

Лекція 7

Деякі положення теорії і практики прогнозування технічного стану об'єктів

1 Загальні положення

Теорія прогнозування є складовою частиною теорії контролю і діагностики технічних об'єктів. Вона вивчає питання провіщення стану об'єкта в майбутньому. Рішення задач прогнозування засновують на вивченні тенденцій зміни контрольованих параметрів, що характеризують стан об'єкта як функцію часу, тобто поточний стан. При рішенні використовують математичний апарат.

Стан об'єкта можна охарактеризувати сукупністю значень деяких контрольованих параметрів:

$$S = f(y_1, y_2, \dots, y_n).$$

У кожен дискретний момент часу t_1, t_2, \dots, t_k стани S_i визначаються залежностями:

$$S_1 = f(y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n});$$

$$S_2 = f(y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n});$$

.....

$$S_k = f(y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn}).$$

Знання й аналіз закономірностей зміни поточного стану об'єкта дозволяє прогнозувати його стан у майбутньому, що надає можливість успішно вирішувати наступні задачі [6]:

- провіщати момент переходу об'єкта з працездатного стану в непрацездатне і тим самим обґрунтовано визначати гарантійний термін працездатності об'єкта;
- вчасно провіщати появу відмовлень і за рахунок цього запобігати виникненню аварійних ситуацій;
- визначати терміни профілактичних робіт, зводячи до мінімуму випадки раптових відказів на визначеному проміжку експлуатації об'єктів.

Відомо декілька методів прогнозування. У роботі [6] досить повно освітлені пряме і зворотнє аналітичне і імовірнісне прогнозування.

При аналітичному методі припускають, що контрольований параметр являє собою функцію $y(t)$, яка у відомій області T_1 (Рис. 4.1) приймає значення $y(t_i)$, причому $t_i \in T_1$ і $t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots < t_k$. За відомим значенням $y(t_i)$ контрольованої функції $y(t)$ у дискретні моменти часу t_i у минулому потрібно провістити значення величин $y(t_{k+1}), y(t_{k+2}), \dots, y(t_{k+j}), \dots, y(t_{k+l})$.

При цьому $t_{k+j} \in T_2$ і $t_{k+1} < t_{k+2} < \dots < t_{k+j} < \dots < t_{k+l}$. T_2 - область майбутніх значень.

При імовірнісному методі за відомим значенням $y(t_i)$, коли $t_i \in T_1$, визначають імовірність того, що значення функції $y(t)$ не вийдуть за допустимі межі, обмежені умовами працездатності обстежуваного об'єкта.

Аналітичне пряме прогнозування – це таке прогнозування, коли значення контрольованої функції обчислюють через задану кількість кроків прогнозування.

Аналітичне зворотнє прогнозування – це таке прогнозування, коли визначають, через скільки кроків прогнозування значення $y(t_{k+j})$ досягнуть допустимого рівня.

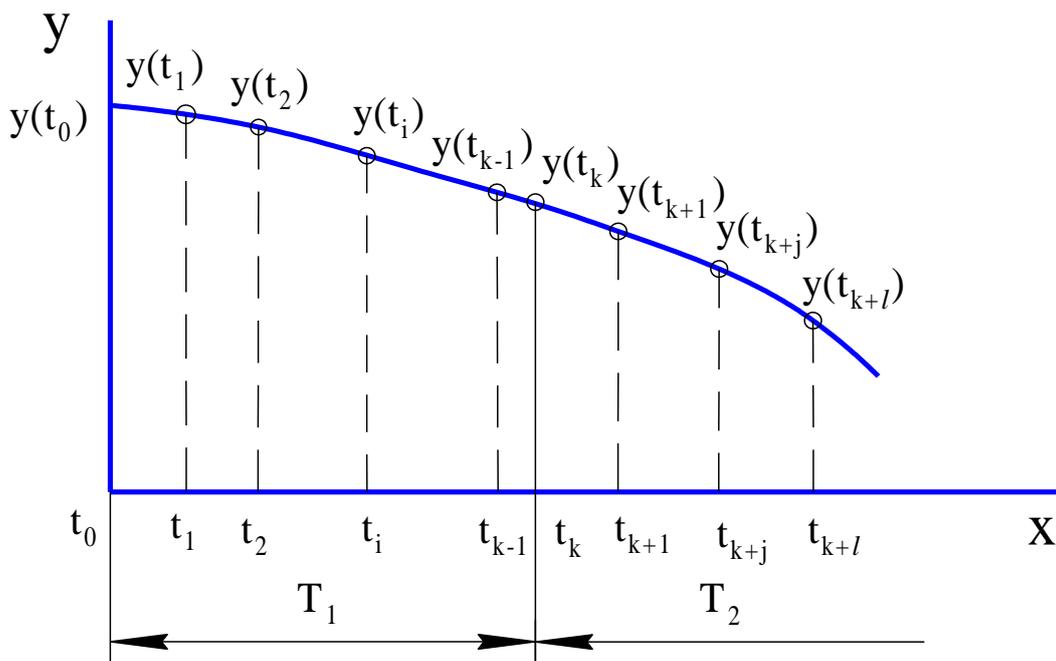


Рисунок 4.1 – Области і кроки прогнозування

Таким же чином при імовірнісному прямому прогнозуванні визначають імовірність для заданого числа кроків, а при зворотньому – число кроків, через яке наступить рівність імовірностей $P_y = P_{y \text{ доп}}$.

Як при аналітичному, так і при імовірнісному прогнозуванні процес рішення задачі розділяють на три етапи:

- одержання інформації про контрольовані параметри і її якісний і кількісний аналіз з метою визначення закономірності;
- вибір принципу прогнозування (аналітичного чи імовірнісного), способу прогнозування (прямого чи зворотнього) і методу прогнозування;
- виконання обчислювальних операцій, пов'язаних з одержанням результату прогнозу.

В той же час, як аналітичне, так і імовірнісне прогнозування, що описані в роботі [6], не знайшли широкого застосування. Їх використовують у тих сферах машинобудування, де до експлуатованих об'єктів пред'являють особливо високі вимоги (зокрема в авіаційній техніці).

Найбільш широким видом прогнозування є прогнозування показників надійності деталей машин за критерієм зносу. Показники розраховують методом статистичної обробки даних експлуатації, результатів експерименту і комбінованим способом, коли одночасно використовують як апріорні знання, так і дані цілеспрямованих експериментів.

Виникнення відказів устаткування пов'язано зі спільним діяннями великого числа різних факторів, вплив яких найчастіше неможливо точно установити. Тому відкази носять випадковий характер, а сам відказ розглядають як випадкову подію. Його головною характеристикою є імовірність його появи в результаті досліджень.

2 Прогнозування надійності і довговічності об'єктів за критеріями зносу

2.1 Види, класифікація і процеси зношування

Зношування – процес поступової зміни розмірів і форми тіла при терті, а також корозії. Результатом зношування є знос, який, у свою чергу, є функцією часу.

Основним показником зносу служить швидкість зношування, обумовлена як відношення величини зносу до часу, протягом якого протікає процес зношування. Розрізняють миттєву (у конкретний момент часу) і середню (за визначений інтервал часу) швидкості зношування. Згодом величина зносу досягає граничного значення, при якому подальша експлуатація деталі повинна бути припинена щоб уникнути аварійної поломки чи різкого погіршення техніко-експлуатаційних характеристик об'єкта.

У більшій мірі зношування пов'язане з тертям. Найбільш широке поширення одержала *молекулярно-механічна теорія тертя*, відповідно до якої тертя обумовлене подоланням адгезійних зв'язків між тертьовими поверхнями і деформуванням тонких поверхневих шарів дотичних тіл. Адгезійні зв'язки є результатом молекулярної взаємодії й утворюються в місцях контакту тертьових поверхонь.

Крім адгезійної взаємодії можуть мати місце вкорінення твердих виступів у тіла, що сполучаються, у результаті чого при відносному ковзанні поверхонь перед кожним виступом утвориться хвиля матеріалу, що деформується, і його верхні шари розповзаються в боки.

Дуже часто на поверхні тертьових деталей попадають сторонні абразивні частки, що не тільки сприяє інтенсивному стиранню тертьових поверхонь, але і підсилює ефект адгезійних зв'язків.

У залежності від характеру явищ, що обумовлюють ефект зношування, розрізняють три групи видів зношування сполучених деталей [4, 16]: механічне, молекулярно-механічне, корозійно - механічне(рис. 4.2).

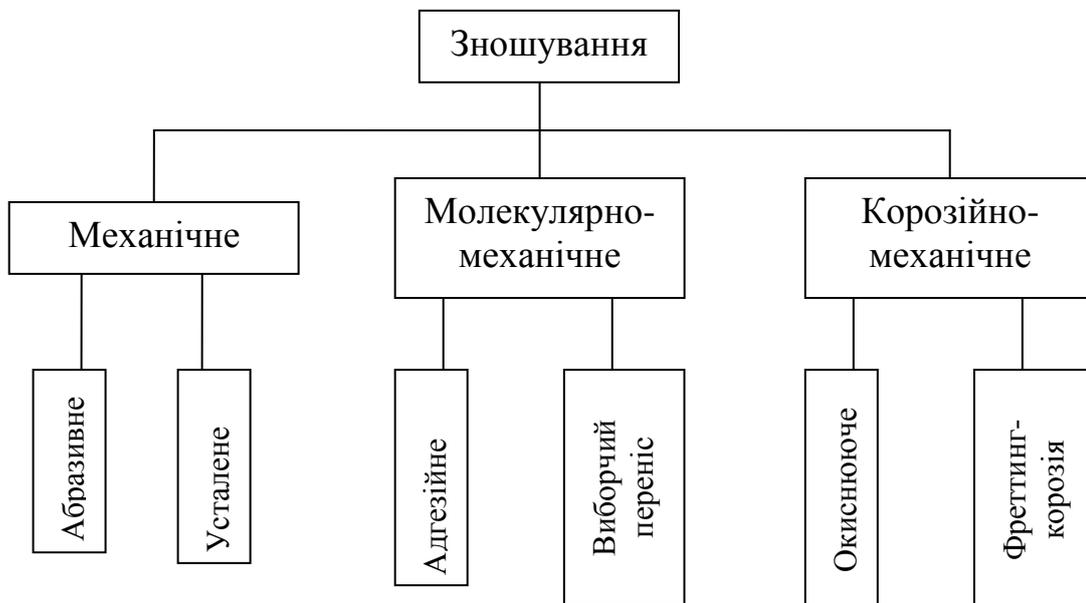


Рисунок 4.2 – Основні види зношування

Механічне зношування відбувається при механічній взаємодії тертьових поверхонь (матеріалів) у результаті ріжучої чи дряпаючої дії твердих тіл або часток (абразивне зношування) і в результаті повторного деформування мікрообсягів матеріалу, що приводить до утворення тріщин і відокремлення часток (втомлююче зношування).

Характерними ознаками абразивного зносу є гладка матова поверхня з утворенням в окремих випадках дрібних подряпин, а також зміна розмірів тертьових частин деталей. Абразивні частки, що зношують, можуть бути металевими, мінерального походження, продуктами окислення мастильних матеріалів. Часто абразивні частки є продуктами зносу мікрообсягів тертьових поверхонь, що руйнуються. Деякі деталі працюють в абразивному середовищі.

Втомлююче зношування відбувається внаслідок циклічного впливу на мікростави тертьових поверхонь. Відокремлення часток може відбуватися й в результаті наклепу поверхневого шару, що, стаючи крихким, руйнується. Найбільш часто втомлююче зношування спостерігається у зубчастих передачах і підшипниках кочення.

Молекулярно-механічне зношування підрозділяють на адгезійне зношування і зношування виборчого переносу, яке найчастіше відбувається в результаті схоплювання, викришування матеріалу, переносу його з однієї поверхні тертя на

іншу і впливу нерівностей на сполучену поверхню. Цей вид зносу відноситься до неприпустимих видів пошкодження, тому що має високу інтенсивність і приводить у ряді випадків до заїдання і відмовлення сполучення. Зношування виборчого переносу характеризується тільки атомарними явищами в зоні контакту. Перенос часток на атомарному рівні може сприяти рівномірному розподілу тиску на поверхні тертя. Адгезійне зношування ще називають зношуванням при заїданні. Причиною такого виду руйнування є підвищення температури в окремих точках контакту металу тертьових пар, що приводить до зварювання контактуючих виступів, виривання металу з поверхні однієї деталі і наростів металу на поверхню іншої деталі. Цей вид зносу спостерігають найчастіше при відсутності змащення на тертьових поверхнях внаслідок його видавлювання під дією високих навантажень. (швидкість взаємного переміщення більше 1м/с). Основним проявом зношування при заїданні є задирки.

Корозійно-механічне зношування підрозділяють на окисне зношування і зношування при фреттинг - корозії. Перше характеризує процес зношування при наявності на поверхнях тертя захисних плівок, що утворилися в результаті взаємодії матеріалу з киснем, друге – зношування дотичних тіл при різких коливальних переміщеннях. Наявність окисних плівок не виключає можливості їхнього втомлюючого руйнування, а лише створює специфічні умови, пов'язані з руйнуванням більш крихкого матеріалу. Після руйнування старого окисного шару під дією кисню повітря утвориться новий шар і т.д. На ділянках, ушкоджених фреттинг - корозією, відбуваються процеси схоплювання, абразивні й втомлююче - корозійні руйнування. Фреттинг - корозію підрозділяють на три стадії. На першій стадії відбувається деформація мікровиступів, схоплювання окремих ділянок, утворення і руйнування окисних плівок. Друга стадія пов'язана з утворенням і видаленням із зони контакту окисних плівок, що руйнуються. Третя стадія пов'язана з руйнуванням поверхневих шарів, попередньо ослаблених втомлюючими і корозійними процесами.

За величиною швидкості процесу, що протікає, розрізняють три групи зношування: швидкодіючі процеси, процеси середньої швидкості, повільні процеси. Швидкодіючі процеси спостерігаються при абразивному, адгезійному із заїданням і фреттинг- корозії третьої стадії. Процеси середньої швидкості мають місце при

втомлюючому малоцикловому зношуванні (при крихкому руйнуванні), зношуванні з молекулярним переносом, окисному зношуванні (третя форма – періодичне утворення і викрошування суцільних твердих і крихких шарів хімічних сполук кисню і металу). Повільні процеси виникають при втомлюючому зношуванні, зношуванні при виборчому переносі, окисному зношуванні (перша форма – видалення з поверхонь тертя ультрамікроскопічних адсорбованих плівок; друга форма – видалення мікроплівок твердих розчинів і евтектик хімічних сполук кисню і металу). Якщо при взаємодії поверхонь виникають різні види зношування, то пріоритетним є той, котрий має більшу швидкість.

2.2 Основні характеристики і закономірності зношування

Показниками зносу є:

- *лінійний знос* I (мкм) – зміна розміру поверхні при її зносі, обмірювана в напрямку, перпендикулярному до поверхні тертя;
- *швидкість зношування* $V_{II} = dI/dt$ (мкм/ч) – відношення величини зносу до часу, протягом якого він відбувся;
- *інтенсивність зношування* $j = dI/dS$ - відношення величин зносу до відносного шляху тертя S , на якому відбувається зношування (при однакових розмірностях I і S величина j буде безрозмірною).

Характер і форма протікання процесу зношування залежить від багатьох факторів: силових і кінематичних параметрів; від параметрів, що характеризують склад, структуру і механічні властивості матеріалів тертьових поверхонь; властивостей поверхневого шару; виду тертя і змащення; зовнішніх умов і т.п. Тому зробити теоретичний опис закону зношування вкрай важко. У зв'язку з цим використовують найчастіше залежності, отримані за емпіричними даними для конкретного виду зношування.

Зношування є багатостадійним процесом, у зв'язку з чим, зміну зносу в часі звичайно виражають кривою, що складається з 2-х чи 3-х ділянок. Класична форма кривої зносу складається з 3-х ділянок (рис. 4.3).

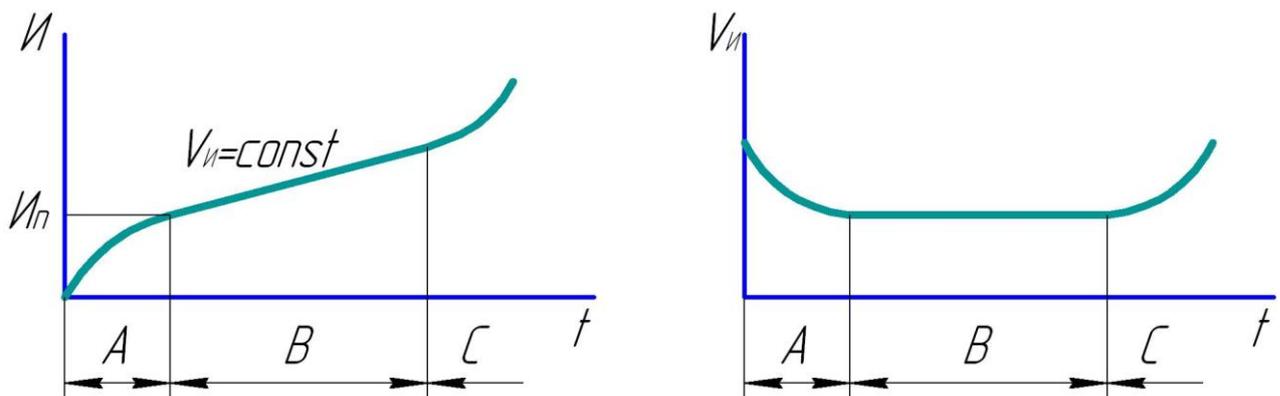


Рисунок 4.3 – Графіки залежності $I = f(t)$, $V_{II} = f(t)$

У період А відбувається мікроприробітка поверхні при прискореному стиранні і деформуванні мікронерівностей (шорсткостей). У цей період швидкість зношування миттєво спадає до значення $V_{II} = const$.

У період В відбувається нормальний сталий знос, якщо немає факторів, що змінюють характер цього процесу. У період С має місце катастрофічний знос, при якому швидкість зношування різко зростає. Цей період пов'язаний, як правило, зі зміною виду зношування в результаті активізації факторів, що впливають на процес і залежать від міри зносу. Це може відбуватися, наприклад, при повному стиранні зміцненого шару чи поверхонь при його втомлюючому руйнуванні.

У реальності протікання процесу зношування в період В може мати інший характер. Однак перед тим, як перейти до розгляду цього питання, приведемо характеристику величин, що входять у теорію прогнозування за критерієм зносу.

Для опису процесу зносу використовують апарат теорії випадкових функцій. Найбільш повна характеристика процесу зношування може бути представлена у вигляді залежності

$$I = f(t).$$

При цьому функцію для групи деталей можна вважати випадковою. Конкретний її вигляд, прийнятий у результаті досвіду, є реалізацією випадкової функції.

Іншими найважливішими характеристиками випадкової функції $I(t)$ є:

- $m_u = (t)$ - математичне ждання процесу зношування, що виражає його закономірну частину;

- $D_u = (t)$ - дисперсія, що виражає розсіювання зносу щодо середнього значення;

- $K_u = (t, t_1)$ - нормована кореляційна функція, що є оцінкою міри перемішування реалізацій процесу зношування;

- $m_{V_u} = (t)$ - математичне ждання швидкості зношування.

Під математичним жданням функції $I(t)$ розуміють не випадкову функцію $m_u(t)$, яка при кожному значенні аргументу t дорівнює математичному жданню

відповідного перетину випадкової функції (перетин сімейства кривих функцій для вибірки деталей).

Під *дисперсією функції* розуміють не випадкову функцію $D_u(t)$, значення якої для кожного аргументу t дорівнює дисперсії відповідного перетину випадкової функції.

Під *кореляційною функцією* $I(t)$ розуміють не випадкову функцію двох аргументів $K_u(t, t_1)$, яка при кожній парі значень t, t_1 , дорівнює *кореляційному моменту* відповідних перетинів випадкової функції.

Графічний образ змінення $m_u(t)$ і $m_{v_u}(t)$ в часі для різних характерів процесу зношування представлено на рис. 4.4 [4].

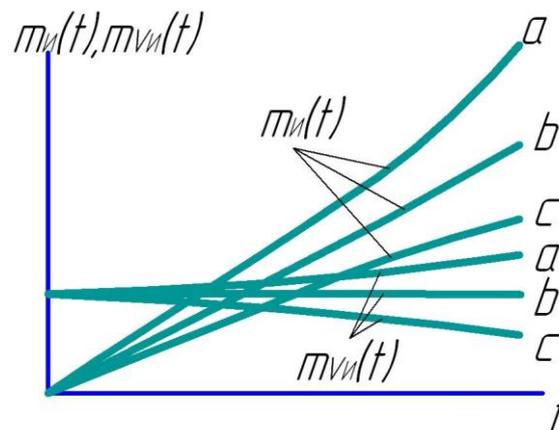


Рисунок 4.4

Прискорено зростаючу залежність зносу від часу (крива а) спостерігають при зношуванні зубчастих передач, підшипників, шліцевих з'єднань, ланцюгів і інших сполучень. Уповільнено зростаючу залежність зносу (крива с) спостерігають при зносі елементів поршнів, плунжерів, золотників і т.п. Проміжне положення займає прямолінійна залежність зносу (крива в), яка може бути тільки при постійній швидкості зносу $m_{v_u}(t)$.

Граничною величиною процесу зношування є граничний знос, при перевищенні якого можуть виникати негативні технічні явища і небезпеки при експлуатації устаткування. Тому встановленню граничних розмірів з'єднань приділяють особливу увагу. Загалом, при визначенні граничних відхилень виходять з наступної умови:

$$I_{\text{пр. max}} \leq I_{\text{пр1}}; I_{\text{пр2}}; I_{\text{пр3}},$$

де $I_{\text{пр1}}$ - граничне відхилення за критерієм безпеки;

$I_{\text{пр2}}$ - граничне відхилення, обумовлене технічними вимогами (працездатність, міцність, відсутність граничних вібрацій і шумів і ін.)

$I_{\text{пр3}}$ - граничне відхилення за критеріями економічності.

Нормативні значення граничних розмірів і зазорів у сполученнях деталей установлюються, як правило, галузевими стандартами. На окремі вкрай відповідальні елементи машин гранично допустимі розміри регламентуються ДСТ.

2.3 Методи виміру зносу

Існують різні методи виміру зносу від найпростіших, коли звичайними засобами здійснюють вимір розмірів деталей, що зношуються, до самих складних із застосуванням засобів, заснованих на ядерно-фізичних процесах.

До найбільш розповсюджених можна віднести методи:

- мікрометричних вимірів;
- штучних баз;
- поверхневої активації;
- визначення зносу за змістом продуктів зношування.

Метод мікрометричних вимірів заснований на вимірі деталі до і після зношування мікрометрами, індикаторами чи іншими приладами, точність вимірів яких коливається в межах 1-10 мкм. При цьому враховують точність самого вимірювального приладу, тому що від неї буде залежати точність виміру. Так, наприклад, точність штангенциркуля складає 0,1 мм, мікрометра – 0,005 мм, компаратора – 0,001 мм, інтерференційних приладів – 0,0005 мм.

Недоліками цього методу є неможливість здійснення вимірів у процесі роботи машин, необхідність розбирання, а при відсутності вимірювальної бази неможливість установити достовірну величину зносу і форму деталі.

Метод штучних баз полягає в тім, що на поверхні, які зношуються, наносять поглиблення строго визначеної форми у вигляді конуса, піраміди і по зменшенню розмірів цього поглиблення (відбитка) установлюють величину зносу. Для

утворення поглиблення застосовують способи вдавнення (*метод відбитків*) і вирізання (*метод лунок*) поглиблень.

Недоліком *методу відбитків* є те, що навколо відбитка відбувається спучення матеріалу, у результаті чого спотворюється форма поглиблення. *Метод лунок* позбавлений цього недоліку, що дозволяє одержати більш достовірні результати вимірів.

Загальним недоліком методу штучних баз є те, що він може бути використаний для виміру зносу лише тих деталей, на поверхні яких можна виконати поглиблення.

Метод поверхневої активації заснований на тім, що величина зносу пов'язана з величиною радіоактивності, яку на заданій ділянці деталі створюють шляхом опромінення зарядженими частками (дейтронами, протонами, альфа-частинками) на глибину 0,05 - 0,4 мм.

Величину зносу деталі визначають за допомогою тарувального графіка шляхом зіставлення величини зниження радіоактивності деталі зі зниженням радіоактивності зразків, активізованих в однакових умовах з деталлю. Даний метод відрізняється високою точністю і не вимагає зупинки і розбирання машини.

Метод визначення зносу за змістом продуктів зношування в мастилі засновано на взятті проб у відпрацьованому мастильному матеріалі, у якому перебували продукти зносу, що являють собою металеві частки, окисли металів і продукти хімічної взаємодії металів з активними компонентами мастила.

Для аналізу проб відпрацьованого мастильного матеріалу застосовують різні методи: хімічний, спектральний, радіометричний, активаційний.

Хімічний метод засновано на визначенні вмісту заліза й інших продуктів зношування в золі спаленої масляної проби.

Спектральний аналіз засновано на визначенні вмісту домішок у мастилі за допомогою спектрального складу полум'я при спалюванні проби мастила.

Радіометричний метод засновано на вимірі радіоактивності продуктів зношування, що містяться в мастильному матеріалі і накопичуються в масляному фільтрі в результаті зносу деталей, утримуючих радіоактивні ізотопи. *Активаційний аналіз* має загальні риси зі спектральним і радіометричним методами. Вміст продуктів зношування в мастилі визначають з урахуванням міри їх радіоактивності

за допомогою аналізів спектрів гамма-випромінювання проби після опромінення взятої проби нейтронами.

Більш докладно з вищеописаними методами можна ознайомитися в книзі А.С. Пронікова А. С. [16].