

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
«Експлуатаційна надійність технологічних систем паливозабезпечення»  
вибіркових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої  
освіти

**272 Авіаційний транспорт  
Технології робіт та технологічне обладнання аеропортів**

**за темою № 2 - Фізичні основи надійності машин, Механізми відмови машин  
та механізмів**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного  
коледжу Харківського  
національного університету  
внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023 № 1

**Розробник:**

*1. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, викладач-спеціаліст Самохліб Олександр Олександрович*

**Рецензенти:**

- 1. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор Тамаргазін О.А.*
- 2. Викладач циклової комісії аеронавігації КЛК ХНУВС, к.т.н., с.н.с. Тягній В.Г.*

### План лекції

1. Причини втрати машиною працездатності.
2. Зношування. Закони тертя.
3. Зношування деталей насосів та гідроприводів
4. Визначення та класифікація відмов.
5. Процеси, які впливають на працездатність машини.
6. Одночасний прояв раптових і поступових відмов.

### Рекомендована література

#### Основна:

1. Надійність гідромашин і гідроприводів : конспект лекцій / укладач В. Ф. Герман. Суми : Сумський державний університет, 2014. 84 с.

#### Допоміжна:

2. ДСТУ 2861-94 Основні положення аналізу надійності.
3. ДСТУ 2862-94 Методи розрахунку показників надійності.
4. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов.
5. Нечипоренко О. М. Основи надійності літальних апаратів: навч. посіб. К.:НТУУ "КПІ", 2010. 240 с.

### Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. [https://library.kr.ua/wpcontent/elib/chabannyi/Chabannyi\\_Pal\\_mast\\_Mater\\_kn1.pdf](https://library.kr.ua/wpcontent/elib/chabannyi/Chabannyi_Pal_mast_Mater_kn1.pdf)
2. [https://lad.vnau.com.ua/storage/metod\\_vkazivkb.pdf](https://lad.vnau.com.ua/storage/metod_vkazivkb.pdf)

### Текст лекції

#### 1. Причини втрати машиною працездатності

Навіть за найдосконалішої конструкції та ретельного обслуговування фізичне спрацювання машин неминуче. Фізичне зношування можна розглядати як функцію від часу  $f(t)$ .

Основною причиною, яка призводить до втрати працездатності більшості машин, є зношення сполучених деталей. Стійкість матеріалу проти зношування залежить не лише від властивостей вибраного матеріалу, а й від технології виготовлення деталей, припрацювання їх у початковий період експлуатації та багатьох інших факторів.

На працездатність машини впливають усі види енергії:

- механічна,
- теплова,
- електромагнітна,
- хімічна та інші.

Механізм втрачання машиною працездатності досить складний і залежить від комплексу процесів, що відбуваються під час експлуатації машини. При цьому пошкодження деталей машин поділяють на допустимі і недопустимі.

Допустимі пошкодження виникають, як правило, за нормальних умов експлуатації машини. Це руйнування від зношування, утомлюваності і старіння матеріалу. Процесом старіння називають необоротну зміну властивостей або

стану матеріалу виробу внаслідок дії різних факторів. Допустимі пошкодження усувають, як правило, під час планових ремонтів машин.

Недопустимі пошкодження мають аварійний характер, ці пошкодження або відмови виникають унаслідок недостатньої міцності матеріалу чи від утомлюваності. Це теплові тріщини, викришування частинок із поверхонь тертя тощо. Відмови деталей через недопустимі пошкодження усувають під час непланових ремонтів.

## **2. Зношування. Закони тертя**

### **2.1. Зношування**

При контакті двох спряжених поверхонь деталей та їх відносному переміщенні в поверхневих шарах виникають механічні та молекулярні взаємодії, які призводять до руйнування поверхонь, тобто зношення.

Зношення – це результат зношування. Під зношуванням розуміють процес відокремлення матеріалу з поверхні твердого тіла при терті.

Тертя – це опір, який виникає при взаємному переміщенні тіл, що стикаються. Відповідно до молекулярно-механічної теорії У. В. Крагельського і Б. В. Дерягіна тертя складається із двох опорів, з них перший – це результат механічної взаємодії, при якому виступи однієї поверхні потрапляють у западини іншої (фрикційний зв'язок), а другий – це наслідок молекулярної взаємодії поверхонь тертя.

Залежно від кінематики відносного переміщення тіл у машинах та механізмах відбуваються два види тертя: тертя ковзання і тертя кочення. На межі контакту деталей можуть відбуватися пружні та пластичні деформації і молекулярне зчеплення.

Залежно від наявності або відсутності мастила розрізняють такі види тертя:

а) сухе – виникає між поверхнями тертя за відсутності мастила;  
б) рідинне – виникає у випадку повного розділення поверхонь шаром мастила;

в) граничне – поверхні тертя розділені тонким шаром рідини (не більше 0,1 мкм).

### **2.2. Закони тертя**

Залежно від кінематики відносного переміщення тіл і наявності мастил розрізняють і закони тертя.

**1 Закон сухого тертя ковзання.** Залежність сили сухого тертя ковзання від нормального тиску  $N$  установив Г. Амонтон (1699 р.).

Згідно з цим законом сила тертя пропорційна вазі вантажу  $G$  (силі тиску  $N$ ) і не залежить від величини площі дотику:

$$F_k = f \cdot N$$

де  $f = F_k / N$  – коефіцієнт тертя.

Л. Ейлер провів додаткові випробування ковзання тіла по похилій площині (рис. 1) та одержав рівняння для визначення коефіцієнта тертя:

$$f = \tan \alpha - (2l / g t^2 \cos \alpha)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу;  $l$  - шлях, який пройшло тіло;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $t$  - час переміщення на відстань  $l$ .

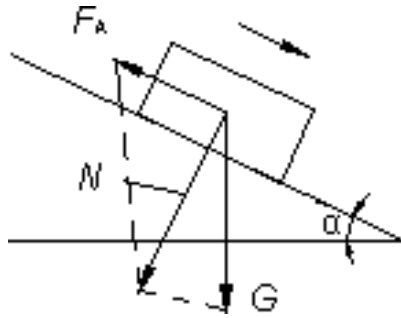


Рис. 1 – Тертя ковзання

**2 Закон тертя кочення.** Винайшов закон тертя кочення Ш. Кулон у 1799 році. Згідно з цим законом сила тертя кочення прямо пропорційна нормальному тиску та обернено пропорційна радіусу котка:

$$F_{\text{коч}} = f_{\text{коч}} \cdot (N/R)$$

де  $N$  – нормальна сила;  $f_{\text{коч}}$  - коефіцієнт тертя кочення.

**3 Закон рідинного тертя.** За цим законом сила рідинного тертя  $F_p$  прямо пропорційна коефіцієнту рідинного тертя  $f_p$  і навантаженню  $N$ :

$$F_p = f_p \cdot N$$

Коефіцієнт рідинного тертя  $f_p$  залежить від виду мастила, швидкості взаємного переміщення і товщини шару мастила.

### 2.3. Види зношування деталей

Зношування у машинах згідно з ГОСТ 30479-97 «Забезпечення зносостійкості виробів. Методи встановлення граничного зносу, що забезпечує необхідний рівень безпеки. Загальні вимоги» поділяють на механічне, корозійно-механічне і зношування внаслідок дії електричного струму. Розглянемо механічне зношування.

Механічне зношування – це зношування внаслідок механічної дії. Механічне зношування, в свою чергу, поділяють на абразивне, гідроабразивне, гідрозерозійне та внаслідок утомлюваності.

Абразивне зношування – це механічне зношування матеріалу внаслідок різальної або дряпаючої дії твердих тіл чи частинок. Абразивні частинки можуть бути мінерального походження, металевими, продуктами окиснення поверхонь деталей та ін.

Основне джерело потрапляння абразивних частинок у сполучення машин – докілья. Більшість частинок мають розмір 5–120 мкм, тобто співрозмірні із зазорами в сполученнях машин. Швидкість абразивного зношування залежить від кількості абразивних частинок та їх твердості.

Для зниження абразивного зношування твердість робочої поверхні деталі повинна бути в 1,3 раза вищою за твердість абразиву.

Різновидом абразивного є гідроабразивне зношування. Це абразивне зношування внаслідок дії твердих тіл або твердих частинок, що виносяться

потокom рідини. Таке зношування характерне для гідравлічних машин і гідроприводів.

Ерозійне зношування внаслідок дії потоку рідини називається гідроерозійним. Ерозія металів – комплексний фізичний та фізико-хімічний процес, що відбувається внаслідок впливу довкілля, окиснення, наклепу, температурних напружень та від утомлюваності. Прикладом ерозійного зношування машин є зношування розподільників гідравлічної апаратури.

Різновидом гідроерозійного зношування є кавітаційне.

Кавітаційне зношування – це механічне зношування під час руху твердого тіла відносно рідини, за якого пухирці газу лопаються поблизу поверхні, що створює місцевий ударний тиск.

Зношування від кавітації характерне для гідравлічних машин, коли в потоці рідини утворюються пухирці пари та газу, при переході в зону високих тисків відбувається конденсація пари і створюються умови для місцевого гідравлічного удару. При цьому дія тиску на поверхню буває настільки значною, що виникають глибокі каверни, які можуть зливатися і утворювати навіть наскрізний отвір (рис. 2.3).



Рис. 2 – Кавітаційне зношення робочого колеса

На рис. 3 наведені місця зношування від дії перекачуваної води на робочі колеса відцентрових насосів, встановлених на водопровідній насосній станції.

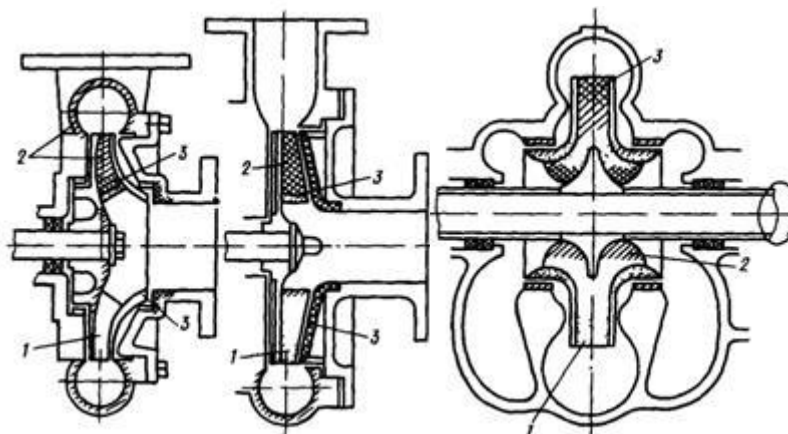


Рис. 3 – Зони зношування робочих органів насосів:

1 – область кавітаційної ерозії; 2 – область гідроабразивного зношування; 3

– область спільної дії кавітації та гідроабразивного зношування

Зношування від утомлюваності – це механічне зношування внаслідок руйнування від утомлюваності при повторному деформуванні мікрооб'ємів поверхневого шару. Явище зношування від утомлюваності відбувається при терті кочення і терті ковзання. Основою цього виду зношування є утворення фрикційних зв'язків при прикладенні нормального навантаження в разі відносного ковзання поверхонь тертя.

Зношування від утомлюваності найчастіше спостерігається в умовах високих контактних навантажень при одночасному коченні та проковзуванні однієї поверхні по іншій. За таких умов працюють важко навантажені шестерні та підшипники кочення.

### **3. Зношування деталей насосів та гідроприводів**

Розширення сфери застосування гідромеханізації та гідротранспорту і впровадження їх у різні галузі народного господарства поставили вимогу оснащення будівельних, гірничорудних, металургійних, хімічних та інших підприємств відцентровими насосами для перекачування абразивних гідросумішей (грунтовими, пісковими, шламовими).

Основним експлуатаційним недоліком цих насосів є малий термін служби деталей проточної частини з причини інтенсивного гідроабразивного зношування. За характером зношування всі деталі насосів можна поділити на дві групи.

До першої групи належать робоче колесо і відвід, проточні канали яких зношуються найбільше. Під час перекачування гідросумішей з великими твердими включеннями ці деталі ще й піддаються ударам. Найбільш інтенсивно зношуються лопаті робочих коліс на вході й на виході, внутрішні поверхні їх дисків, поверхні відводу в зоні розрахункового перерізу та вхід в дифузор. Усмоктувальний патрубок зношується значно менше.

До другої групи належать деталі, що зношуються за рахунок перетікання гідросуміші з порожнини під великим тиском в порожнину з меншим тиском: бронедиски, зовнішні диски коліс, деталі ущільнень з боку всмоктування і вузол сальникового ущільнення. Зношування цих деталей збільшується під час транспортування гідросумішей з дрібними твердими включеннями.

В основному зношення деталей визначається абразивністю гідросуміші й твердістю матеріалу деталей. Робочі органи насосів зношуються за рахунок контакту твердих частинок, що рухаються з рідиною, зі стінками каналів проточної частини насоса. На характер та інтенсивність зношування, крім твердості матеріалу, впливають швидкість і концентрація твердих частинок та кути натікання потоку рідини на лопаті робочого колеса.

Чинників зношування гідравлічних пристроїв та гідроприводів дуже багато, це: режим роботи, фізико-хімічні характеристики пар тертя, технологія виготовлення деталей, конструктивні особливості, тип робочої рідини та ін. Кожний з цих чинників спричиняє фізичні, хімічні або структурні зміни в поверхневому шарі зношеної деталі.

Статистична обробка результатів випробувань та експлуатація

гідроприводів показали, що найбільш слабкою ланкою є насос, в якому до проблемних відносять деталі розподільчої, рідше поршневої групи.

Для гідроприводів найбільшими є втрати від поступових відмов, тобто зношування деталей під час їх роботи і втрати вузлами машин своїх початкових параметрів. Як правило, зношування гідросистем пов'язують з їх забрудненням.

Забруднення можуть бути у вигляді твердих, рідких і газоподібних включень. Кожне з них може значною мірою впливати на зношування деталей.

Для гідравлічних приводів верстатів найбільш небезпечними є нагрів рідини, попадання механічних домішок, води і повітря.

Найбільший вплив на надійність і довговічність гідропривода чинять механічні включення робочої рідини. Внаслідок забруднення робочих рідин з ладу виходить близько 75 % гідроприводів, майже половина аварій в авіації пов'язана із забрудненням робочих рідин, ресурс гідронасосів зменшується в 10–12 разів, 65 % відмов рульового керування також пов'язані із забрудненням рідини.

У гідроприводі робоча рідина – це один із основних елементів: робоче тіло, мастило. Вона відводить тепло, продукти зношування і захищає систему від корозії. Тому її вибору необхідно приділяти особливу увагу.

## **1. Визначення та класифікація відмов**

Відмова – це подія, що пов'язана із частковою або повною втратою працездатності машини. Для кожної машини ознаки відмови встановлюють нормативно-технічною документацією.

Деталі машин в основному руйнуються під дією силових навантажень, тепла та світла, електричних і магнітних полів, хімічного середовища, тертя та ін.

Під дією цих чинників відбувається зміна стану машини. У деталях машини відбуваються такі перетворення:

а) пластична деформація, що призводить до збільшення напруги в матеріалі деталей;

б) утомлюваність у випадку, коли деталі зазнають статичних і циклічних навантажень (рами, вали, пружини та ін.);

в) теплове руйнування, що відбувається під дією нагріву деталей, при яких змінюється структура матеріалу і вони втрачають свої початкові властивості (циліндри, поршні, вкладиші підшипників та ін.);

г) хімічне (корозійне) руйнування – це руйнування матеріалів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії;

д) зношування машини внаслідок тертя.

Відмови поділяють на декілька видів: за причинами виникнення, характером прояву, впливом на працездатність та ін. Розглянемо основні з них.

Класифікація відмов наведена на рис. 1.



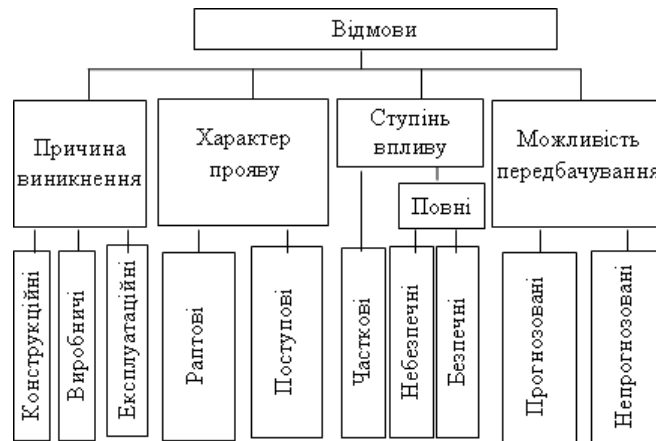


Рис. 1 – Класифікація відмов1 Відмови за причинами виникнення:

а) конструкційні – зумовлені помилками при проектуванні, порушенням вимог державних стандартів, зниженням запасу міцності та ін.;

б) виробничі – спричинені порушенням технології виготовлення, невиконанням вимог технічної документації, застосуванням неякісних матеріалів і т. п.;

в) експлуатаційні – є наслідком порушень умов роботи машини, різних ушкоджень, невиконанням правил експлуатації, низької кваліфікації обслуговуючого персоналу, старінням машини та ін.

## 2 Відмови за характером прояву:

а) раптові – характеризуються різкою зміною параметрів, руйнуванням елементів конструкції, втратою герметичності та ін.;

б) поступові – є наслідком необоротних явищ, утомлюваності, зносу та ін.

3 Відмови за ступенем впливу на працездатність машини: а) повні – відбувається зрив параметрів машини;

б) часткові – знижуються параметри машини (подача, напір, к. к. д.).

Для машин, які виконують відповідальні функції або функції, пов'язані з життям людей, відмови поділяють на небезпечні та безпечні.

Крім того, за можливістю передбачування відмови поділяють прогнозовані і непрогнозовані.

## 2. Процеси, які впливають на працездатність машини

Під час роботи машини на неї діють різні збурення, що зумовлюють відхилення основних технічних параметрів і втрату працездатності.

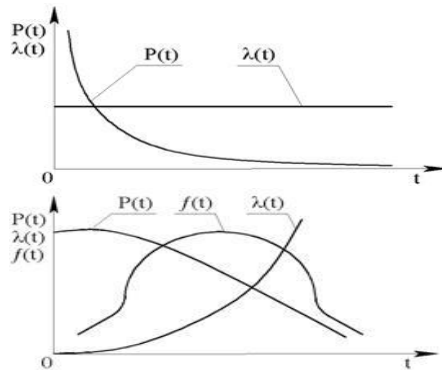
На машину впливають усі види енергії і спричиняють в ній оборотні та необоротні процеси, що знижують її працездатність.

Оборотні процеси (пружні деформації вузлів та деталей машин, зміна температури, вологості та ін.) тимчасово змінюють параметри деталей і машин у межах, що не виходять за допустимі значення.

Необоротні (знос, корозія) призводять до прогресуючого зниження характеристик (параметрів) машини.

За швидкістю проходження всі процеси можна поділити на три групи:

а) швидкоплинні – мають періодичність зміни в межах циклу: вібрацію вузлів, зміну сил тертя в рухомих з'єднаннях та ін.;



б) середньої швидкості – спричиняють зміну початкових параметрів машини (залежать від температури навколишнього середовища і самої машини, зносу різального інструменту, вологості та ін.);

в) повільні – проходять за час роботи машини між її оглядами або ремонтами (їх тривалість – дні, місяці). До них належать зношування, корозія та ін. Ці процеси впливають на точність, к. к. д. та інші параметри машини. Зміна параметрів відбувається дуже повільно.

Крім зовнішніх, на працездатність впливають і внутрішні процеси в машині. Всі вони мають випадковий характер.

Для створення методів розрахунку надійності машин застосовують моделі відмов, які базуються на різних уявленнях про виникнення і розвиток процесів, що призводять до відмови машин.

Розглянемо декілька моделей.

1 Параметрична модель. Стан машини характеризується сукупністю фізичних параметрів

$$x(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), \dots, x_n(t)\}$$

Параметри стану – це тиск, витрата, частота обертання, КПД. та ін. Частіше за все ці параметри взаємозв'язані, тому у моделі обмежуються одним або двома параметрами стану.

2 Модель зносу. Характерний параметр моделі – швидкість зносу  $V_{\text{зн}} = f(t)$ .

У процесі роботи машини відбувається знос поверхонь тертя. При цьому поступово змінюються форма і розміри деталей.

На характер зносу впливають: якість поверхонь, фізичні властивості матеріалу, наявність змащування та ін.

Швидкість зносу є функцією часу.

3 Модель «слабкої ланки». Деформація і руйнування деталей залежить від навантаження та міцності матеріалів, з яких вони виготовлені. Справедливою буде параметрична модель, в якій загальним параметром є навантаження  $Q$ , а параметром граничного стану – межа міцності  $\sigma_{\text{гр}}$ , тобто  $\sigma_{\text{гр}} = f(Q)$ .

Відмова відбудеться за умови, якщо  $\sigma > \sigma_{\text{гр}}$ .

### 3. Одночасний прояв раптових і поступових відмов

За час роботи гідравлічні машини витримують як поступові, так і раптові відмови. На початку їх експлуатації відбуваються раптові, а потім поступові відмови.

При одночасній дії цих відмов імовірність безвідмовної роботи визначається за теоремою множення ймовірностей

$$P(t) = P_p(t) \cdot P_{\Pi}(t)$$

Графічно ймовірність безвідмовної роботи має вигляд, наведений на рис. 2.

Для характеристики ймовірності відмов застосовується закон розподілу Вейбулла.

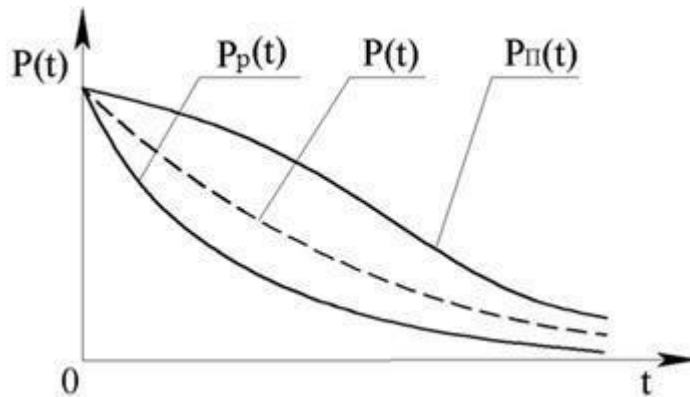


Рис. 2 – Імовірність безвідмовної роботи при одночасному прояві раптових і поступових відмов