

**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 № 3 - Компресори

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. Призначення, типи і конструктивні елементи компресора.
2. Ротори компресора, їх призначення і типи.
3. Конструктивне виконання і порівняльна характеристика різних типів роторів.
4. Сили, діючі на ротор і викликаємі напруги.
5. Робочі лопатки, вимоги, призначення, конструкція і основні геометричні параметри.
6. Способи кріплення і осьової фіксації робочих лопаток роторів.
7. Сили, діючі на лопатки і викликаємі ними напруги.
8. Розвантаження лопаток від газових сил.
9. Коливання лопаток і демпфірування коливань.
10. Статори компресорів, їх призначення, конструктивні елементи.
11. Типи корпусів та їх конструкція.
12. Вхідні напрямні апарати, напрямні і спрямні апарати.
13. Сили, діючі на статор.
14. Зазор в проточній частині компресора. Ущільнення повітряного тракту компресора.
15. Розвантаження ротора компресора від вісьових сил.
16. Відцентрові компресори, принцип роботи, область використання. Ротори і корпуси відцентрованих компресорів.
17. Матеріали для деталей компресора.

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: КЛІК 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_police

- [s/handbooks_manuals/aviation/amt_powerplant_handbook.pdf](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/MotorIntro.php> (дата звернення 26.08.2023)

Текст лекції

1. Призначення, типи і конструктивні елементи компресора.

Компресор є одним з основних вузлів ГТД. Він здійснює стиснення повітря перед надходженням його в камеру згоряння. Компресор забезпечує необхідний ступінь підвищення тиску повітря p_k при заданому його витраті G_v . Компресор складається зі статора і ротора.

2. Ротори компресора, їх призначення і типи.

Ротор – це обертова частина компресора, яка перетворює механічну енергію в енергію тиску потоку повітря. Він включає в себе: робочі лопатки; диски (чи барабан), на яких закріплені робочі лопатки; вал або цапфи, за допомогою яких ротор опирається через підшипники на силових корпус двигуна; елементи кріплення дисків між собою і дисків з валом або цапфами. За конструкцією застосовують ротори барабанного, дискового і барабанно-дискового (змішаного) типу.

3. Конструктивне виконання і порівняльна характеристика різних типів роторів.

Ротор *барабанного* типу (Рис. 1, а) являє собою циліндричний або конічний барабан 2, виготовлений з алюмінієвого сплаву, титану або сталі, на якому в поздовжніх чи кільцевих пазах закріплені робочі лопатки 1. Дві кришки 3 закривають барабан з торців і мають цапфи, якими ротор спирається на підшипники 4. Крутний момент до кожної ступені передається через стінку барабана.

Перевагами ротора барабанного типу є:

- простота конструкції;
- низька питома маса;
- велика згинальна і крутильна жорсткість;
- висока критична частота обертання;
- висока вібраційна стійкість.

До недоліків ротора барабанного типу слід віднести:

- порівняно невисоку несучу здатність барабана;
- низьку робочу окружну швидкість - не більше 200 м / с.

Ротори барабанного типу для авіаційних двигунів були запозичені з конструкцій компресорів для парових турбін.

Ротор *дискового* (Рис.1,б) типу має з'єднані з валом 6 диски 5, на периферії котрих кріпляться робочі лопатки 1. Диски стягнуті в єдиний пакет гайками, які накручені на вал. З'єднання дисків з валом здійснюється шляхом напресування на конічний або ступінчастий вал, а також за допомогою шліців або кулачків.

Перевагами ротора дискового типу є:

- велика несуча здатність дисків;
- висока робоча окружна швидкість - до 400 м / с.

Ступені компресора з дисковими роторами є висконапорними і застосовуються в ГТД з великими ступенями підвищення тиску повітря. Крутний момент до кожної ступені передається через вал.

Недоліками ротора дискового типу є:

- порівняно невелика згинальна і крутильна жорсткість;
- невисока критична частота обертання;
- висока питома маса;
- складність конструкції.

Зниження згинальної жорсткості ротора дискового типу в порівнянні з ротором барабанного типу призводить до зниження критичної частоти. Для підвищення критичного числа оборотів збільшують необхідний перетин валу ротора, але при цьому збільшується і маса компресора.

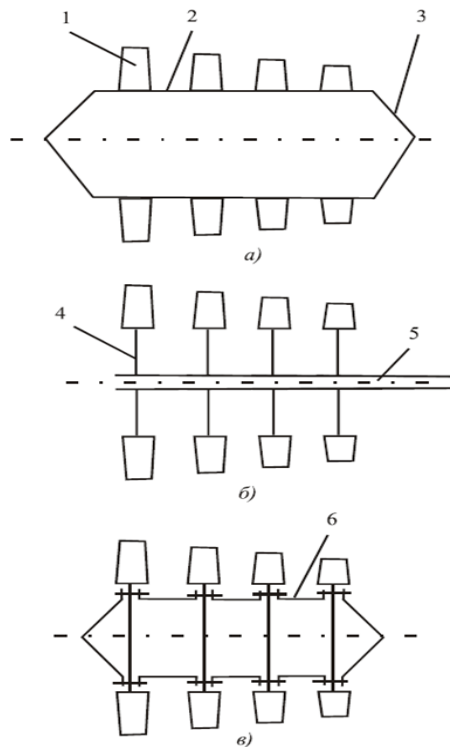


Рис. 1. Ротори

Конструкцією, що поєднує в собі переваги роторів барабанного і дискового типу, є ротор *змішаного* типу (Рис. 1, в). В даному випадку окремі секції, що мають диски 5 і барабанні секції 7, з'єднуються між собою. Причому з'єднання робиться на такому радіусі, де окружна швидкість невелика і допускається за умовами міцності барабана.

Ротор барабанно-дискового типу, поєднуючи в собі переваги роторів барабанного типу (велика згинальна жорсткість при малій вазі) і роторів дискового типу (висока міцність), знайшов широке застосування в багатьох сучасних серійних газотурбінних двигунах.

4. Сили, діючі на ротор і викликаємі напруги.

Відцентрові сили відчувають переважно барабани і диски. Під дією цих сил у матеріалі барабанів і дисків виникають напруги розтягування. Барабан подібно кільцю під дією відцентрових сил власних мас і мас лопаток прагне розірватися утворюючим. Сили власної ваги ротора діють у площині, що проходить через вісь двигуна, і викликають вигин ротора.

При розгоні або гальмуванні літака з'являється осьова сила інерції, що навантажує ротор двигуна і передається на корпус через підшипник.

Гіроскопічний момент виникає при відхиленні траєкторії від прямолінійної та викликає вигин ротора.

5. Робочі лопатки, вимоги, призначення, конструкція і основні геометричні параметри.

Конструктивно робоча лопатка складається з профільної частини (пера) 1 (рис. 2) і замка 2. Профільна частина лопатки обтікається дозвуковим або надзвуковим повітряним потоком і від її аеродинамічних якостей залежить ступінь підвищення тиску і к.к.д. компресора.

Спрофільована за певним законом робоча лопатка має аеродинамічну та геометричну крутку. Аеродинамічна крутка є зміною кривизни профілю лопатки по радіусу для забезпечення необхідного закону зміни дифузорності міжлопаткових каналів по висоті лопатки. Геометрична крутка здійснюється шляхом зміщення перерізів лопатки по висоті на певний кут щодо кореневого перерізу відповідно до закону зміни трикутників швидкостей по радіусу.

До робочих лопаток осьових компресорів пред'являються такі вимоги:

- хороші аеродинамічні якості профільної частини: велика підйомна сила, малий лобовий опір та можливість працювати без зриву у широкому діапазоні зміни кутів атаки;
- висока механічна міцність;
- висока точність виготовлення та чистота обробки поверхні;
- прийнятні вібраційні характеристики, що виключають можливість виникнення вібрацій лопаток з великими амплітудами в діапазоні робочих швидкостей обертання ротора двигуна.

Геометричні параметри робочої лопатки:

довжина лопаток l лежить у межах 25-280 мм;

хорда лопатки b вибирається залежно від довжини лопатки;

густота решітки $(b/t)_k$, яка визначається відношенням хорди лопатки до кроку решітки;

крок решітки t , який є відстанню між однойменними точками профілів

сусідніх лопаток, розташованих на одному радіусі. Величина кроку решітки визначається вибраним значенням хорди і обраної раніше густоти решітки;

відносна товщина профілю c , яка визначається відношенням максимальної товщини профілю до його хорди: $c = 0,025 \dots 0,03$ - в периферійних перерізах і $c = 0,07 \dots 0,08$ - і корневих перерізах;

подовження лопаток це відношення довжини лопатки до хорди на середньому радіусі. Перші ступені компресорів мають подовження лопаток не більше $2,5 \dots 3$.

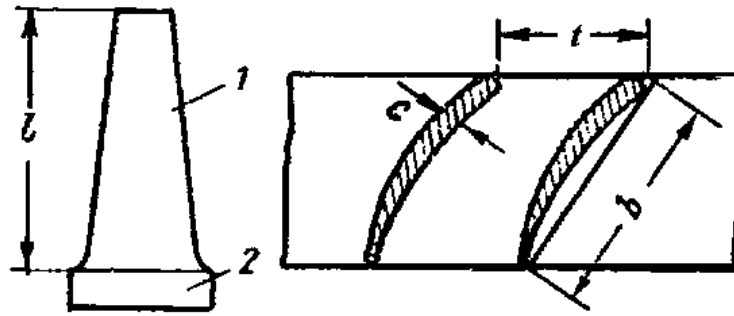


Рис. 2. Геометричні параметри лопатки:

а- загальний вигляд; б-перетину; l - Довжина лопатки; t - крок решітки; b - хорда профілю; c -максимальна товщина профілю

6. Способи кріплення і осьової фіксації робочих лопаток роторів.

З'єднання лопаток з ротором повинно відповідати таким вимогам: висока міцність; можливість точної установки лопаток; легкий монтаж та демонтаж лопаток; простота виготовлення; можливість розміщення найбільшої кількості лопаток; невелика вага. Найбільшого поширення набуло кріплення лопаток у поздовжніх пазах.

Трапецієподібні замки («ластівчин хвіст») (рис. 3, а) мають форму рівнобічної трапеції. Хвостовик лопатки встановлюється з нульовим натягом, але частіше застосовується вільна посадка, яка забезпечує більш легку установку і знімання лопатки, а також кращі властивості, що демпфують. Пази для кріплення лопаток зазвичай розміщують під кутом до осі ротора, що дозволяє розмістити більшу кількість лопаток на робочому колесі. Замок типу «ластівчин хвіст» відрізняється простотою конструкції, має малу масу та достатню міцність.

Ялинкові замки (рис. 30 б) застосовують в компресорах рідко - зазвичай на останніх щаблях багатоступінчастих компресорів. Лопатки при цьому працюють при підвищених температурах і значних навантаженнях і має місце вирівнювання навантажень у зубцях з'єднань за рахунок пластичних деформацій матеріалу.

Зубчасті замки з трикутними виступами (рис. 3, в) застосовують у барабанних роторах з кільцевими пазами через легкість виготовлення зубів у пазах барабана фасонними різцями.

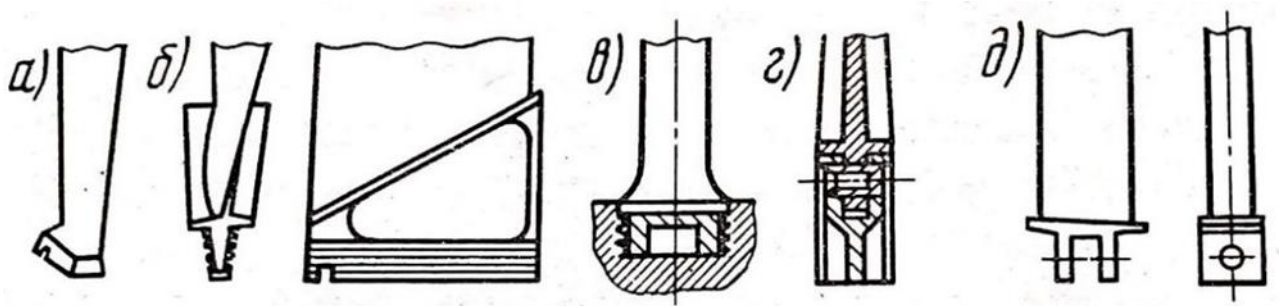


Рис. 3. Типи з'єднань лопатки з ротором

Штифтові та вильчасті замки (рис. 3, г і д) застосовують у дискових роторах. У цьому випадку в диску роблять один кільцевий паз, якщо штифтовий замок, два або кілька кільцевих пазів, в які входять вушка замкової



частини лопатки, якщо замок вильчастий. Вушка з'єднуються з диском осьовими штифтами, які сприймають відцентрові сили всієї маси лопатки і працюють на зріз. Їх фіксують від осевого переміщення розвальцюванням або розкернуванням. Перевага - велика демпфуюча здатність. Недоліки: складність у виробництві, велика вага.

Рис. 4 - Моноколесо (Бліск) осевого компресора

Однією з головних задач при проектуванні роторів є поєднання мінімальної маси конструкції з максимальним ресурсом і надійністю. Традиційні конструкції роторів на сучасному етапі практично вичерпали свій ресурс в області зниження маси. Єдиним шляхом залишається використання нових легких матеріалів, включаючи інтерметаліди.

Водночас сучасний розвиток технологій різання, дифузійного зварювання тощо відкрило нові шляхи у вирішенні цього непростого завдання. Так, наприклад, використання в роторі будь-якого типу моноколес (БЛІСК) (див. Рис. 4) дозволяє домогтися зниження маси конструкції до 25% від початкового і підвищити критичне число обертів. Моноколесо - це робоче колесо, в якому лопатки виконані з диском за одне ціле.

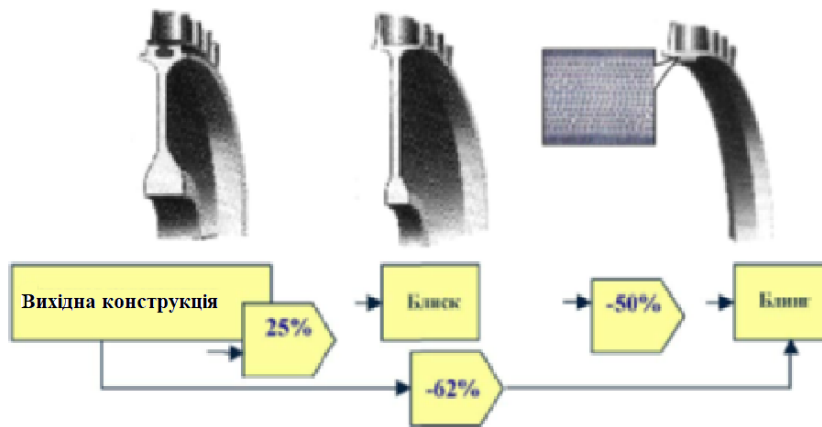


Рис. 5 - Зниження маси робочих коліс оптимізацією їх конструкції

Подальшим розвитком цієї ідеї є ротори, виготовлені із застосуванням технології «блінг». «Блінг» - це робоче кільце, в якому лопатки виконані з диском за одне ціле (Рис. 5). По внутрішній поверхні таке кільце армовано металокомпозитною матрицею, яка підвищує його несучу здатність.

Способи осьової фіксації робочих лопаток

Якщо утворювальна ротора та її вісь становлять значний кут, що притаманно першим і середнім ступеням компресора, то складова відцентрової сили, що діє на лопатку P_l (рис. 6, а), має велике значення. Сила P_l прагне перемістити лопатку вздовж паза. Величина цієї сили може бути більше сили тертя у замку.

Чим більший кут при заданій $P_{ц.л.}$, тим більше сила P_l і тим міцніше повинен бути фіксатор, що попереджає переміщення лопатки вздовж паза.

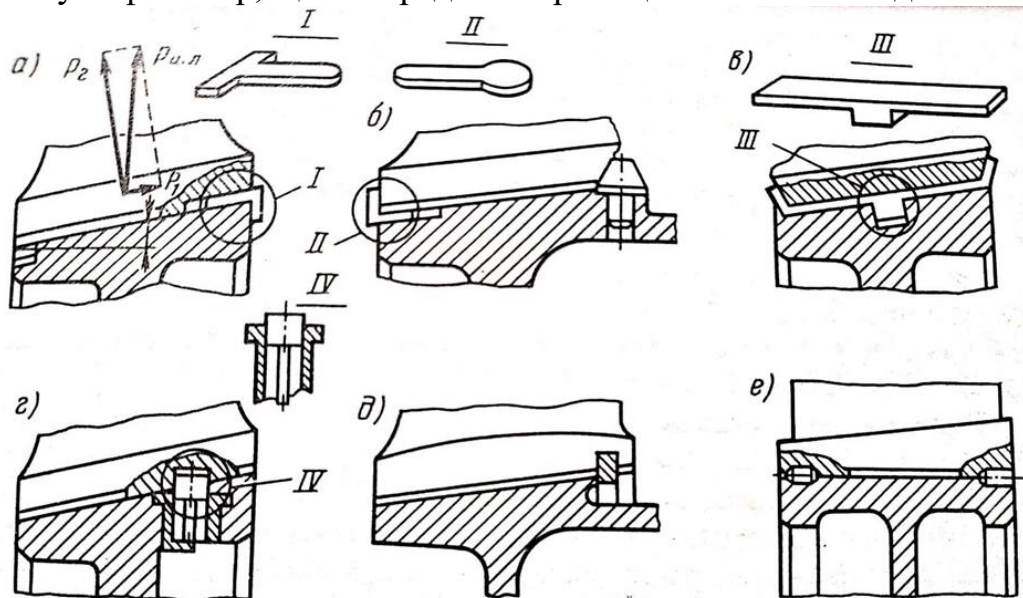


Рис. 6. Способи фіксації лопаток в осьовому напрямку

При великих кутах застосовують фіксацію:

- за допомогою спеціального виступу в лопатці та пластини (рис. 6, а);
- за допомогою штифта та пластини (рис. 6, б).

При невеликих кутах (наприклад на останніх щаблях) застосовують фіксацію:

- за допомогою пластини, що відгинається на дві сторони (рис. 6, в);
- за допомогою пружинного розрізного кільця одночасно всіх лопаток робочого колеса (рис 6, д).

Застосовують також фіксацію штифтами, які встановлюються во втулці (рис. 6, г) або осьовими штифтами (рис. 6, е).

7. Сили, діючі на лопатки і викликаємі ними напруги.

Робочі лопатки компресора і турбіни входять до тих деталей, які переважно визначають надійність і ресурс двигуна. Ці лопатки працюють у важких умовах впливу статичних, динамічних та теплових навантажень.

До статичних навантажень, що діють на лопатку, відносяться відцентрові сили мас лопаток, що виникають при обертанні ротора, і газові сили, що виникають при обтіканні профілю лопатки потоком, а також через наявність різниці тисків газу перед і за лопаткою. Відцентрові сили викликають напруження розтягування, вигину та кручення; газові - напруги вигину та кручення.

До динамічних навантажень, що діють на лопатки, відносять навантаження, що виникають внаслідок коливань лопаток. Розрахунок динамічних навантажень, які є змінними по знаку і величиною напруги кручення і вигину, скрутний і величину їх зазвичай визначають експериментально.

До температурних навантажень, що діють на робочі лопатки турбін, відносять навантаження, викликані нерівномірним нагріванням лопатки як по довжині, так і поперечним перерізам, в результаті чого в лопатках виникають внутрішні напруги.

8. Розвантаження лопаток від газових сил.

З метою зменшення напруг вигину застосовують два способи компенсації вигину від газових сил вигином від відцентрових сил.

Перший спосіб розвантаження полягає в тому, що центри тяжкості всіх перерізів зміщують на деяку відстань від радіального напрямку у бік дії газових сил у площині обертання ротора та в осьовій площині (рис. 7). Відхилення лінії, що з'єднує центри тяжкості всіх перерізів лопатки від радіального напрямку O_r , називають *винесенням перерізів*. При цьому згинальні моменти від відцентрових сил спрямовані протилежно згинальних моментів від газових сил, чим забезпечується розвантаження лопатки.

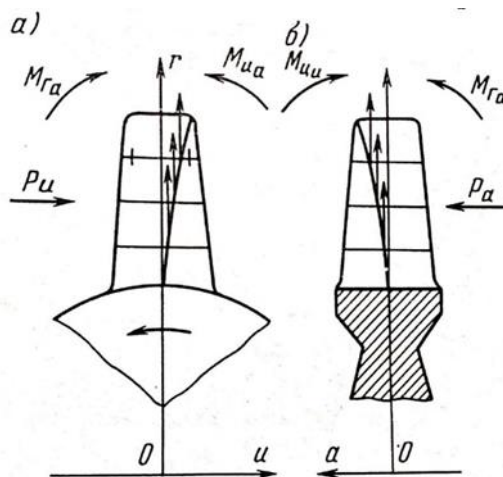


Рис. 7. Розвантаження лопатки від газових сил виносом перерізів

Другий спосіб розвантаження лопатки від дії газових сил полягає у паралельному зміщенні осі лопатки на робочому колесі по ходу обертання його на величину ε (рис. 8). При цьому зміщенні вісь лопатки нахиляється до осі O_T , що проходить через центр тяжіння кореневого перерізу, і у відцентровій силі P_c з'являється горизонтальна складова P'_{cT} , яка викликає вигин лопатки та її розвантаження.

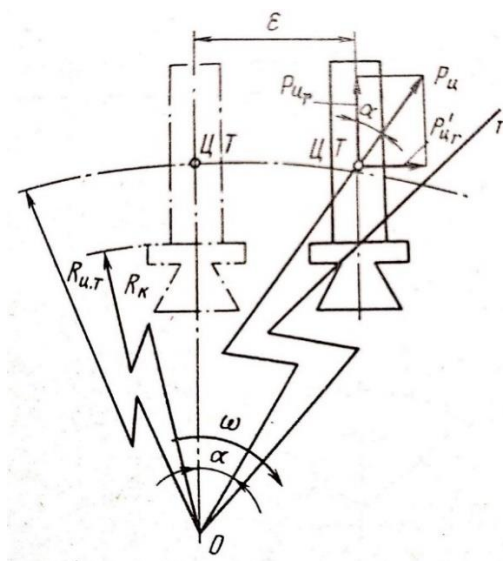


Рис. 8. Розвантаження лопатки від газових сил зсуванням осі

9. Коливання лопаток і демпфірування коливань.

Вільні коливання

Якщо відхилити лопатку від положення рівноваги, а потім відпустити, під дією сил пружності матеріалу лопатка почне переміщатися до положення своєї рівноваги. У цьому швидкість руху лопатки збільшується, зростають сили інерції, а сили пружності зменшуються.

У момент часу, коли лопатка досягає положення своєї рівноваги, вона має максимальну швидкість. І тут сили інерції досягають свого найбільшого

значення, а сили пружності матеріалу стають рівними нулю. Під дією сил інерції лопатка пройде рівноваги положення, відхиляючись вже в інший бік. У цьому зростають сили пружності, а сили інерції зменшуються. Коли інерційні сили досягнуть свого нульового значення, а сили пружності — максимальної величини, лопатка на мить зупиниться, а потім під дією сил пружності починає рухатися у зворотному напрямку.

Якщо в процесі коливань близько положення рівноваги лопатка не піддається впливу зовнішніх сил, ці коливання називають вільними чи власними. Через відсутність зовнішніх сил, а також наявність різного роду тертя коливання лопатки є загасаючими.

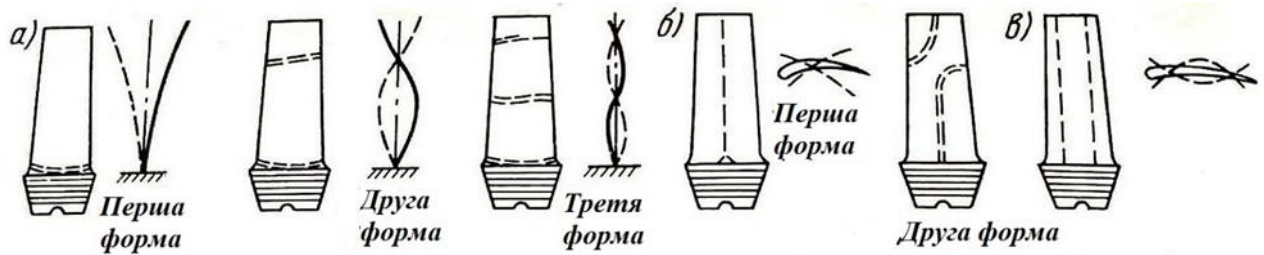


Рис. 9. Форми вільних коливань лопаток: а - згинальні коливання; б-крутильні коливання; в - пластинчасто-згинальні коливання

Коливання лопатки характеризуються *амплітудою* - найбільшим відхиленням цієї точки лопатки від положення її рівноваги і *частотою* - числом повних коливань в одиницю часу.

Підвищення *температури* лопатки та збільшення *довжини* лопатки зменшує власну частоту коливань.

Збільшення *максимальної товщини, кривизни і трапецієподібності клиновидності* профілю, *осьових моментів інерції* перерізів лопатки призводить до зростання власної частоти коливань.

Форми вільних коливань лопаток

Коливання лопатки характеризуються, крім частоти та амплітуди, співвідношенням амплітуд коливань її окремих точок, званим *формою вільних коливань*.

При вільних коливаннях лопатки кожна її точка здійснює рух, що є в загальному випадку сумою простих синусоїдальних (гармонічних) коливань. Форми, що відповідають цим гармонійним коливанням, називаються *основними*.

При вільних коливаннях лопатки за однією з основних форм усі її точки коливаються з однаковою частотою, але з різними амплітудами. При цьому деякі точки лопатки, наприклад, у кореневого перерізу, залишаються нерухомими. Геометричне місце точок, які залишаються нерухомими при даній формі коливань, називають *вузловою лінією*. Коливання лопатки, що відбуваються при одній вузловій лінії, називають *одновузловими* (або коливаннями першої форми), при двох вузлових лініях - *двовузловими* (коливаннями другої форми) і т. д.

На рис. 9 показано:

- три форми вільних *згинальних* коливань робочої лопатки;
- різні види *крутильних* коливань, при яких поперечні перерізи лопатки коливаються біля положення своєї рівноваги;
- *пластинчасто-згинальні*, при яких відбувається вигин поперечних перерізів лопаток, на відміну від розібраних вище форм коливань, при яких всі поперечні перерізи лопатки переміщуються паралельно самим собі без спотворення (деформації) форми цих перерізів.

Коливання лопатки компресора, крім суто згинальних або чисто крутильних форм, можуть мати складні *згинально-крутильні* форми.

Найбільш небезпечними формами коливань робочих лопаток є низькочастотні - перша і друга згинальні форми, перша крутильна форма і деякі високочастотні форми складних коливань.

Вимушені коливання

Коливання лопатки, що відбуваються під безперервним впливом зовнішньої збурюючої сили, що періодично змінюється, називаються *вимушеними коливаннями*. Причини появи періодичних сил пов'язані з нерівномірністю потоку газу (повітря), що протікає через решітку соплового (напрямого) апарату, а також наявністю різних конструктивних елементів (ребра, стійки, жарові труби, робочі паливні форсунки) у проточній частині, пульсаційною подачею палива корабленням, вигорянням тонких кромок, зносу, зміною розмірів внаслідок повзучості матеріалу, появи вибоїн і вм'ятин, зледеніння, вимикання камери згоряння та з інших причин.

Резонансні режими

Частота вимушених коливань лопаток, рівна частоті сили, що збурює, збільшується при зростанні частоти обертання ротора і при деякій швидкості стає рівною одній з частот вільних коливань лопаток. При цьому виникають *резонансні коливання*, які можуть призвести до поломки окремих лопаток через сильне збільшення амплітуд коливань лопаток і вібронапруження в них.

Внаслідок розкиду частот резонансні коливання лопаток відбуваються не за строго певної швидкості обертання, а займають деякі області робочого діапазону швидкостей обертання, які називають *резонансними режимами* роботи двигуна. Небезпечні для міцності лопаток резонансні коливання називають *критичними*. Ці коливання не повинні перебувати в діапазоні робочих швидкостей обертання ротора двигуна, а повинні бути принаймні на 15—20% вищими або нижчими від цих режимів роботи.

Демпфування коливань

Прийнято виділяти три причини (механізму) демпфування коливань лопаток: внутрішнє тертя у матеріалі, опір повітря та конструкційне демпфування (від німецького *dampfen* – зменшувати, заглушувати).

Внутрішнє тертя у матеріалі обумовлено розсіюванням енергії при пластичному деформуванні. Ефект внутрішнього тертя проявляється, зокрема, у нагріванні деталі, що коливається. Внесок внутрішнього тертя в демпфування коливань зазвичай незначний.

Аеродинамічне демпфування виникає внаслідок того, що при коливаннях лопатки змінюється кут атаки та відносної швидкості потоку, і виникає додаткова змінна газодинамічна сила, яка змінюється з частотою коливань, але у протифазі з ними.

Конструкційне демпфування виникає внаслідок втрат енергії на тертя на поверхнях контакту лопатки зі сполученими деталями: в замкових з'єднаннях лопатки з диском, на поверхнях контактних антивібраційних (бандажних) полиць.

Для збільшення конструкційного демпфування застосовують антивібраційні та бандажні полиці (рис.11,а), встановлення лопаток у паз попарно (рис.11,б), встановлення спеціальних демпферів - вставок між лопатками у просторі між диском та нижніми полицями лопаток з подовженою ніжкою (рис.11,в).

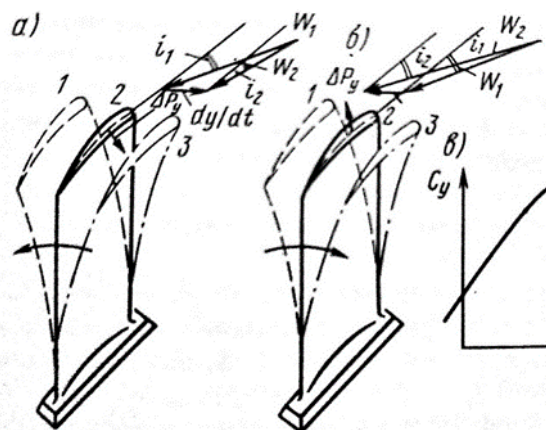


Рис. 10. Аеродинамічне демпфування коливань лопаток

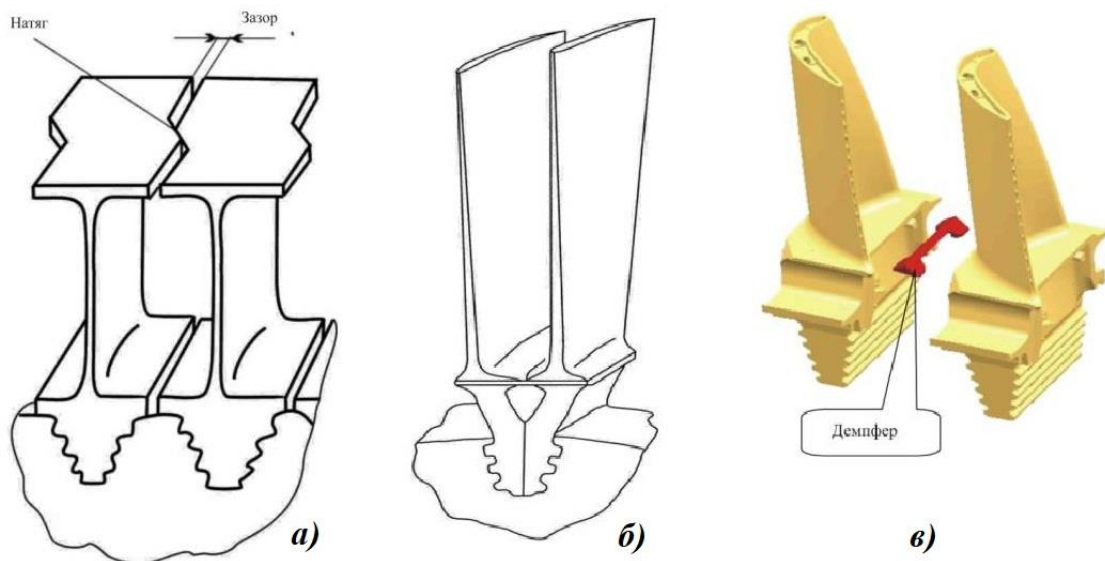


Рис. 11. Способи збільшення конструкційного демпфування

10. Статори компресорів, їх призначення, конструктивні елементи.

Статор компресора служить для створення разом із ротором проточної частини осьового компресора. Основними конструктивними елементами статора є корпус компресора, вхідний напрямний, напрямні і спрямні апарати.

11. Типи корпусів та їх конструкція.

Корпус компресора є порожнистим циліндром або усіченим конусом. Його форма визначається способом профілювання проточної частини. Він може бути виконаний цілісним або роз'ємним, з роз'ємом у площині осі ротора або перпендикулярно до неї (рис. 12).

На деяких корпусах компресорів роблять спеціальні вікна для перепуску повітря в атмосферу при роботі на знижених режимах із застосуванням стрічки або клапанів перепуску повітря, а також отвори для відбору повітря на нужди двигуна і повітряного судна. Для збільшення жорсткості корпусу з внутрішньої сторони до нього приварені Т-подібні та П-подібні кільця.

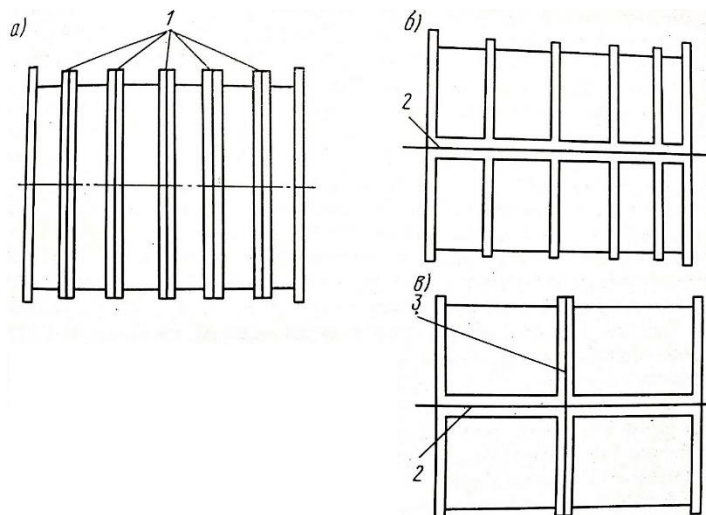


Рис. 12. Типи корпусів компресорів:
а-з поперечними роз'ємами; б -з поздовжніми роз'ємами; в -з поздовжньо-поперечними роз'ємами; 1, 2, 3 - роз'єми

12. Вхідні напрямні апарати, напрямні і спрямні апарати.

Вхідні напрямні і спрямні апарати утворюються кільцевим набором нерухомих лопаток і їх елементами. Вони бувають:

- з консольним та двостороннім кріпленням лопаток;
- роз'ємними та нероз'ємними в осьовій площині компресора;
- розбірними та нерозбірними;
- з поворотними та нерухомими лопатками.

Нерухомі консольні лопатки кріпляться до корпусу або кільця НА такими способами:

- найчастіше хвостовиками типу «ластівчин хвіст» (Рис. 13, Рис. 14, а);
- лопатки або групи лопаток, з'єднані в сектор, мають спеціальні заплечики, які заводяться у спеціально спрофільований кільцевий паз у корпусі (Рис. 14, б,в);

Двохопорні нерухомі НА збирають наступним чином. У корпус лопатки 1 встановлюються будь-яким з описаних для консольних лопаток способів, але додатково кріпляться на внутрішньому кільці 2, наприклад, гайками 3 (див. рис. 15, а), за допомогою заклепок 4 (див. рис. 15, б) або через отвори 5 за допомогою болтового з'єднання зі сполученим корпусом (15, в).

Поворотні консольні лопатки мають у периферійній частині пера 1 циліндричний хвостовик 2 (див. рис. 16). Лопатка встановлюється в корпус зсередини до упору в торець 4. З зовнішньої частини корпусу на лопатку встановлюється важіль, який фіксує її від випадання і забезпечує поворот лопатки (див. Рис. 17).

Двохопорні поворотні лопатки НА додатково на втулковій частині пера мають другий циліндричний хвостовик (див. рис. 16), який дозволяє закріпити лопатку у внутрішньому закріпленому (для лопаток ВНА) або незакріпленому (для інших поворотних НА) кільці. Для компенсації неспіввісності циліндричних отворів у корпусі та внутрішньому кільці на хвостовики лопаток встановлюють сферичні підшипники, що значно знижують зусилля повороту лопатки.

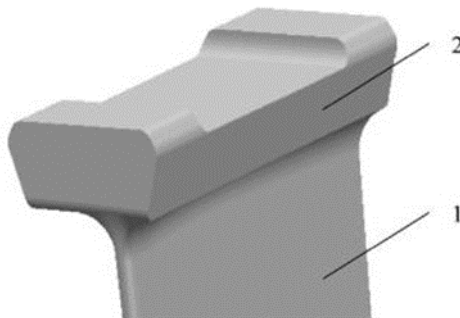


Рис. 13. 1 - Лопатка НА з хвостовиком типу «ластівчин хвіст» 1 - перо; 2 - хвостовик

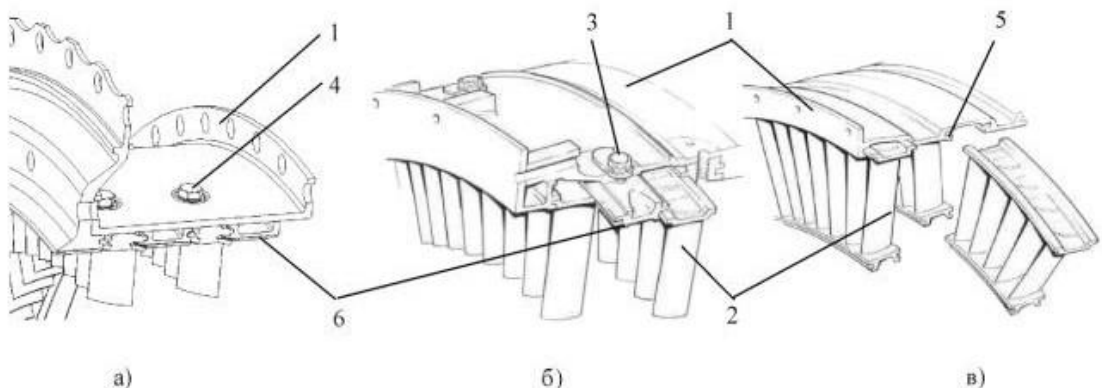


Рис. 14. Корпус з нерухомими лопатками НА

- а) з консольними лопатками із замком типу «ластівчин хвіст» у секторному кільці НА; б) з консольними лопатками з кільцевим замком; в) із секторами двоопорних лопаток; 1 – корпус; 2 – сектори НА; 3 - гвинт кріплення робочого кільця; 4 - гвинт кріплення сектора; 5 - оброблюване покриття на корпусі; 6 - робоче кільце з обробленим покриттям

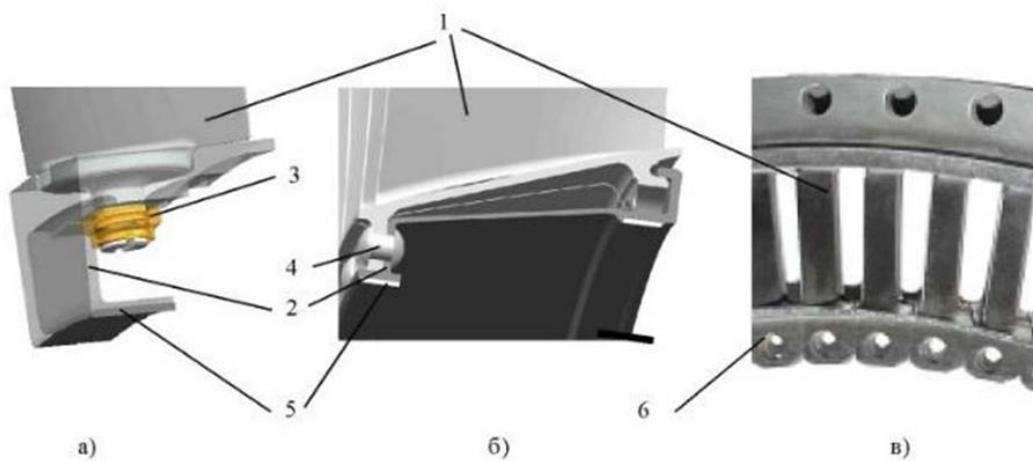
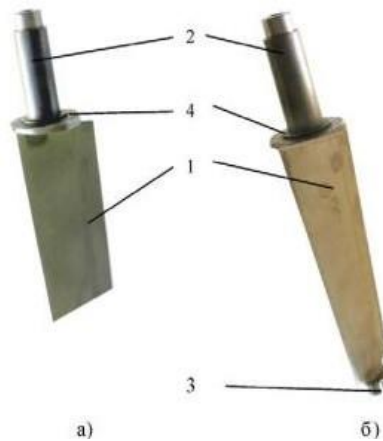


Рис. 15. Двохопорна нерухома лопатка НА

а) з кріпленням внутрішнього кільця гайками; б) із кріпленням внутрішнього кільця заклепками; в) із внутрішнім кільцем, сформованим полицями лопаток; 1 - лопатка НА; 2 -



кільце внутрішнє; 3 – гайка; 4 – заклепка; 5 - оброблюване покриття; 6 - отвори для болтового з'єднання зі сполученим корпусом

Рис. 16. Поворотна лопатка НА

а) консольна; б) двоопорна; 1 – перо; 2 – зовнішній циліндричний хвостовик; 3- внутрішній циліндричний хвостовик; 4 - упорний торець

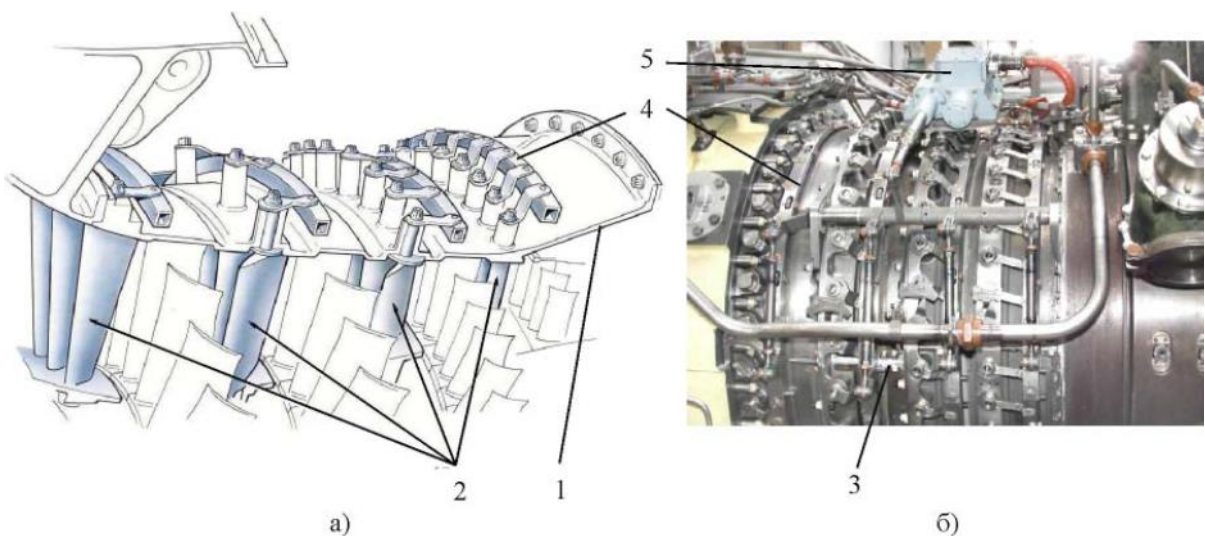


Рис. 17. Корпус з регульованими лопатками НА

1 – корпус; 2 - лопатки НА; 3 - поздовжній роз'єм корпусу; 4 - кільця приводу; 5 - механізм приводу НА

13. Сили, діючі на статор.

Осьові складові аеродинамічних сил, які утворюються на лопатках НА та СА, передаються на корпус компресора, навантажуючи його в осьовому напрямку. Окружні складові утворюють момент, що крутить, який передається на корпус компресора.

На корпус компресора передаються також осьові сили та моменти, що крутять, від інших деталей силової системи двигуна. Через вузли кріплення двигуна до ПС, розташовані на корпусі компресора, передається результуюча всіх осьових сил, що діють на деталі силової системи, яка дорівнює силі тяги двигуна.

Крім того, корпус компресора навантажується згинальними моментами від сил власної ваги, від сил інерції, що виникають при еволюціях ПС, і від радіальних сил, що передаються на корпус від опор ротора.

Внаслідок різниці тисків повітря в проточній частині та в атмосфері на корпус компресора діють сили, нормальні до його поверхні.

14. Зазор в проточній частині компресора. Ущільнення повітряного тракту компресора.

У компресорі між ротором і нерухомими деталями (статором) є два види зазорів: радіальні і осьові. Призначення зазорів - попередити можливість доторкнення обертових і нерухомих елементів при найнесприятливіших режимах роботи двигуна.

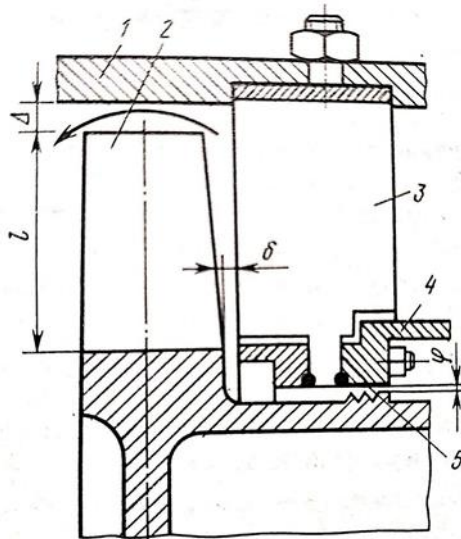


Рис. 18. Зазори в компресорі:

1-корпус; 2-робоча лопатка; 3-лопатка СА; 4 - внутрішнє кільце; 5 - шар покриття

Радіальні зазори

Величини радіальних зазорів Δ та ϕ (Рис. 18) істотно впливають на характеристики компресора і двигуна в цілому. При великих зазорах зростає перетікання повітря з порожнин з підвищеним тиском в порожнини з більш низьким рівнем тиску. А це приводить до зниження ККД компресора (на 2 ...

3%) і до збільшення питомої витрати палива (до 10%). Тому величину радіального зазору в кожному із ступенів компресора необхідно забезпечувати мінімально можливою (з урахуванням всіх режимів роботи двигуна, включаючи запуск і останов).

Величини зазорів, що вказуються в складальних кресленнях, віднесені до стану непрацюючого двигуна. Їх називають «холодними» або монтажними. На різних режимах роботи двигуна радіальні зазори мають змінну величину. Так, після запуску двигуна протягом перших двох-трьох хвилин радіальні зазори зменшуються внаслідок подовження дисків і лопаток за рахунок відцентрових сил. Але потім внаслідок більш швидкого прогріву тонкостінних корпусів радіальні зазори в каскадах компресора збільшуються і починають перевищувати вихідні норми.

У міру подальшого прогріву ротора (через 15 ... 20 хвилин після запуску) радіальні зазори знову зменшуються до мінімальної величини. У міру набору висоти внаслідок зменшення температури атмосферного повітря та охолодження статора радіальні зазори знову трохи збільшуються, і тільки в процесі крейсерського польоту в висотних умовах вони залишаються незмінними. Цей режим роботи двигуна слід приймати як розрахунковий. Саме фактичний стан величин зазорів між ротором і статором компресора в процесі тривалого крейсерського польоту робить істотний вплив на економічність двигуна.

Особливе місце в частині впливу на величини радіальних зазорів займає режим зупинки двигуна. Після припинення подачі палива в двигун ротор по інерції обертається ще кілька хвилин. В тракт компресора засмоктується холодне повітря. При цьому він в першу чергу охолоджує корпусні деталі, які мають меншу теплову інерційність в порівнянні з ротором. Саме в цих умовах радіальні зазори мають найменшу величину. Якщо вони зменшуються до нуля, можливий дотик ротора компресора до статора. Про це, зокрема, судять по зменшенню часу «вибігу ротору» і за станом зносу в зоні можливого контакту сполучених поверхонь ротора і статора компресора. У разі виявленої необхідності приймають рішення збільшити зазори в конкретних вузьких місцях.

Осьові зазори

Осьові зазори δ між робочими лопатками і напрямними (або спрямними) апаратами визначаються як компроміс між двома суперечливими вимогами:

- для зменшення довжини компресора величини осьових зазорів повинні бути мінімальними;
- для виключення нестійкої роботи компресора і виникнення небезпечних вібрацій лопаток осьовий зазор бажано мати максимально допустимим.

За статистикою осьовий зазор в середньому перетині ступенів компресора у короткоресурсних ГТД знаходиться в межах 15 ... 25% від довжини хорди робочої лопатки, а у двигунів великого ресурсу - 30 ... 40%.

Ущільнення повітряного тракту компресора.

Для зменшення величини радіальних зазорів на внутрішні поверхні корпусів в зоні можливого торкання наносять спеціальні м'які покриття товщиною від 1 до 3 мм. Ці покриття можуть бути на основі графіту, тальку, азбесту або алюмінієвої пудри, що з'єднуються за допомогою лаків. На поверхнях корпусних деталей для кращого зчеплення їх з покриттям виконують спіральні канавки глибиною близько 0,5 мм і кроком ~ 1 мм.

З метою зменшення витрати повітря, що перетікає з порожнини з більш високим тиском, на шляху цього повітря встановлюють лабіринтові ущільнення. Їх дія заснована на багаторазовому дроселюванні газу, що протікає через канали з прохідними перерізами, що різко змінюються. При проходженні повітря через щілину його тиск падає, а швидкість зростає. У камері 5 (рис. 19) за щілиною швидкість різко зменшується, а тиск зростає, але в результаті гідравлічних опорів, викликаних вихроподібним перебігом в камері, він стає менше тиску p_1 . У кожній наступній камері тиск повітря виявляється меншим, ніж у попередній. Для поділу двох сусідніх порожнин (наприклад, масляної та газової) до ущільнення підводять повітря каналом 4 з тиском p_1 .

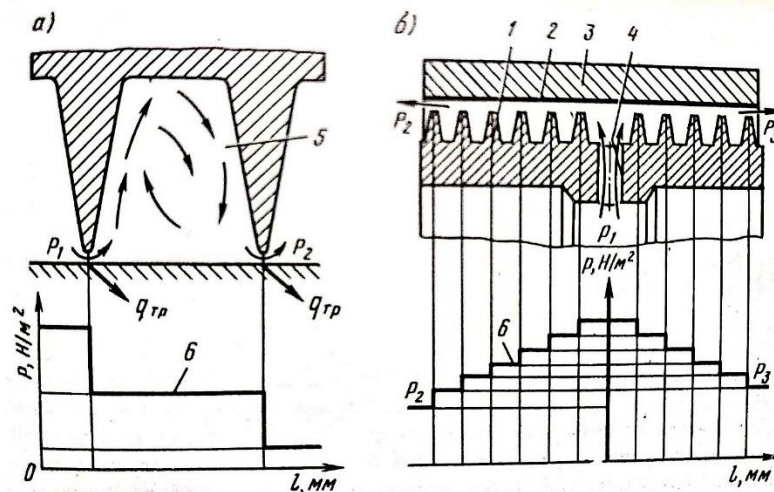


Рис. 19. Лабіринтне ущільнення: робота камери ($q_{тр}$ - втрати енергії на тертя в зазорі між гребінцем і втулкою); б - конструкція; 1 - втулка з гребінцями; 2 - м'яке покриття; 3 - втулка; 4 - канал підведення ущільнюючого повітря; 5 - камера; б - зміна тиску повітря за довжиною ущільнення

На деяких ГТД останнього покоління для підтримки оптимальної величини радіальних зазорів на різних режимах роботи двигуна здійснюють його регулювання, наприклад, шляхом охолодження корпусу в зоні останніх ступенів компресора, у яких величина зазорів змінюється найзначніше. Охолоджуюче повітря можна відбирати за вентилятором або за компресором низького тиску. Цей процес отримав назву «активного управління» радіальними зазорами.

15. Розвантаження ротора компресора від вісьових сил.

Для зменшення сумарного осьового зусилля, що діє на ротор компресора і сприймається упорним підшипником, ротор компресора з'єднують з ротором турбіни, на який діє осьове зусилля, спрямоване протилежно

напрямку осьового зусилля ротора компресора. З цією ж метою створюють спеціальні розвантажувальні порожнини в передній та задній частинах компресора.

16. Відцентрові компресори, принцип роботи, область використання.

Ротори і корпуси відцентрованих компресорів.

Основними конструктивними елементами відцентрового компресора є: вхідний пристрій 4 (рис. 20), робоче колесо (крильчатка) 6, дифузор 1.

Робоче колесо відцентрового компресора, з лопатками, служить для перетворення механічної енергії в енергію тиску, а частково - в кінетичну енергію потоку.

За конструкцією робочі колеса поділяються на три типи: відкриті, напівзакриті, закриті (рис. 21).

Найбільшого поширення набули робочі колеса напівзакритого типу, що мають одну торцеву стінку з вифрезерованими радіальними лопатками, наприклад робоче колесо 6 відцентрового компресора, який встановлений на турбостартері (див. рис. 20). За величиною втрат робочі колеса напівзакритого типу займають проміжне положення між відкритими і закритими, прості у виготовленні і мають достатню міцність і жорсткість.

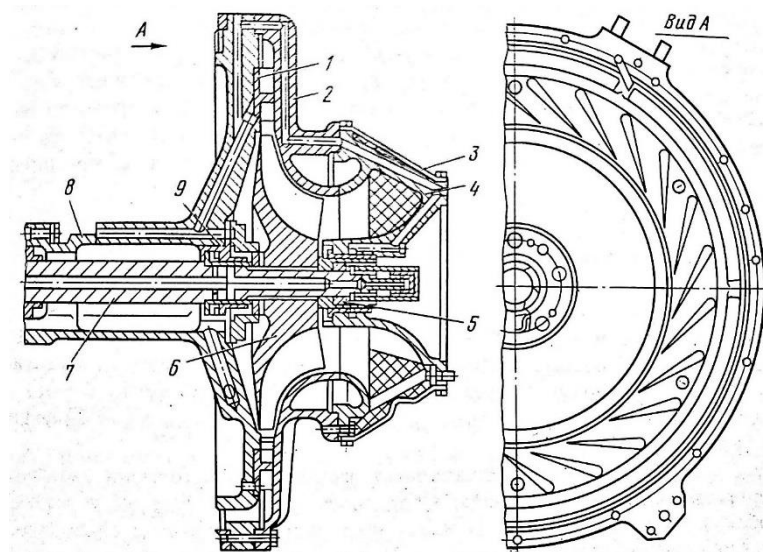


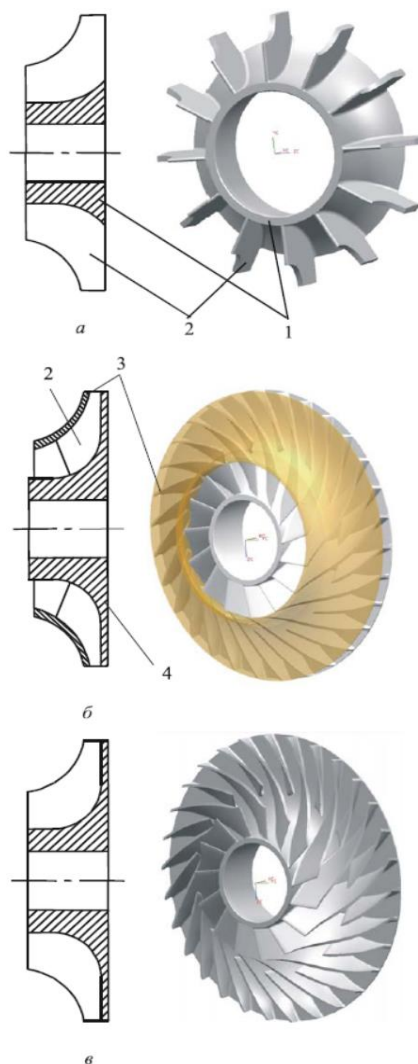
Рис. 20. Відцентровий компресор:

1-дифузор; 2-кришка компресора; 3 - сітка; 4 - вхідний пристрій; 5-гайка; 6-робоче колесо; 7 -вал; 8-корпус компресора; 9 - підшипник

Вхідний пристрій 4 являє собою патрубок, в якому встановлюють нерухомий НА, є силовим елементом.

Дифузор 1 розташовують у корпусі компресора на виході з робочого колеса. Найбільше застосування знайшли лопаткові дифузори, які мають більш високий к. п. д. та менші діаметральні розміри, ніж безлопаткові (щілинні).

Дифузор лопаткового типу є кільцевою стінкою, виконаною заодно з лопатками. Лопатки, кількість яких коливається від 9 до 30, утворюють канали, що розширюються, в напрямку руху повітря.



Корпус 8 складається з кількох частин з площинами роз'єму, перпендикулярними до осі валу. Окремі частини центруються між собою на посадкових поясах або контрольних штифтах і з'єднуються за допомогою шпильок або болтів. Центральну частину корпусу утворює дифузор.

До корпусу кріпиться кришка компресора 2 з вхідним пристроєм 4. Фіксація робочого колеса щодо корпусу компресора в осьовому напрямку проводиться за допомогою упорного підшипника ковзання 9.

Рис. 21 - Типи робочих коліс
а) відкритого типу;
б) закритого типу;
в) напіввідчиненого типу.
1 - втулка; 2.- робочі лопатки;
3 - покривний диск; 4 - диск

17. Матеріали для деталей компресора.

Вибір матеріалів для деталей осьового компресора визначає їх тепловий стан і умови роботи.

Диски виготовляють при температурах нагріву до 250°C з алюмінієвих сплавів АК2, АК4-1 ВД17, при температурах 450-550°C - титанових сплавів ВТ3-1 (до 450-500° С), ВТ8 (до 500° С), ВТ10 (500-550 ° С), при температурах до 450°C - сталі ОХНЗМ. 30ХГСА, 18ХНВА, 40ХНМА, при температурах понад 450°C - жароміцних сталей.

Матеріалами для робочих лопаток осьових компресорів служать алюмінієві та титанові сплави, сталі та пластмаси. Для запобігання корозії лопатки з алюмінієвих сплавів ретельно анодують.

Корпус компресора в залежності від температурних умов або відливають з алюмінієвих сплавів АЛ4 та АЛ5, або зварюють з титанового листового сплаву або сталі. Іноді застосовують магнієві сплави, наприклад, для корпусу переднього підшипника.

Вал компресора і цапфу виготовляють зі сталей марок 18ХНВА, 30ХГСА, 40ХНМА, а деталі лабіринтних ущільнень з м'якої вуглецевої сталі 10, але при допустимих робочих температурах - з алюмінієвих сплавів.