

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

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Системи та обладнання авіаційної техніки»
вибіркових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

272 Авіаційний транспорт (Аеронавігація)

за темою №7 - Силкові системи і ротори ГТД

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

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

СХВАЛЕНО

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

ПОГОДЖЕНО

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

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

Розробники:

- 1. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Царенко Андрій Олександрович*
- 2. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, спеціаліст вищої категорії Пономаренко Анатолій Володимирович.*

Рецензенти:

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

План лекції

1. Визначення силової системи двигуна і її основні елементи. Силкові системи роторів. Силкові системи корпусів.
2. Вали і способи їх з'єднання між собою.
3. Призначення і конструкція опор ротора.
4. Типи, конструкція і принцип роботи ущільнень масляних порожнин опор.
5. Демпфірування коливань ротора.
6. Врівноваження роторів. Статичне і динамічне балансування ротора.

Рекомендована література:

Основна:

1. Кулик М.С., Тамаргазін О.А. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів. Київ: НАУ, 2009. 477 с.
2. Терещенко Ю.М. Газотурбінні двигуни літальних апаратів, Київ: Вища школа, 2000. 319 с.
3. Царенко А.О., Шмельов Ю.М. Модуль 15. Газотурбінний двигун (категорія В1). Конспект лекцій. Кременчук: КЛК ХНУВС, 2019. 810 с.

Допоміжна:

4. Aviation Maintenance Technician. Handbook–Powerplant. Volume 1.U.S. Department of Transportation. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service, 2012. 282 p.
5. Aviation Maintenance Technician. Handbook–Powerplant. Volume 2.U.S. Department of Transportation. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service, 2012. 280 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

6. Aviation Maintenance Technician. Handbook–Powerplant. U.S. Department of Transportation. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service, 2023. 500 p. URL.:https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/amt_powerplant_handbook.pdf (дата звернення 26.08.2023)
7. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: Helicopter Flying Handbook. URL.:https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/helicopter_flying_handbook (дата звернення 26.08.2023)
8. L'AVIONNAIRE: LES TURBOMACHINES. URL.: <https://lavionnaire.fr/MotoIntro.php> (дата звернення 26.08.2023)

Текст лекції

1. Визначення силової системи двигуна і її основні елементи. Силкові системи роторів. Силкові системи корпусів.

Силовою системою двигуна називають сукупність спеціальних силових деталей, з'єднаних між собою у певній послідовності, які сприймають всі

навантаження, що виникають у двигуні. Частина з яких замикається всередині, частина передається на вузли підвіски двигуна до ПС. У силову систему ГТД входить набір нерухомих та рухомих деталей - силова система статора та ротора. Силова система ротора з'єднується через підшипники опор із силовою системою статора, утворюючи силову систему двигуна.

Конструкція силових систем повинна мати міцність при мінімальній вазі, високу жорсткість, незмінність форм при навантаженнях, легкість монтажу і демонтажу, зручна для огляду і ТО.

Силові схеми роторів ГТД

У сучасних ГТД є від одного до трьох механічно не пов'язаних між собою роторів. Ротори турбокомпресорів складаються з деталей ротора компресора, деталей ротора турбіни та вузла їх з'єднання. У силовій схемі ротора аналізуються кількість і місце розташування опор, що визначаються масою та згинальної жорсткістю роторів і забезпечують мінімальні радіальні зазори між ротором і статором.

Загальною особливістю силових схем роторів є те, що осьова фіксація кожного ротора в корпусі здійснюється за допомогою одного радіально-упорного підшипника. На решті опор встановлюються радіально-опорні підшипники, що забезпечують можливість осьового переміщення ротора щодо статора. Така схема виключає утиск температурних і силових деформацій при зміні режиму роботи двигуна. Інша особливість у тому, що у опорах застосовують зазвичай підшипники кочення.

Залежно від числа опор розрізняють 2-х, 3-х та 4-опорні ротори.

Двохопорні ротори (рис. 1) застосовують зазвичай як ротори високого тиску підйомних двигунів, ДСУ та в інших випадках, коли кількість ступенів у турбіни і компресора, а також відстані між ними невеликі. Ротори турбіни та компресора з'єднуються у двоопорній схемі жорстко. Радіально-упорний підшипник розташований у передній частині ротора (у зоні нижчих температур). Друга опора розташована перед або за турбіною.

Схема 3-опорних роторів (рис. 9) набула більш широкого поширення. Ротор компресора встановлено на два, а ротор турбіни – на один підшипник (другим своїм кінцем він спирається на ротор компресора). Радіально-упорний підшипник зазвичай розташовується за компресором. Задня опора може розташовуватись як перед, так і за диском турбіни.

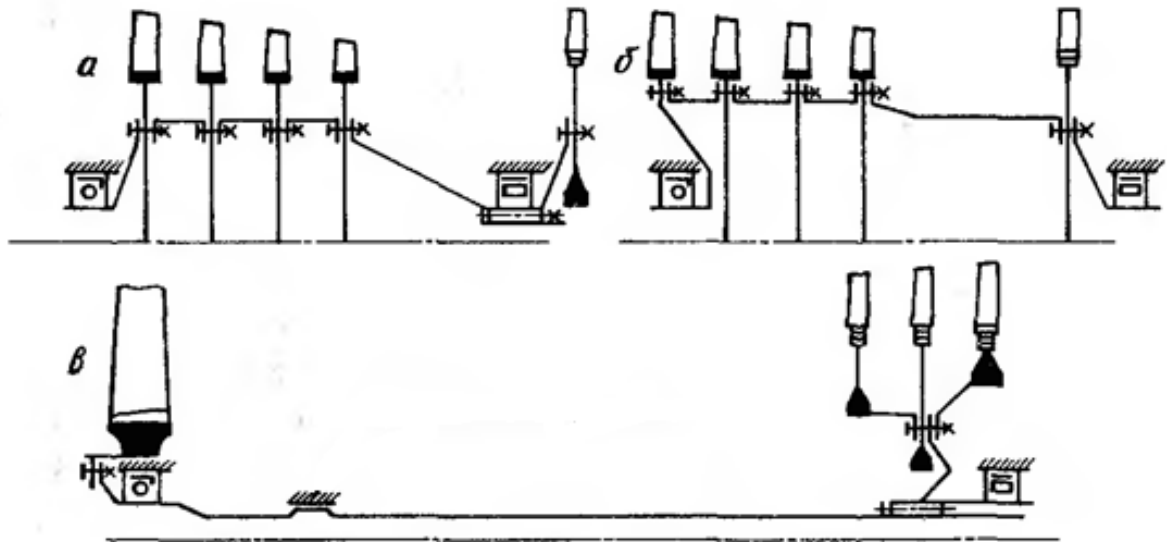


Рис. 1. Схеми 2-опорних роторів з переднім (а) та заднім (б, в) розташуванням підшипника турбіни

Чотирьохопорні ротори (рис. 3) застосовують при значній відстані між роторами турбіни і компресора і великій кількості їх ступенів. Кожен ротор розташовують на двох опорах із загальним для роторів турбіни та компресора кульковим підшипником.

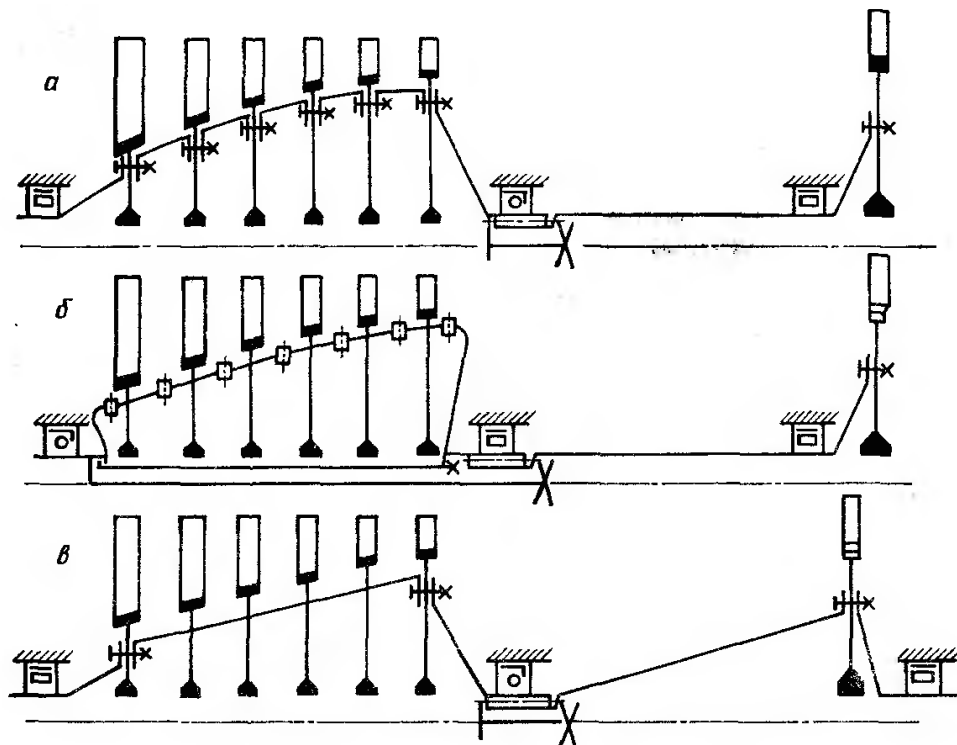


Рис. 2. Схеми триопорних роторів з переднім (а, б) та заднім (в) розташуванням підшипника турбіни

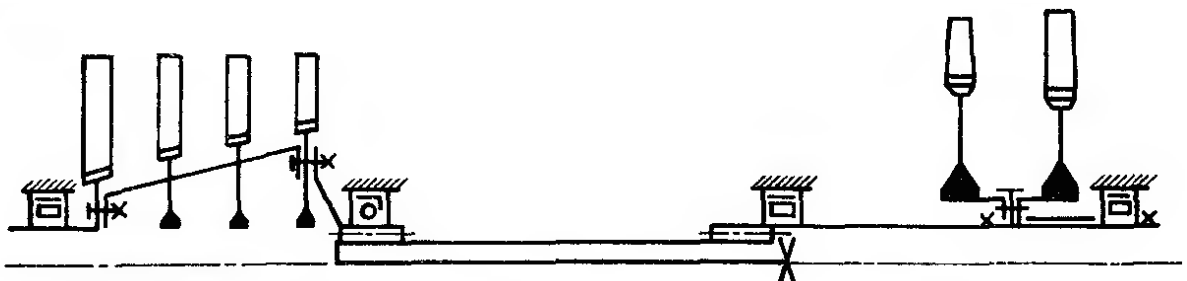


Рис. 3. Схема 4-опорного ротора

Силові схеми дво- та тривальних ГТД виконують за розглянутими вище схемами одновальних двигунів. Ротор високого тиску зазвичай двох- або триопорний, ротор низького тиску трьох- або чотирьохпорний. Особливістю багатовальних ГТД є наявність міжвальних підшипників, одна з обойм пов'язана з одним, а інша - з другим ротором.

Силові схеми корпусів ГТД

Силовая схема корпусу є системою зв'язаних нерухомих вузлів, яка сприймає навантаження, що діють у двигуні, і передає їх рівнодіючі через вузли підвіски на ПС. Силовий корпус двигуна складається з декількох корпусів опор (на які передаються навантаження від підшипників роторів), з'єднаних між собою корпусами компресора, камери згоряння, турбіни та зовнішнього контуру (ТРДД). До нього приєднуються елементи вхідного та вихідного пристроїв, а також коробки приводів та агрегати.

Класифікація силових схем корпусів виконується в залежності від способів силового зв'язку між турбіною та компресором.

Схема з *внутрішнім силовим зв'язком* (рис. 4,а) характеризується тим, що з'єднання корпусів турбіни та компресора здійснюється за допомогою внутрішньої стінки корпусу камери згоряння. Така схема застосовується при трубчастих камерах згоряння, що забезпечує можливість їхньої заміни в процесі експлуатації. Нині застосовується лише у ДСУ.

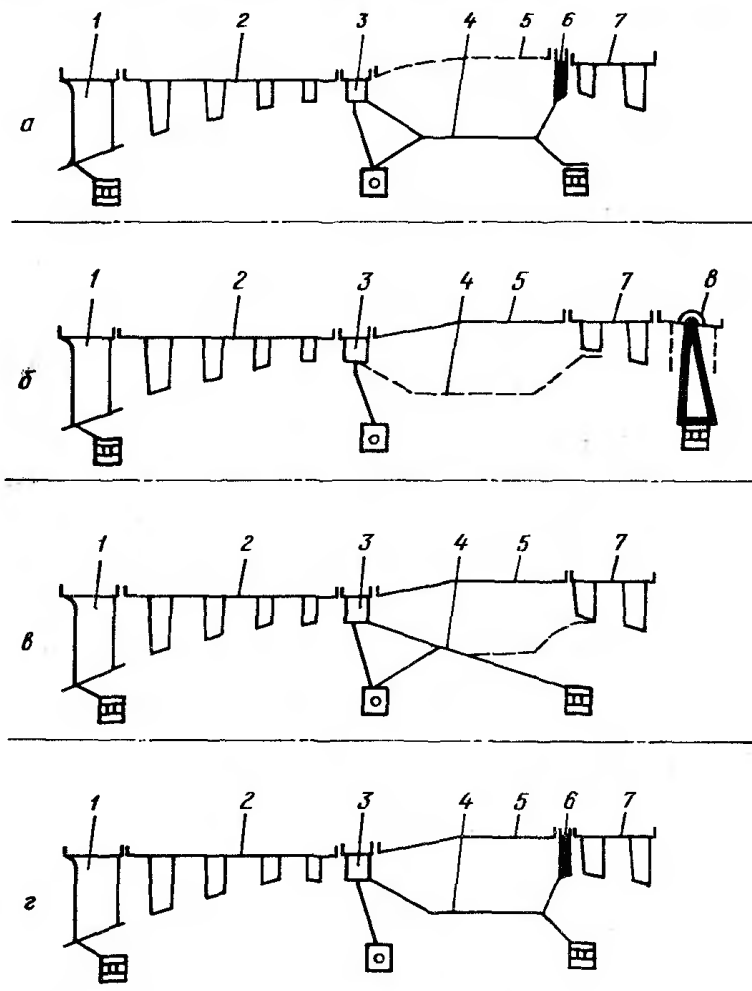


Рис. 4. Схеми силових корпусів ГТД із внутрішнім зв'язком (а), із зовнішнім зв'язком (б), з подвійним незамкненим зв'язком (в), із подвійним замкнутим зв'язком (г)

1-передній корпус компресора; 2 – корпус НА компресора; 3-задній корпус компресора; 4 - внутрішній корпус камери згоряння; 5 – зовнішній корпус камери згоряння; 6 – радіальні силові елементи корпусу передньої опори турбіни; 7 – корпус турбіни; 8 – корпус задньої опори турбіни

Схема із *зовнішнім силовим зв'язком* (рис. 4,б) відрізняється тим, що з'єднання корпусів компресора та турбіни

здійснюється зовнішнім корпусом камери згоряння. Завдяки більшому діаметру зовнішній корпус виявляється досить жорстким за порівняно малої маси. Схема із зовнішнім силовим зв'язком переважна при розташуванні задньої опори ротора за турбіною.

Схема з *подвійним силовим зв'язком* (рис.4, в, г) відрізняється найбільш повним використанням несучої здатності корпусів камери згоряння, так як корпуси турбіни та компресора з'єднані як внутрішнім, так і зовнішнім корпусами камери згоряння. Схема широко застосовується у різних типах ГТД

Силові схеми ТРДД мають низку особливостей. У конструкції корпусу ТРДД є три силові контури: внутрішній (внутрішній корпус камери згоряння), середній, що включає корпуси КВД, турбіни і зовнішній корпус камери згоряння, і зовнішній, утворений корпусом КНД і оболонками зовнішнього контуру. З'єднання внутрішньої, середньої та зовнішньої частин силової схеми здійснюється за допомогою радіальних силових елементів. Вони, як правило, є частиною корпусів опор.

Основу схеми силового корпусу тривального ТРД становить перехідний корпус. Спереду до його зовнішнього фланця кріпиться корпус вентилятора, а до внутрішнього - корпус передньої опори і КСД. Ззаду до перехідного корпусу приєднуються корпуси КВД, камери згоряння та турбіни.

2. Вали і способи їх з'єднання між собою.

Вали ГТД працюють у порівняно важких умовах. На них діють різні за величиною та характером статичні та динамічні навантаження. Крім того, вони піддаються тепловому впливу з'єднаних з ними нагрітих деталей.

Вал має бути досить міцним, жорстким, гранично легким, а також простим у виготовленні. Конструкція валів визначається типом двигуна, прийнятою силовою схемою, числом та розташуванням опор.

У ряді випадків складовою валу є барабан осьового компресора або крильчатка відцентрового. До крильчатки або барабана кріпляться цапфи.

Для зменшення ваги валів та забезпечення великої міцності та жорсткості при малій вазі їх виконують порожнистими, але за можливості рівномічними, з великим зовнішнім діаметром. З цією ж метою прагнуть зменшити відстань між опорами і довжину консолі, робити вали з меншою кількістю концентраторів напруг (шліців, різьбових ділянок, свердлінь, буртів, канавок під котрувальні пластини).

Крутний момент від турбіни до компресора, а у ТГД і до редуктора повітряного гвинта передається зазвичай через шліцеві з'єднання. На ротори компресора та турбіни діють осьові навантаження, спрямовані в протилежні сторони. Осьове фіксування їх між собою дозволяє застосовувати в силовій схемі ротора двигуна замість двох опорно-упорних підшипників один. Осьове фіксування може здійснюватися за допомогою сферичного з'єднання або різьбової втулки.

3. Призначення і конструкція опор ротора.

Опори ГТД служать для передачі зусилля від обертових роторів до

корпусів. Опори сприймають значні статичні і динамічні зусилля від валів двигуна. Вони повинні забезпечувати достатню жорсткість силової схеми двигуна і необхідне центрування валів у всьому діапазоні реалізованих навантажень.

Конструктивні елементи опор ГТД

Конструкції опор ГТД вельми різноманітні. Вони враховують індивідуальні особливості конкретного двигуна і практично не повторюються в різних розробках. Однак, при всьому конструктивному розмаїтті в конструкції опор завжди можна виділити групи елементів (або деталей), що мають єдине функціональне призначення.

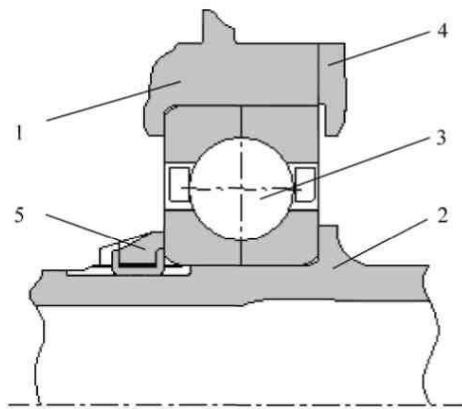


Рис. 5 - Опора ГТД

1 - статорна частина опори;
2 - роторна частина опори;
3 - підшипник; 4 - фланець; 5 - опорна гайка

У загальному випадку в своєму складі опора ГТД (див. рис. 5) обов'язково містить основні елементи - статорну і роторну частини і підшипник. Статорна (корпусна) частина 1 опори - передає зусилля від нерухомого кільця підшипника на корпус двигуна. Роторна частина 2 опори - передає зусилля від ротора двигуна на рухоме кільце підшипника. Підшипник 3 опори - сполучає рухливий ротор і нерухомий корпус, передає зусилля від роторної до статорної частини.

Всі ці елементи опори є силовими, вони забезпечують передачу зусиль від ротора на статорних частини двигуна.

Крім силових елементів до складу опори можуть входити окремі елементи систем забезпечення працездатності підшипника, а саме:

- деталі ущільнень олійної порожнини;
- деталі системи змащення підшипника;
- деталі наддуву ущільнень олійної порожнини;
- деталі системи охолодження опори.

Деталлями і вузлами двигуна навколо кожної опори створюється замкнутий простір, в якому організована подача масла на підшипники і відкачка масла. Цей замкнутий простір називається *масляною порожниною* опори. Нерідко конструкція двигуна передбачає одну масляну порожнину для декількох опор.

Статорна частина опори

На статорній частини опори розташоване посадкове місце нерухомого кільця підшипника.

Можна виділити дві основні групи опор: жорсткі опори та опори з пружними елементами, розміщеними під нерухомим кільцем підшипника.

Жорсткі опори підшипника, що входять в статор двигуна, можуть бути одним цілим з корпусом вузла двигуна, в якому розміщена опора або можуть

мати самостійний корпус.

При необхідності відбудови від резонансів згинальних коливань ротора або для компенсації неспівісності опор при багатоопорних схемах роторів ГТД в безпосередній близькості від нерухомого кільця підшипника можуть розміщуватися пружні, демпферні (сухі або масляні) або пружно-демпферні елементи.

На роторній частині опори розташоване посадкове місце рухомого внутрішнього кільця підшипника. Крім цього на роторній частині опори можуть бути розташовані деталі підвода масла, якщо подача мастила організована через внутрішнє кільце підшипника.

Підшипники

Підшипники є найбільш відповідальними елементами опор ГТД - саме в них відбувається безпосередній силовий контакт між ротором і статором двигуна.

В сучасних ГТД, в основному, застосовуються підшипники кочення, що володіють в порівнянні з підшипниками ковзання рядом переваг: меншим коефіцієнтом тертя, більшою стійкістю до потрапляння забруднень і роботі з перекосом, меншими розмірами по довжині, меншою потребою в мастилі, можливістю роботи в широкому діапазоні частот обертання

Підшипники ковзання в ГТД застосовуються в конструкції окремих елементів двигуна і агрегатів повітряної та масляної систем - в тих місцях, де потрібна конструктивно забезпечити мінімальні радіальні розміри в зонах пар тертя (поворотні лопатки компресора, шестерні насоси маслосистеми, заслінки повітряних систем і т.д.).

Підшипники кочення класифікують за такими ознаками:

- 1) за напрямом сприйманого навантаження щодо осі вала - радіальні, радіально-упорні, упорні;
- 2) за формою тіл кочення - кулькові, роликові.

В опорах роторів ГТД застосовуються, як правило, однорядні кулькові - для сприйняття радіальних і осьових навантажень і однорядні роликові - для сприйняття радіальних навантажень, підшипники з сепараторами. Наявність сепаратора дозволяє розподілити тіла кочення (кульки, ролики) рівномірно по окружності. При цьому виключається їх взаємне зачіпання (тертя) і забезпечується стабільний процес розподілу навантаження.

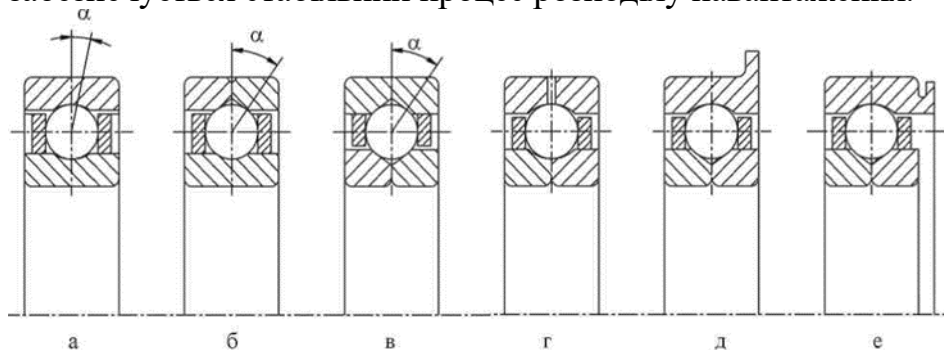


Рис. 6 Типи і особливості кулькових підшипників, застосовуваних у ГТД
а) двоточковий;
б) триточковий з роз'ємним зовнішнім кільцем;

в) чотирьохточковий з роз'ємним внутрішнім кільцем;

- г) з підведенням масла через зовнішнє кільце;
- д) з фланцевим кріпленням зовнішнього кільця до корпусу опори;
- е) з технологічним буртом для демонтажу

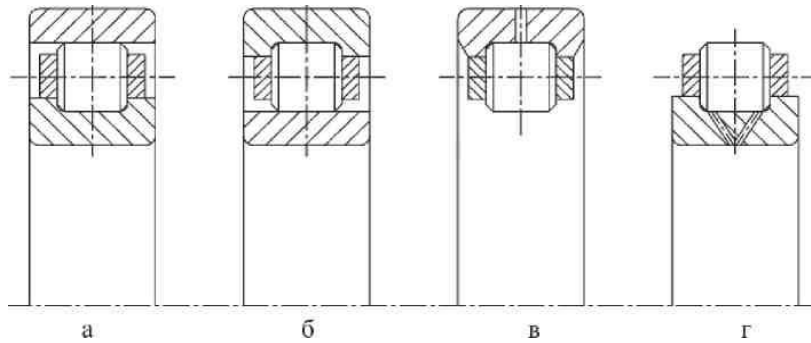


Рис. 7. Типи роликів підшипників, застосовуваних у ГТД

- а) з фіксацією роликів на внутрішньому кільці;
- б) з фіксацією роликів на зовнішньому кільці;
- в) без внутрішнього кільця, з підведенням масла через зовнішнє кільце;

г) без зовнішнього кільця, з підведенням масла через внутрішнє кільце.

Елементи систем забезпечення працездатності підшипників

Надійна і безвідмовна робота підшипників роторів ГТД забезпечується організацією подачі масла в вузли опор. Масло, що подається на підшипники залежно від розміру підшипника, частоти обертання ротора, місця розташування і величини сприйманих їм навантажень, призначене не тільки для змащування частин, а й для відводу від них тепла.

Максимальна ефективність роботи підшипника досягається при постійній наявності масляної плівки між поверхнями контакту зовнішнього та внутрішнього кільця і тілами кочення. Для того, щоб виконати цю умову і забезпечити постійну наявність масляної плівки бажано забезпечити пряму і безперервну подачу масла на контактуючі поверхні.

Практика показує, що для цієї мети краще подавати масло у вигляді цівки через калібровані отвори в зазор між внутрішнім кільцем підшипника і сепаратором (*спосіб струменевого подавання*). В цьому випадку масло добре омиває робочу поверхню внутрішнього кільця, поверхні тіл кочення, під дією відцентрових сил потрапляє на бігову доріжку зовнішнього кільця, омиває її і перетікає в масляну порожнину опори.

4. Типи, конструкція і принцип роботи ущільнень масляних порожнин опор.

Ущільнення масляних порожнин бувають контактними і безконтактними. До *контактних* ущільнень відносяться: металеві кільцеві, радіальні секційні графітові, торцеві контактні ущільнення (ТКУ), радіально-торцеві контактні ущільнення (РТКУ). Вони забезпечують необхідну герметичність масляних порожнин опор роторів ГТД, володіють незначними втратами на тертя і необхідною надійністю, але по-різному чутливі до перепадів тисків і температури навколишнього повітря, до величини окружної швидкості ковзання в контакті.

До *безконтактних* ущільнень відносяться: лабіринтові ущільнення, торцеві графітові безконтактні, мастиловідгонні гвинтові втулки у вигляді багатозаходної різьби, масловідражальні кільця.

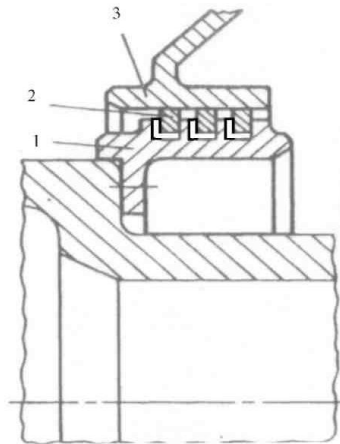


Рис.8 Контактне металеве кільцеве ущільнення
1 - кільцеутримувач; 2 - розрізні пружні кільця; 3 – втулка

Лабіринтові ущільнення зазвичай використовують спільно з контактними ущільненнями. Цими ущільненнями створюються проміжні повітряні (повітромасляні, передмасляні) порожнини, тиск в яких повинен бути вище тиску в масляній порожнині на певну величину (рекомендується 0,05 ... 0,08 МПа). Величина перепаду тисків забезпечується наддуванням повітряної порожнини повітрям від компресора двигуна та суфлюванням мастильної порожнини. В залежності від розташування опори повітря подається в передмасляну порожнину по зовнішньому трубопроводу і потім скидається через лабіринтне ущільнення у проточну частину або потрапляє в порожнину через лабіринтне ущільнення з проточної частини компресора і скидається по зовнішньому трубопроводу на зріз вихідного пристрою.

Конструкція контактного металевого кільцевого ущільнення представлена на рис.8. В канавках кільцеутримувача 1 розміщуються нерухомі розрізні пружні кільця 2, щільно притиснуті силою пружності до нерухомої втулки 3. Число кілець зазвичай не перевищує трьох. Перетіканню масла з масляної порожнини і проникненню в неї повітря або газу ззовні перешкоджає бічне прилягання кільця до бічної поверхні канавки за рахунок перепаду тисків між повітряною і масляною порожнинами.

У конструкціях сучасних ГТД замість металевих кілець ущільнювачів знаходять застосування графітові ущільнення різних типів, що відрізняються більшою надійністю і помірним зносом при більш високих навантаженнях.

5. Демпфірування коливань ротора.

Конструкції демпферних опор дуже різноманітні, але незалежно від цього вони виконують дві основні функції:

- знижують жорсткість опори ротора, що призводить до зміни пружної динамічної системи двигуна. Цим знижуються частоти своїх коливань системи, усуваються резонанси на робочих режимах;

- поглинають енергію коливань динамічної системи двигуна, перетворюючи її на тепло, що не дозволяє розвиватися великим амплітудам коливань, динамічним навантаженням і напругам в усіх деталях двигуна.

В даний час в авіаційних двигунах застосовуються три основні типи демпферних опор:

- з гідродинамічним демпфером;
- з гідродинамічним демпфером та пружним елементом типу “біличне колесо”;
- з пружним кільцем.

В *опорі з гідродинамічним демпфером* демпфуючим елементом є тонка масляна плівка товщиною 0,1...0,3 мм, розташована між зовнішнім кільцем підшипника і його корпусом. Олія під тиском подається в зазори демпфера з кільцевої канавки (іноді через кілька отворів, рівномірно розташованих по колу). При роботі двигуна в олійній плівці виникає гідравлічна сила і олійна плівка може передавати радіальні навантаження з боку ротора на корпус. Одночасно гідравлічна сила перешкоджає прецесії ротора в опорі, тобто з'являється сила опору, або сила, що демпфує.

Переваги таких опор - компактність, надійність у роботі, високе демпфування та несуча здатність. Недоліки - опора починає працювати лише з певної частоти обертання ротора, за відсутності обертання ротор нецентрований, зазор між лопатками і корпусом має бути більшим за зазор у демпфері.

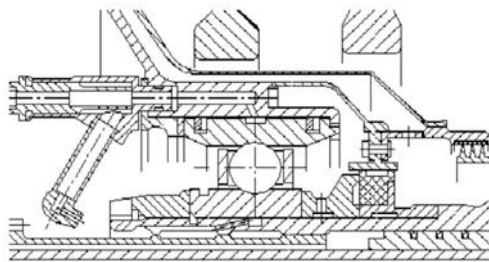


Рис. 9. Опора з гідродинамічним демпфером

Опори з гідродинамічним демпфером та пружним елементом (“біличне колесо”) найчастіше використовуються у двигунах транспортної чи комерційної авіації (рис.10). Назва “біличне колесо” виникла внаслідок зовнішньої подібності її пружного елемента з колесом у клітинах для білок. Пружний елемент опори (рис.10) є втулкою з великою кількістю прорізів. Втулка з одного боку жорстко кріпиться до корпусу, з іншого боку до неї вставляється підшипник ротора. Між зовнішньою поверхнею втулки (у тому місці, де встановлений підшипник) та корпусом передбачається зазор Δ . Демпфером опори є тонкий масляний шар між втулками.

Переваги таких опор - постійна жорстка характеристика у всіх робочих діапазонах; можливість передачі великих осьових зусиль; надійність у роботі; високе демпфування; наявність математичних моделей до розрахунку динамічних характеристик; ротор центрований за відсутності обертання. Недоліки - збільшені габарити та маса опори; нелінійна демпфуюча характеристика.

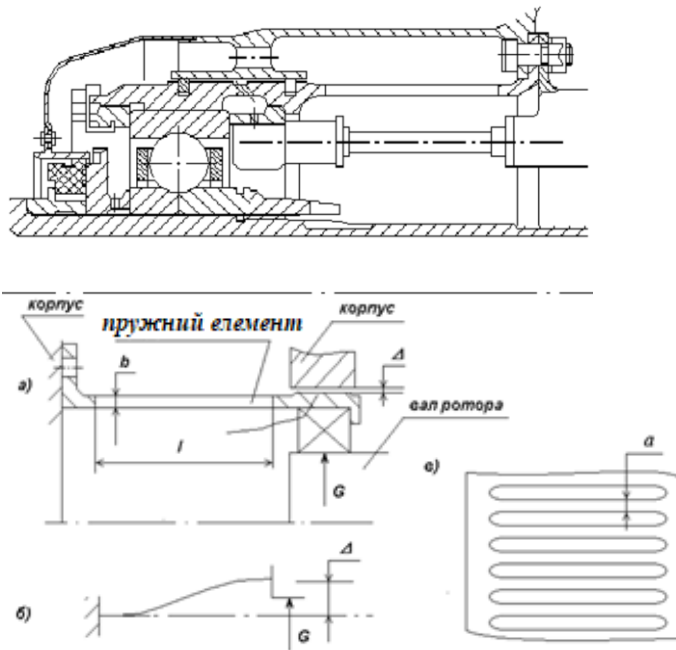


Рис.10. Демпферна опора з пружним елементом типу “білічне колесо”

а - конструктивна схема та основні розміри; б - схема роботи балок при навантаженні опори; в - розгортка пружного елемента

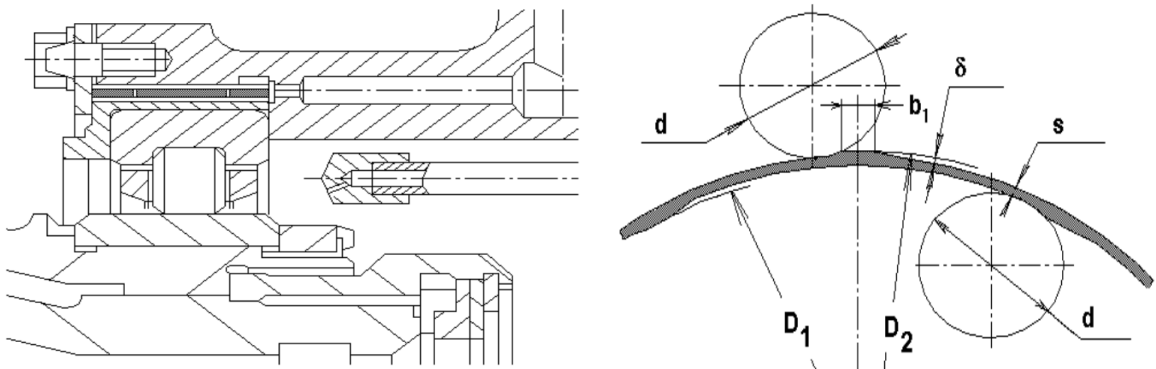


Рис. 11. Демпферна опора з пружним кільцем

Демпферна опора з *пружним кільцем* застосовується для двигунів, встановлених на ПС, що зазнають великих еволюційних навантажень (рис. 11). Основним пружним елементом опори є тонкостінне кільце, що встановлюється в зазор між корпусом і зовнішнім кільцем підшипника (рис.11). Кільце має виступи, рівномірно розташовані по колу на зовнішній та внутрішній його поверхнях у шаховому порядку. Виступи разом з іншими деталями опори утворюють гідравлічні порожнини, куди постійно подається олія. Під дією радіальних навантажень пружні ділянки кільця деформуються та виникає пружна реакція на підшипник. Олія передавлюється з однієї порожнини в іншу через щілини і калібровані отвори в кільці, в результаті чого створюється демпфуючий ефект.

До переваг демпферних опор з пружними кільцями відносяться: малі габарити та маса; лінійна жорстка характеристика; ротор центрований щодо осі двигуна; високі демпфуючі властивості; наявність галузевого стандарту на

пружні кільця, який дозволяє досить легко підібрати розміри кільця, включає методики для розрахунку податливості та міцності кілець. Серед недоліків - необхідність забезпечити високу точність усіх розмірів та посадкових місць; необхідність доведення у складі двигуна.

6. Врівноваження роторів. Статичне і динамічне балансування ротора.

Ротор двигуна вважається повністю врівноваженим, якщо на встановленому режимі роботи його опори відчують дію постійних за величиною та напрямом навантажень (сил, моментів).

У реальних роторах ГТД при їх обертанні завжди діють інерційні сили та моменти від неврівноважених мас, які є наслідком неточності виготовлення, неоднорідності матеріалу, пружних та залишкових деформацій елементів ротора. Ці навантаження передаються на опори, додатково навантажуючи підшипники, і викликають вібрацію двигуна, літака, ослаблення стиків, течії в місцях з'єднання трубопроводів, додатковий шум і втому екіпажу та пасажирів.

Врівноважування роторів ГТД зводиться до врівноважування у них мас, що обертаються.

При *статичній неврівноваженості* ротора (рис. 12, а) його центр тяжіння не лежить на осі обертання, а зміщений від неї на відстань e . При обертанні такого ротора виникає неврівноважена відцентрова сила $P_{цн}$ постійна за величиною, але змінна за напрямом. Статичне врівноважування зводиться до суміщення центру ваги ротора з віссю обертання.

При *динамічній неврівноваженості* ротора (рис. 12, б) виникають неврівноважені інерційні сили і моменти від цих сил. Загальний центр тяжкості лежить на осі обертання, тому такий ротор є статично врівноваженим. Однак при обертанні виникає неврівноважена пара відцентрових сил з моментом M_H навколо точки S постійним за величиною, але змінним за напрямом. Динамічна неврівноваженість може бути виявлена лише при обертанні.

На рис. 12, в показаний загальний випадок неврівноваженості, коли загальний центр тяжкості обертових мас ротора не збігається з віссю обертання, тобто такий ротор статично і динамічно неврівноважений.

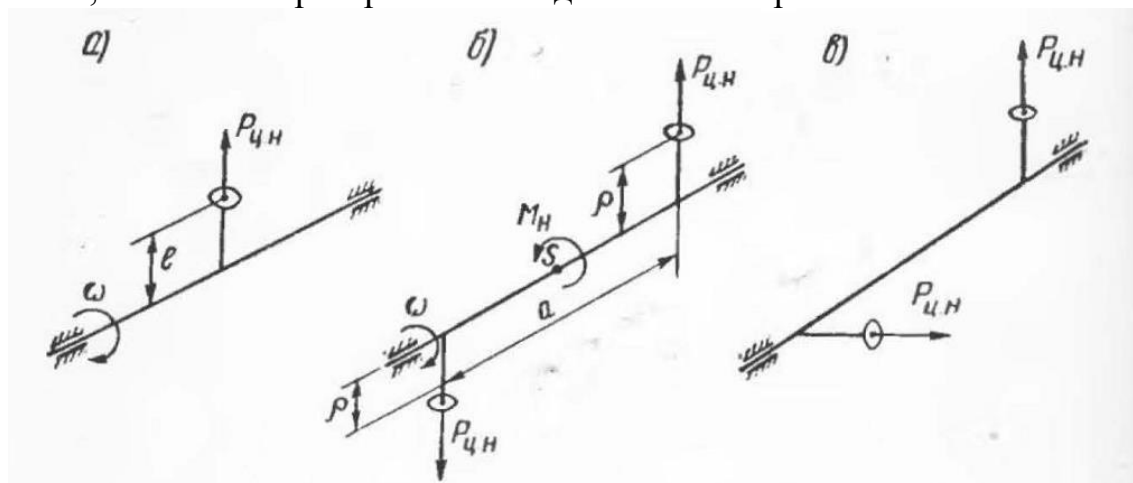


Рис. 12. Види неврівноваженостей ротора:

а-статична; б-динамічна; в - загальний випадок невірноваженості

Статичне балансування. Якщо на паралельні гострі ножі покласти вал з тонким диском, у якого центр тяжіння зміщений щодо осі на величину e (рис. 13), то момент від сили ваги щодо осі обертання змусить диск повертатися і котитися ножами до положення стійкої рівноваги, при якому центр тяжкості диска розташується під віссю обертання в найнижчій точці.

Для усунення статичної невірноваженості необхідно помістити врівноважуючий вантаж G_b на тому ж діаметрі, на якому лежить ц. т. диска, але з іншого боку від осі обертання. Величина вантажу G_b і відстань його r від осі обертання повинні бути обрані так, щоб невірноважена відцентрова сила диска і відцентрова сила від вантажу, що врівноважує, були рівні.

Величина δ , що дорівнює добутку ваги диска G_d на ексцентриситет ц. т. або добутку ваги вантажу, що врівноважує, на відстань r від осі обертання, називається *статичним дисбалансом*. Дисбаланс характеризує ступінь статичної невірноваженості.

Статичне балансування може здійснюватися зняттям матеріалу з важкого боку диска.

Динамічне балансування проводять у заводських умовах на спеціальних машинах, які дозволяють визначити величину та місце розташування балансувального вантажу в кожній площині приведення.

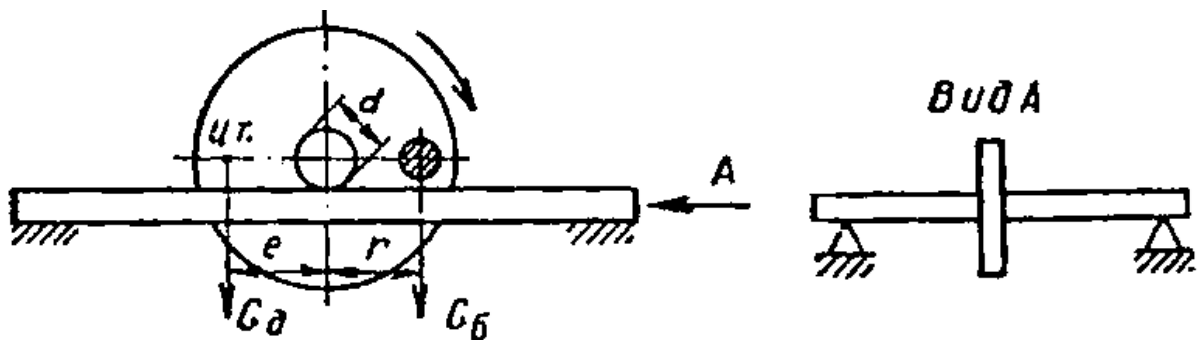


Рис. 13. Статичне балансування ротора