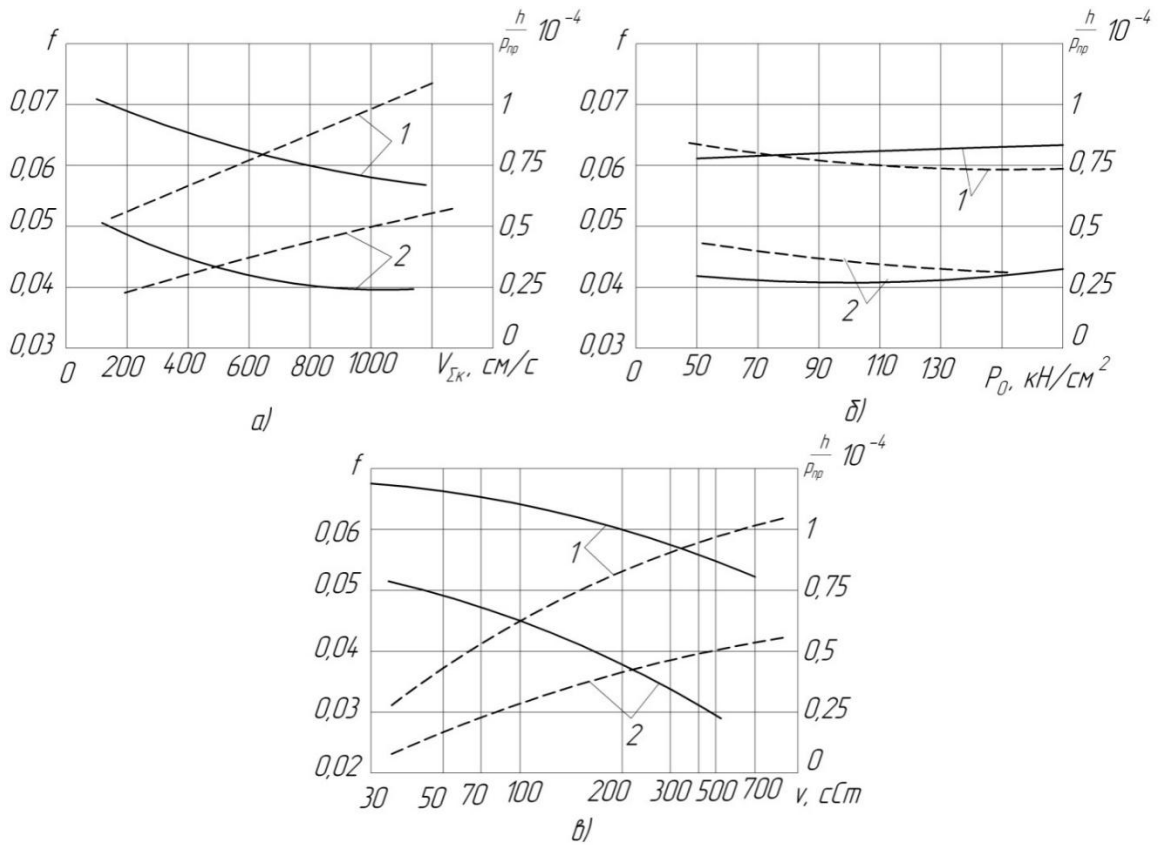
Поряд із шкідливим впливом на мастильні властивості олій продуктів розкладання олії, що утворюються при високій температурі, велике значення мають осади (відкладення), що утворюються при низькій температурі. Відкладення, що утворюються в олії при низькій температурі, є родом емульсії (вода в олії), яка стає стійкою за наявності складних сполук заліза, свинцю і кремнію з продуктами розкладання олії [5].



1)  $\nu=50$  сСт; 2)  $\nu=200$  сСт

Рисунок 1.17 – Залежність товщини мастильного шару та коефіцієнта тертя від швидкості ковзання при різній в'язкості олії (при  $V_{ск}=550$  см/с,  $P_{max}=120$  кН/см<sup>2</sup>)

На рис. 1.17 та 1.18 показано встановлений у досліді вплив сумарної швидкості кочення, швидкості ковзання, в'язкості олії, контактної тиску на безрозмірну товщину масляної плівки та коефіцієнт тертя ковзання. Можна відзначити протилежний вплив названих характеристик  $f$  та  $h$ . Штриховими лініями показані залежності товщини мастильного шару від контактних параметрів, а суцільні лінії відносяться до коефіцієнта тертя ковзання. Збільшення швидкості ковзання призводить до одночасного зменшення товщини масляної плівки, так і коефіцієнта тертя [1].



1 - при  $V_{ск} = 20 \text{ см/с}$ ; 2 – при  $V_{ск}=120 \text{ см/с}$

а – від сумарної швидкості ( $P_{max}=120 \text{ кН/см}^2$ ,  $\nu=110 \text{ сСт}$ ); б – від контактного тиску ( $V_{ск}=550 \text{ см/с}$ ,  $\nu =110 \text{ сСт}$ ); в – від в'язкості мастила ( $V_{ск}=550 \text{ см/с}$ ,  $P_{max}=120 \text{ кН/см}^2$ );

Рисунок 1.18 – Залежність товщини мастильного шару та коефіцієнта тертя при різній швидкості ковзання

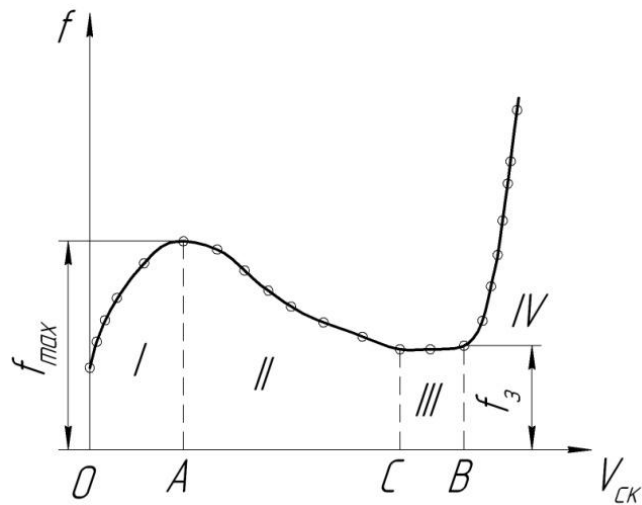


Рисунок 1.19 – Залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання ( $V_{ск}=\text{const}$ ,  $P_{max}=\text{const}$ ,  $\nu=\text{const}$ )

Залежність коефіцієнта тертя ковзання при коченні зі ковзанням тіл від швидкості ковзання у випадку має вигляд, показаний на рис. 1.19. На цій залежності можна виділити дві характерні точки А та В. Точка А характеризує максимальне значення коефіцієнта тертя ковзання та визначає область можливої роботи фрикційної передачі. У точці відбувається катастрофічне руйнування масляної плівки і контактуючих поверхонь, тому дана точка визначає межу несучої здатності контакту за умов виникнення задира і заїдання. Найбільш частий вид залежності  $f=f(V_{ск})$  при коченні зі ковзанням ( $V_{ск}=\text{const}$ ,  $P_{\text{max}}=\text{const}$ ,  $v=\text{const}$ , рис. 1.19) можна розділити на чотири ділянки: I-ділянка малого ковзання, що характеризується зростанням коефіцієнтів тертя зі зростанням швидкості ковзання; до нього відноситься максимальний коефіцієнт тертя ковзання; II – ділянка зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості ковзання; III – ділянка малої зміни коефіцієнта тертя зі швидкістю ковзання; IV – ділянка катастрофічного руйнування масляної плівки та контактуючих поверхонь, швидкого зростання коефіцієнта тертя [1].

При високих швидкостях кочення та ковзання ( $V_{ск} \geq 3000$  м/с) коефіцієнт тертя в момент руйнування мастильного шару не збільшується. Зі збільшенням в'язкості олії, що вступає в контакт, катастрофічне руйнування масляної плівки настає за більш високої швидкості ковзання [1].

Нестача олії призводить до зменшення підйому тіла та знижує вплив швидкості на силу тертя [16].

Якщо питома навантаження велика, а відносна швидкість мала, важко утворитися досить товстій плівці навіть за використання дуже в'язких мастил. У цьому режимі мащення деякі ділянки ковзаючих поверхонь можуть бути покриті плівками мастила завтовшки в одну-дві молекули.

І в'язкість, і хімічна реакція присадок із поверхнями впливають на положення та форму поверхні граничної працездатності. Обидва впливи зрушують критичне навантаження у бік великих значень. Експериментально встановлено, що вплив в'язкості на межу працездатності найбільш яскраво виражено

при малих швидкостях ковзання та низьких температурах, тоді як вплив поверхнево активних речовин найбільш явно виражений при великих швидкостях та високих температурах.

Вплив в'язкості мастила на положення та форму поверхні граничної працездатності в залежності від температур та швидкостей ковзання показано на рис. 1.20. Випробовувалася сталь AISI 52100 при терті з маслом динамічною в'язкістю  $\eta_{37}=0,46$  Па·с (на графіку показано суцільною лінією) і з маслом динамічною в'язкістю  $\eta_{37}=0,033$  Па·с (на графіку показано пунктирною лінією) [2].

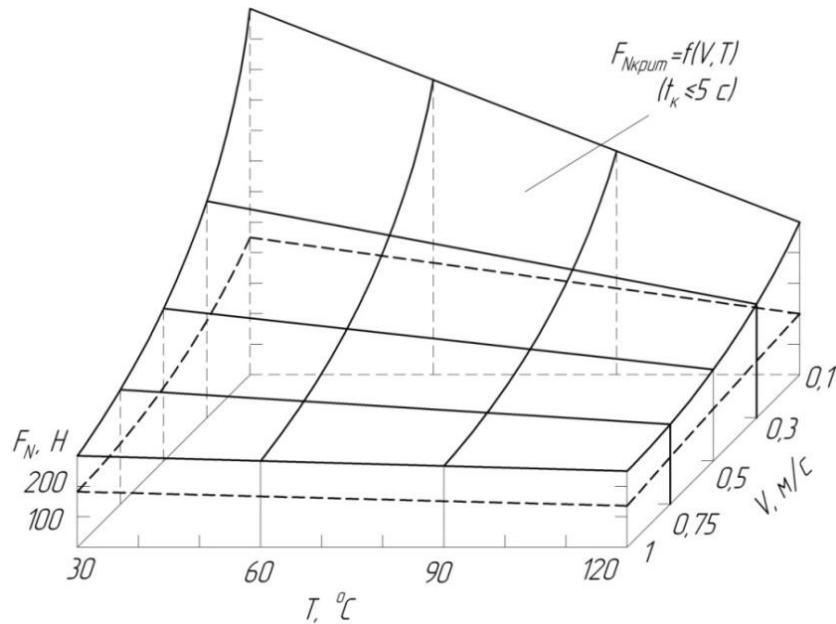


Рисунок 1.20 – Вплив в'язкості на форму та положення поверхні граничної працездатності граничного мастильного шару

## 2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ РЕЧОВИН НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТРИБОСПОЛУЧЕНЬ ВЕРСТАТІВ

2.1 Аналіз впливу коефіцієнта тертя на інтенсивність зношування.  
Аналіз впливу властивостей олій на коефіцієнт тертя при терті ковзанні

Коефіцієнт тертя також характеризує зносостійкість трибоспряження. За даними [6] складемо графік залежності  $I=f(f)$  і за допомогою ПЗ AdvancedGrapher проведемо регресійний аналіз даних, в результаті якого отримуємо апроксимацію даної залежності до експоненційної наступного виду:

$$I = 1,604 \cdot 10^{-8} \cdot e^{24,316 \cdot f} \quad (2.1)$$

З графіка видно, що інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя нелінійно пов'язані, і що збільшення коефіцієнта тертя означатиме значне підвищення інтенсивності зношування.

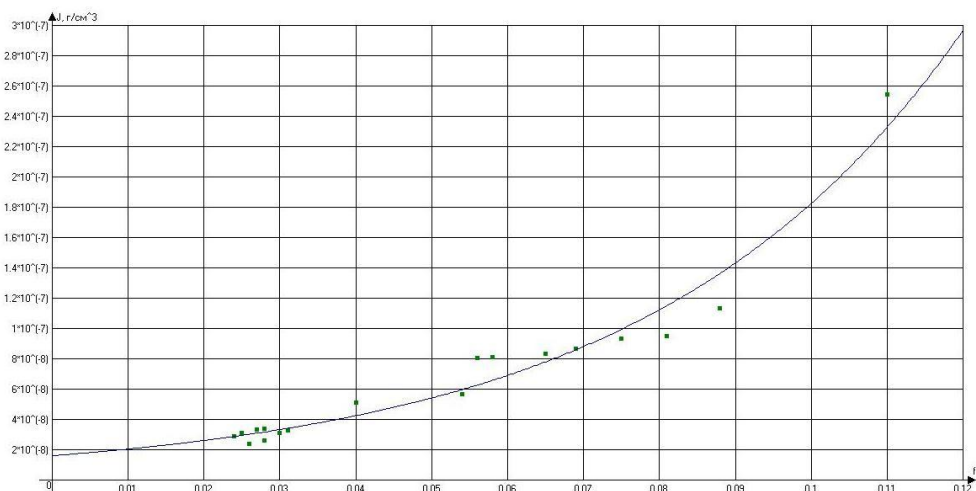


Рисунок 2.1 – Регресійний аналіз залежності інтенсивності зношування від коефіцієнта тертя

Також у роботі [6] проводилися випробування деяких олій із різними присадками. У випробуванні брали участь олії: І-50 з кінематичною в'язкістю  $\nu_{50} = 51 \text{ мм}^2/\text{с}$ ; ТСП-10 з  $\nu_{50}=128 \text{ мм}^2/\text{с}$ ; БЗ-В з  $\nu_{50} = 1350 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Випробування велися на коефіцієнт тертя  $f$  у трибосполученні та максимальне навантаження  $P_{\text{max}}$ , вище якого не реалізується стійкий режим тертя. Між цими параметрами можна виділити зв'язок. Для цього проведемо розрахунок коефіцієнтів рангової кореляції [30]:

$$R = 1 - \frac{6 \cdot \sum d^2}{n \cdot (n-1) \cdot (n+1)}, \quad (2.2)$$

де  $n$  – кількість рангів;

$\sum d^2$  – сума квадратів різниць рангу властивості мастила та рангу відповідного йому коефіцієнта.

Таблиця 2.1 - Матриця рангів

Тиск $P_{\text{max}}$ , МПа		Коефіцієнт тертя $f$	
Значення	Ранг	Значення	Ранг
1	2	3	4
1. Олія І-50, $\nu_{50}=51 \text{ мм}^2/\text{с}$			
29,5	1	0,11	8
480	3	0,081	6
530	4	0,075	5
450	2	0,088	7
560	5	0,069	4
580	6	0,065	3
610	7	0,058	2
630	8	0,056	1
2. Олія ТСП-10, $\nu_{50} = 128 \text{ мм}^2/\text{с}$			
860	2	0,031	4
880	4	0,03	3
69	1	0,054	5
870	3	0,028	2
890	5	0,026	1
3. Олія БЗ-В, $\nu_{50}=1350 \text{ мм}^2/\text{с}$			
68	1	0,04	5
850	2	0,028	4
870	3	0,027	3
880	4	0,025	2
890	5	0,024	1

Таблиця 2.2 - Коефіцієнти рангової кореляції

Масло	Коефіцієнт рангової кореляції
I-50	-1
ТСП-10	-0,9
БЗ-В	-1

Дані розрахунки дозволяють зробити висновок, що між навантаженням та коефіцієнтом тертя існує тісний зв'язок – чим менше навантаження, при якому змінюється режим тертя (відбуваються розриви масляної плівки та точкові металеві контакти), тим більшим буде коефіцієнт тертя при використанні мастильного матеріалу.

Також було проведено регресійний аналіз даних, в результаті якого залежність  $f=f(P_{\max})$  була апроксимована до поліноміальної функції виду:

$$f = b_0 + b_1 \cdot P_{\max} + b_{11} \cdot P_{\max}^2, \quad (2.3)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_{11}$  - Коефіцієнти (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 - Коефіцієнти, отримані в результаті регресійного аналізу

Масло	Коефіцієнти		
	$b_0$	$b_1$	$b_{11}$
I-50	0,109	$4,268 \cdot 10^{-5}$	$-2,037 \cdot 10^{-7}$
ТСП-10	0,084	$3,733 \cdot 10^{-6}$	$-7,656 \cdot 10^{-8}$
БЗ-В	0,035	$8,317 \cdot 10^{-5}$	$-1,072 \cdot 10^{-7}$

Дані, наведені у літературі, в основному базуються на однофакторних експериментах, що не дозволяє оцінити взаємодію та ступінь впливу факторів. В даному випадку можемо скласти матрицю планування повного факторного експерименту  $2^2$  для олій ТСП-10 і БЗ-В (див. табл. 2.5) і по ній оцінити ступеня впливу в'язкості олій і максимального навантаження на трибополучення, при якому зберігається стійкий режим тертя (який характеризує міцність масляної плівки), які є факторами в даному експерименті (див. табл. 2.4). Кожен

фактор задається двома рівнями – верхнім (максимальним) та нижнім (мінімальним) значеннями фактора.

Таблиця 2.4 - Фактори, що беруть участь в експерименті 2<sup>2</sup>

Чинник		Максимальне навантаження $P_{\max}$ , МПа		В'язкість $\nu$ , мм <sup>2</sup> /с	
Позначення		$X_1$		$X_2$	
Значення	Кодоване	+1	-1	+1	-1
	Дійсно	870	69	1350	128

Таблиця 2.5 - Матриця планування експерименту

№ п/п експерименту	Фактори та їх взаємодія			Результат
	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	Коефіцієнт тертя $f$
1	1	-1	-1	0,028
2	-1	1	-1	0,04
3	1	1	1	0,027
4	-1	-1	1	0,084

Залежність коефіцієнта тертя від досліджуваних чинників задамо формулою:

$$f = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (2.4)$$

де  $b_m$  - Коефіцієнт, що характеризує значимість впливу фактора (або взаємодії факторів);

$f$ -значення коефіцієнта тертя;

$x_m$  – кодовані значення факторів.

Розрахуємо коефіцієнти  $b_m$  та занесемо результат у табл. 2.9:

$$b_m = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N X_{mi} \cdot f_i, \quad (2.5)$$

де  $m$  - індекс відповідного коефіцієнта,  $N = 1 \dots 4$  - порядковий номер експерименту.

Таблиця 2.6 -Коефіцієнти рівняння (2.4)

Коефіцієнт	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$
Значення	0,04475	-0,01725	-0,01125	0,01075

Отримані дані дозволяють зробити наступний висновок про ступінь взаємного впливу факторів: оскільки вплив взаємодії міцності плівки та в'язкості олії того ж порядку, що і вплив окремих факторів, то чим вище в'язкість, тим менш значущий вплив поверхневої міцності масляної плівки, і навпаки – при великій міцності масляної плівки в'язкість олії не впливає на зміну коефіцієнта тертя.

## 2.2 Аналіз впливу властивостей консистентних мастильних матеріалів на інтенсивність зношування трибосполучення при терті ковзанні

У роботі [3] були проведені дослідження інтенсивності зношування при терті ковзанні з різними мастилами, в ході яких інтенсивність зношування була апроксимована залежністю:

$$I = A \cdot p^B, \quad (2.6)$$

де  $p$  - Питома навантаження на трибосполучення;

$A, B$  – емпіричні коефіцієнти (табл. 2.7), що характеризують відповідно абсолютну величину інтенсивності зношування та швидкість зростання її зі збільшенням  $p$ .

Випробовувалася інтенсивність зношування матеріалів при терті сталі 45 по сталі 20Х з наступними мастилами:

- 1) водостійке мастило загального призначення солідол З ГОСТ 4366-76;
- 2) морозостійке мастило ЦИАТИМ-201 ГОСТ 6267-74;
- 3) пластичне антифрикційне мастило ВНДІ НП-242 ГОСТ 20421-75;
- 4) пластичне антифрикційне мастило ЦИАТИМ-203 ГОСТ 8773-73;
- 5) багатоцільове водостійке антифрикційне мастило Літол-24 ГОСТ 21150-87.

Таблиця 2.7 - Коефіцієнти А і В для різних мастил

Мастильний матеріал	Коефіцієнт	
	А	У
1	2	3
Солідол С	$3 \cdot 10^{-13}$	2
ЦИАТИМ-201	$8 \cdot 10^{-16}$	3
ВНДІ НП-242	$3 \cdot 10^{-16}$	2,8
ЦИАТИМ-203	$6 \cdot 10^{-20}$	4,8
Літол-24	$6 \cdot 10^{-16}$	2,7

Маючи властивості даних мастил, отримані з нормативних та довідкових джерел [1, 25, 26, 27, 28, 29], можемо визначити ступінь впливу їх на інтенсивність зношування матеріалу шляхом розрахунку коефіцієнта рангової кореляції (формула 2.2) та складемо матрицю рангів (див. таблицю 2.8).

Коефіцієнт рангової кореляції вкаже ступінь впливу властивості мастила на зносостійкість трибосполучення (при  $R=0 \dots 0,3$  зв'язок слабкий, при  $R=0,3 \dots 0,5$  – помірний, при  $R=0,5 \dots 0,7$  – помітний,  $R=0,7 \dots 0,9$  – зв'язок тісний і за  $R=0,9 \dots 1$  зв'язок дуже тісний).

Таблиця 2.8 - Матриця рангів

Найменування мастила	Властивість		Коефіцієнт А		Коефіцієнт В	
	Значення	Ранг	Значення	Ранг	Значення	Ранг
1	2	3	4	5	6	7
1. В'язкість при 0°C, Па·с						
Солідол С	190	1	$3 \cdot 10^{-13}$	3	2	1
ЦИАТИМ-203	625*	3	$6 \cdot 10^{-20}$	1	4,8	3
Літол-24	280	2	$6 \cdot 10^{-16}$	2	2,7	2

Кінець таблиці 2.8

2. Границя міцності, Па						
Солідол С	500	5	$3 \cdot 10^{-13}$	5	2	1
ЦИАТИМ-201	375	4	$8 \cdot 10^{-16}$	4	3	4
ВНДІ НП-242	100	1	$3 \cdot 10^{-16}$	2	2,8	3
ЦИАТИМ-203	250	3	$6 \cdot 10^{-20}$	1	4,8	5
Літол-24	200	2	$6 \cdot 10^{-16}$	3	2,7	2
3. Масова частка вільних лугів, %						
Солідол С	0,2	3	$3 \cdot 10^{-13}$	5	2	1
ЦИАТИМ-201	0,1	1	$8 \cdot 10^{-16}$	4	3	4
ВНДІ НП-242	0,15	2	$3 \cdot 10^{-16}$	2	2,8	3
ЦИАТИМ-203	0,1	1	$6 \cdot 10^{-20}$	1	4,8	5
Літол-24	0,1	1	$6 \cdot 10^{-16}$	3	2,7	2
4. Пенетрація при 25°C, мм <sup>-1</sup>						
Солідол С	290	3	$3 \cdot 10^{-13}$	4	2	1
ЦИАТИМ-201	290	3	$8 \cdot 10^{-16}$	3	3	3
ЦИАТИМ-203	275	2	$6 \cdot 10^{-20}$	1	4,8	4
Літол-24	235	1	$6 \cdot 10^{-16}$	2	2,7	2
5. Температура краплепадиння, °С						
Солідол С	95	1	$3 \cdot 10^{-13}$	4	2	1
ЦИАТИМ-201	175	3	$8 \cdot 10^{-16}$	3	3	3
ЦИАТИМ-203	160	2	$6 \cdot 10^{-20}$	1	4,8	4
Літол-24	185	4	$6 \cdot 10^{-16}$	2	2,7	2
*Дані отримані в результаті інтерполяції						

Отримані дані зводимо у табл. 2.9 та оцінюємо ступінь впливу властивостей мастильних матеріалів на інтенсивність зношування (рис. 2.2).

Таблиця 2.9 - Коефіцієнти рангової кореляції

Властивість мастильного матеріалу	Коефіцієнт рангової кореляції	
	Для А	Для В
1	2	3
1. В'язкість при 0°C	-1	1
2. Межа міцності	0,7	-0,2
3. Масова частка вільних лугів	0,15	-0,55
4. Пенетрація при 25°C	0,7	0,1
5. Температура краплі падиння	-0,4	0,2

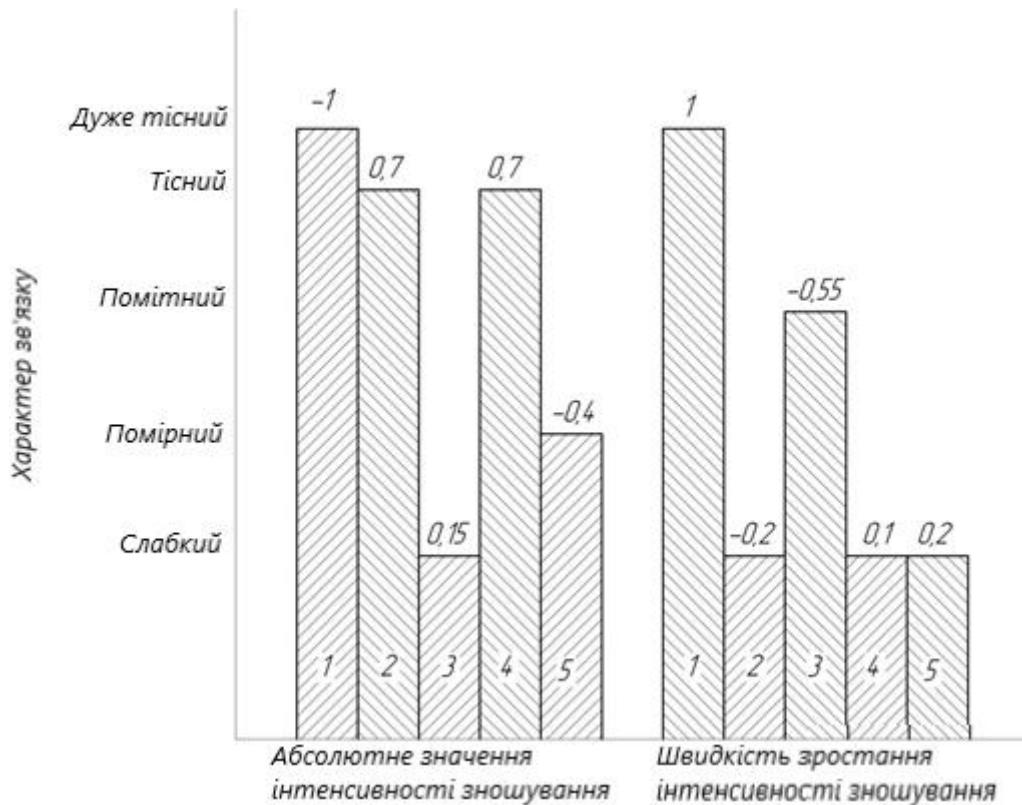


Рисунок 2.2 – Діаграма ступеня впливу властивостей мастил на інтенсивність зношування (номери властивостей – за табл. 2.9)

Дані розрахунки дозволяють зробити такі висновки:

1. В'язкість мастильного матеріалу має вирішальний вплив на інтенсивність зношування матеріалів, що труться.
2. При одному і тому ж навантаженні мастило з більшою в'язкістю забезпечить менше значення інтенсивності зношування.
3. При зростанні навантаження в трибосполученні більший градієнт інтенсивності зношування матиме при роботі з мастилом більшої в'язкості.
4. Межа міцності каркаса консистентного мастильного матеріалу також тісно пов'язаний із забезпечуваним значенням інтенсивності зношування пари тертя: більша межа міцності обумовлює витікання мастила при більшому навантаженні на трисполучення, і, як наслідок, велику величину інтенсивності зношування. На градієнт інтенсивності зношування межа міцності чутливого впливу не надає.

5. Пенетрація впливає абсолютне значення інтенсивності зношування (що більше показник пенетрації, тим більше за однієї й тієї ж навантаженні буде інтенсивність зношування), але швидкість її зростання впливає.
6. Присутність у складі мастила вільних лугів забезпечує менший градієнт інтенсивності зношування при зростанні питомого навантаження на трисполучення, але не впливає на величину інтенсивності зношування.
7. Температура краплепадіння впливає інтенсивність зношування пари тертя.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано основні види зносу які виникають у вузлах верстатів при їх експлуатації;
2. Проаналізовано трибологічні процеси які обумовлюють появу зношування деталей верстатів;
3. Запропановано метод бородьби з проявом зношування, а саме використання мастильних матеріалів
4. Розглянуто основні характеристики різних типів мастил, які впливають на ефективність їх використання у вузлах верстатів;
5. Визначенно вплив факторів на процес роботи трибо сполучень верстатів;
6. Проведено аналіз впливу складу та властивостей мастильних речовин на зносостійкість трибосполучень верстатів.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Алисин В. В. Трения, изнашивание и смазка: справочник в 2-х кн. Кн. 2/ В. В. Алисин, Б. М. Асташкевич, Э. Д. Браун, М. А. Галахов. – М.: Машиностроение, 1979. – 357 с.
2. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике/ Х. Чихос; Пер. с англ. канд. физ.-мат. наук С. А. Харламова. = М.: Мир, 1982. – 351 с.
3. Браун Э. Д. Основы трибологии. Трение, износ и смазка: учебник для ВУЗов/ Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский; под ред. А. В. Чичи-надзе. – М.: Наука и техника, 1995. – 778 с.
4. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на долговечность и надёжность деталей машин/ Ю. А. Розенберг. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
5. Дьячков А. К. Трение, износ и смазка в машинах/ А. К. Дьячков. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 157 с.
6. Трение, износ и смазка в узлах машин. Межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону: РИИЖТ, 1989. – 66 с.
7. Розенберг Ю. А. Смазка механизмов и машин (выбор и применение масел)/ Ю. А. Розенберг, И. Э. Виноградова. \ М.: Красный печатник, 1960. – 340 с.
8. Попов С. М. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні: навчальний посібник для студентів вищ. навч. закладів: рек. МОНУ/ С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко; за заг. Ред.. С. М. Попова. – Запоріжжя: Мотор Січ, 2010. – 368 с.
9. Крагельский И. В. Коэффициенты трения: справочное пособие/ И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. – М.: Машгиз, 1962. – 220 с.
10. Ясь Д. С. Испытания на трение и износ. Методы и оборудование/ Д. С. Ясь, В. Б. Подмоков, Н. С. Дяденко. – Киев: Техніка, 1971. – 138 с.

11. Браун Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах/ Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
12. Порохов В. С. Трибологические методы испытания масел и присадок/ В. С. Порохов. – М.: Машиностроение, 1983. – 183 с.
13. Поздняков В. В. Эффективные методы уменьшения трения/ В. В. Поздняков. – М.: ЦНИИПИ, 1976. – 53 с.
14. Матвеевский Р. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоёв и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов [Текст]/ Р. М. Матвеевский; под ред. М. М. Хрущева. – М.: Наука, 1971. – 227 с.
15. Смазка при трении и резании металлов: межвузовский сборник научных трудов/ Ивановский ун-т им. первого общегородского Совета рабочих депутатов. – Иваново: ИГУ, 1986. – 152 с.
16. Справочник по триботехнике/ Под общ.ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
17. Научно-технические основы применения смазочно-охлаждающих жидкостей при резании металлов: сборник статей/ Под ред. М. И. Клушина. – Иваново: Ивановский текстильный ин-т Горьковский политехнический ин-т, 1968. – 172 с.
18. Курчик Н. Н. Смазочные материалы для обработки металлов резанием: состав, свойства и основы производства/ Н. Н. Курчик, В. В. Вайншток, Ю. Н. Шехтер. – М.: Химия, 1972. – 312 с.
19. Вопросы применения смазочно-охлаждающих жидкостей при резании металлов: сборник статей/ каф. «Технология металлов и машиностроения» Горьковск. политехн. ин-т им. А. А. Жданова; под ред. М. И. Клушина. – Иваново: Ивановский текстильный ин-т им. М. В. Фрунзе, 1965. – 181 с.
20. Усманов К. Б. Влияние внешних сред на износ и стойкость режущих инструментов/ К. Б. Усманов, Г. И. Якунин. – Ташкент: Фан, 1984. – 160 с.

21. Ивкович Б. Трибология резания: смазоч.-охлаждающие жидкости/ Б. Ивкович; пер. с сербскохорв. Ю. К. Наследышева; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск: Наука и техника, 1982. – 142 с.
22. Ошер Р. Н. Производство и применение смазочно-охлаждающих жидкостей (для обработки металлов резанием)/ Р. Н. Ошер; под ред. акад. П. А. Ребиндера. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 226 с.
23. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник/ под. Ред. С. Г. Энтелиса и Э. М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
24. Чередниченко Г. И. Физико-химические и теплофизические свойства смазочных материалов/ Г. И. Чередниченко, Г. Б. Фройштетер, П. М. Ступак. – Ленинград: Химия, 1986. – 224 с.
25. ГОСТ 4366-76. Смазка солидол синтетический. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 4 с.
26. ГОСТ 6267-74. Смазка ЦИАТИМ-201. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 3 с.
27. ГОСТ 20421-75. Смазка ВНИИ НП-242. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 3 с.
28. ГОСТ 8773-73. Смазка ЦИАТИМ-203. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 3 с.
29. ГОСТ 21150-87. Смазка Литол-24. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
30. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента/ П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
31. ГОСТ 20799-88. Масла индустриальные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
32. Зайцева И. Ю. Выбор способа подачи смазочно-охлаждающих технологических сред при лезвийной обработке/ И. Ю. Зайцева, Т.Г. Ивченко. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 4 с.