

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. М. ПАТЛАЙЧУК

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для проведення занять з дисципліни
"Конструкції та міцність турбомашин"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2018

УДК 621.438(076)

П 20

Автор В. М. Патлайчук, канд. техн. наук, доцент

Рецензент М. В. Ващиленко, канд. техн. наук, доцент

Патлайчук В. М.

П 20 Методичні вказівки для проведення занять з дисципліни "Конструкції та міцність турбомашин" / В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2018. – 75 с.

Наведено відомості щодо організації проведення занять з дисципліни "Конструкції та міцність турбомашин", які розроблені відповідно до вимог Болонського процесу; роз'яснено види і форми контролю знань студентів; розглянуто зміст структурних елементів навчальних модулів; наведено питання, що виносяться до проведення модульних контрольних робіт, заліку та екзамену. До кожної навчальної теми додаються плани лекційних занять, перелік питань для самостійної роботи та самоконтролю засвоєння матеріалу, рекомендовані основна і допоміжна література.

Призначено для студентів спеціальності 142 "Енергетичне машинобудування" денної та заочної форм навчання.

УДК 621.431(076)

Навчальне видання

ПАТЛАЙЧУК Володимир Миколайович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для проведення занять з дисципліни
"Конструкції та міцність турбомашин"**

Комп'ютерне верстання *А. В. Платонова*

© Патлайчук В. М., 2018

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 4.4. Об'єм даних 3778 кб.
Тираж 15 прим. Вид. № 36. Зам. № 212.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.

ЗМІСТ

Передмова	4
1. Програма курсу	5
2. Змістові навчальні модулі	12
3. Перелік питань до модульних контрольних робіт	64
4. Перелік питань до заліку	70
5. Перелік питань до екзамену	72

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна "Конструкції та міцність турбомашин" є основною для професійної підготовки студентів спеціальності 142 "Енергетичне машинобудування" з вивчення конструкції турбінних агрегатів. У ній викладаються питання, пов'язані із загальною будовою сучасних газотурбінних двигунів та парових турбін, розглядається будова їх головних складових елементів, класифікація турбоагрегатів; викладаються питання міцностних розрахунків елементів турбінних двигунів. Матеріал дисципліни включає також питання, необхідні для подальшого проектування газо- і паротурбінних агрегатів, а також для самостійного поглиблення знань зі спеціальності.

Дисципліна "Конструкції та міцність турбомашин" базується на попередньому вивченні студентами дисциплін "Опір матеріалів", "Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів", "Основи конструювання", "Парові турбіни". З цих дисциплін використовуються базові знання про принцип дії турбінних агрегатів, методи міцностних розрахунків деталей машин, про матеріали, які застосовуються для виготовлення елементів турбінних двигунів.

Представлені методичні вказівки містять інформацію щодо організації проведення занять з дисципліни "Конструкції та міцність турбомашин", які розроблені відповідно до вимог Болонського процесу. В них роз'яснюються види і форми контролю знань студентів, розглядається зміст структурних елементів навчальних модулів, наводяться питання, що виносяться до проведення модульних контрольних робіт, заліку та екзамену. До кожної навчальної теми додаються плани лекційних занять, перелік питань для самостійної роботи та самоконтролю засвоєння матеріалу, рекомендуються основна та допоміжна література

1. ПРОГРАМА КУРСУ

1.1.Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		Денна форма навчання	Заочна форма навчання
Кількість кредитів – 9	Галузь знань: 14 "Електрична інженерія" Спеціальність: 142 "Енергетичне машинобудування"	Нормативна	
Модулів – 2		Рік підготовки:	
Змістових модулів – 5		4	4, 5
Загальна кількість годин – 270		Семестри	
		7, 8	8, 9
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 7; самостійної роботи студента – 11.	Освітньо-кваліфікаційний рівень: "бакалавр"	Лекції	
		60 год	30 год
		Практичні заняття	
		45 год	22 год
		Самостійна робота	
		165 год	218 год
		Вид контролю:	
залік, екзамен			

1.2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета вивчення дисципліни – одержання базових знань з тематики конструювання турбомашин, вивчення теоретичних засад та вироблення практичних навичок у виконанні міцностних розрахунків турбінних агрегатів.

Завдання дисципліни – ознайомити студентів із сучасними та перспективними конструкціями паро- та газотурбінних агрегатів та їх

складових частин; дати теоретичний апарат для проведення практичних розрахунків на міцність головних складових елементів турбомашин.

Після вивчення дисципліни студент повинен:

знати – принципи сучасного конструювання паро- та газотурбінних агрегатів; будову сучасних турбомашин та їх складових елементів; матеріали, що використовуються для виготовлення деталей турбінних двигунів; теоретичні основи та практичні схеми розрахунку на міцність елементів турбомашин;

уміти – працювати із спеціальною технічною літературою, обирати оптимальну конструкцію турбінного двигуна для конкретних умов застосування, виконувати перевірочні розрахунки на міцність найважливіших елементів турбінних двигунів;

мати уявлення – про перспективи розвитку конструкційної будови турбінних агрегатів як енергетичного призначення, так і транспортних, про можливості варіювання конструкції турбоагрегатів залежно від призначення та умов експлуатації.

1.3. Програма навчальної дисципліни

1.3.1. Змістові модулі курсу

№	Назва змістового модуля
1	Принципи конструювання газотурбінних агрегатів
2	Оцінення міцності деталей турбомашин
3	Будова та розрахунок на міцність лопаточного апарату турбомашин
4	Будова та розрахунок на міцність роторів турбінних агрегатів
5	Будова та розрахунок на міцність окремих елементів турбінних агрегатів

1.3.2. Навчальні елементи змістових модулів

Модуль № 1 (Семестр 7)

Змістовий модуль 1. Принципи конструювання газотурбінних агрегатів

Тема 1. Будова та принцип дії газотурбінного агрегату (ГТА) простого термодинамічного циклу. Головні системи, що обслуговують ГТА.

Тема 2. Принципи конструювання компресорної частини газотурбінних агрегатів.

Тема 3. Принципи конструювання камер згоряння газотурбінних агрегатів.

Тема 4. Принципи конструювання турбінної частини газотурбінних агрегатів.

Тема 5. Особливості конструкції, переваги та недоліки, галузі застосування різних типів газотурбінних агрегатів. Їх класифікація.

Змістовий модуль 2. Оцінення міцності деталей турбомашин

Тема 6. Типи навантажень та деформацій. Статична та динамічна міцність.

Тема 7. Міцнісні характеристики матеріалів, що використовуються у турбінобудуванні.

Тема 8. Методи оцінення міцності деталей турбомашин.

Тема 9. Особливості поведінки пластичних матеріалів при високій температурі.

Змістовий модуль 3. Будова та розрахунок на міцність лопаточного апарату турбомашин

Тема 10. Статична міцність робочих лопаток. Розтягнення профільної частини робочих лопаток відцентровими силами.

Тема 11. Робоча лопатка постійного перерізу. Робоча лопатка змінного перерізу.

Тема 12. Чисельний метод розрахунку робочих лопаток на розтягнення. Рівномісна лопатка.

Тема 13. Згин робочих лопаток газодинамічними силами. Згин робочих лопаток відцентровими силами. Визначення запасу міцності профільної частини робочих лопаток.

Тема 14. Вібрація робочих лопаток турбомашин. Головні поняття. Причини вібрації.

Тема 15. Визначення власної частоти коливань робочих лопаток енергетичним методом. Вплив різних факторів на частоту коливань.

Тема 16. Оцінка напружень в робочій лопатці при резонансі. Резонансні частоти обертання турбінного двигуна. Резонансна діаграма коливань.

Тема 17. Забезпечення надійності робочих лопаток при коливаннях. Використання бандажів та зв'язуючого дрота для боротьби з вібрацією. Демпфірування коливань.

Тема 18. Визначення зусиль контакту для елементів кріплення робочої лопатки до ротора. Розрахунок кріплення робочої лопатки на зм'яття.

Тема 19. Загальний метод розрахунку на міцність елементів кріплення робочої лопатки. Визначення зусиль на ободі диска турбомашини від робочих лопаток та елементів їхнього кріплення.

Модуль № 2 (Семестр 8)

Змістовий модуль 4. Будова та розрахунок на міцність роторів турбінних агрегатів

Тема 20. Характеристики головних типів роторів турбоагрегатів.

Тема 21. Розрахунок барабанного ротора. Рівняння рівноваги навантаженого диска.

Тема 22. Визначення запасу міцності за руйнівними обертами для першої та другої форм руйнації диска.

Тема 23. Рівномісний диск. Поняття про нейтральний радіус диска. Коливання дисків.

Тема 24. Поняття про критичне число обертання ротора. Визначення критичних обертів енергетичним методом. Вплив різних факторів на критичне число обертання вала.

Змістовий модуль 5. Будова та розрахунок на міцність окремих елементів турбінних агрегатів

Тема 25. Визначення осьових зусиль, що діють на ротор турбомашини. Розвантажувальні порожнини. Ущільнення турбомашин.

Тема 26. Конструкція опор турбомашин. Основи їх перевірочних розрахунків на міцність.

Тема 27. Конструкція корпусів турбінних агрегатів. Основи їх перевірочних розрахунків на міцність.

1.4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
		л	пр	інд	с.р.
1	2	3	4	5	6
Модуль № 1 (Семестр 7)					
Змістовий модуль 1. Принципи конструювання газотурбінних агрегатів					
Тема 1. Будова та принцип дії газотурбінного агрегату простого термодинамічного циклу. Головні системи, що обслуговують ГТА.	10	2	–	–	8
Тема 2. Принципи конструювання компресорної частини газотурбінних агрегатів.	14	2	2	–	10
Тема 3. Принципи конструювання камер згоряння газотурбінних агрегатів.	14	2	2	–	10
Тема 4. Принципи конструювання турбінної частини газотурбінних агрегатів.	12	2	2	–	8
Тема 5. Особливості конструкції, переваги та недоліки, галузі застосування різних типів газотурбінних агрегатів. Їх класифікація.	40	9	4	–	27
Разом за змістовим модулем 1	90	17	10	–	63
Змістовий модуль 2. Оцінення міцності деталей турбомашин					
Тема 6. Типи навантажень та деформацій. Статична та динамічна міцність.	7	2	–	–	5
Тема 7. Міцнісні характеристики матеріалів, що використовуються у турбінобудуванні.	8	2	2	–	4
Тема 8. Методи оцінення міцності деталей турбомашин.	7	2	–	–	5
Тема 9. Особливості поведінки пластичних матеріалів при високій температурі.	8	2	2	–	4
Разом за змістовим модулем 2	30	8	4	–	18
Змістовий модуль 3. Будова та розрахунок на міцність лопаточного апарату турбомашин					
Тема 10. Статична міцність робочих лопаток. Розтягнення профільної частини робочих лопаток відцентровими силами.	6	2	2	–	2

Тема 11. Робоча лопатка постійного перерізу. Робоча лопатка змінного перерізу.	7	2	2	–	3
Тема 12. Чисельний метод розрахунку робочих лопаток на розтягнення. Рівномісна лопатка.	6	2	2	–	2
Тема 13. Згин робочих лопаток газодинамічними силами. Згин робочих лопаток відцентровими силами. Визначення запасу міцності профільної частини робочих лопаток.	7	2	2	–	3
Тема 14. Вібрація робочих лопаток турбомашин. Головні поняття. Причини вібрації.	4	2	–	–	2
Тема 15. Визначення власної частоти коливань робочих лопаток енергетичним методом. Вплив різних факторів на частоту коливань.	7	2	2	–	3
Тема 16. Оцінка напружень в робочій лопатці при резонансі. Резонансні частоти обертання турбінного двигуна. Резонансна діаграма коливань.	6	2	2	–	2
Тема 17. Забезпечення надійності робочих лопаток при коливаннях. Використання бандажів та зв'язуючого дрота для боротьби з вібрацією. Демпфірування коливань.	5	2	–	–	3
Тема 18. Визначення зусиль контакту для елементів кріплення робочої лопатки до ротора. Розрахунок кріплення робочої лопатки на зм'яття.	6	2	2	–	2
Тема 19. Загальний метод розрахунку на міцність елементів кріплення робочої лопатки. Визначення зусиль на ободі диска турбомашини від робочих лопаток та елементів їхнього кріплення.	6	2	2	–	2
Разом за змістовим модулем 3	60	20	16	–	24
Разом за модулем № 1	180	45	30	–	105
Модуль № 2 (Семестр 8)					
Змістовий модуль 4. Будова та розрахунок на міцність роторів турбінних агрегатів					
Тема 20. Характеристики головних типів роторів турбоагрегатів.	11	2	3	–	6
Тема 21. Розрахунок барабанного ротора. Рівняння рівноваги навантаженого диска.	12	2	–	–	10
Тема 22. Визначення запасу міцності за руйнівними обертами для першої та другої форм руйнації диска.	16	2	2	–	12

Тема 23. Рівномірний диск. Поняття про нейтральний радіус диска. Коливання дисків.	13	1	2	–	10
Тема 24. Поняття про критичне число обертання ротора. Визначення критичних обертів енергетичним методом. Вплив різних факторів на критичне число обертання вала.	8	2	–	–	6
Разом за змістовим модулем 4	60	9	7	–	44
Змістовий модуль 5. Будова та розрахунок на міцність окремих елементів турбінних агрегатів					
Тема 25. Визначення осьових зусиль, що діють на ротор турбомашини. Розвантажувальні порожнини. Ущільнення турбомашин.	6	2	–	–	4
Тема 26. Конструкція опор турбомашин. Основи їх перевірочних розрахунків на міцність.	6	2	–	–	4
Тема 27. Конструкція корпусів турбінних агрегатів. Основи їх перевірочних розрахунків на міцність.	18	2	8	–	8
Разом за змістовим модулем 5	30	6	8	–	16
Разом за модулем № 2	90	15	15	–	60
Усього годин	270	60	45	–	165

2. ЗМІСТОВІ НАВЧАЛЬНІ МОДУЛІ

Змістовий модуль 1. ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ

Тема 1. Будова та принцип дії газотурбінного агрегату простого термодинамічного циклу. Головні системи, що обслуговують ГТА

Структурна схема газотурбінного агрегату простого термодинамічного циклу. Компресорна частина: її призначення, головні характеристики. Міра підвищення тиску повітря сучасних ГТА.

Камера згоряння: її призначення, головні характеристики. Температура газів на виході з камер згоряння сучасних ГТА. Фактори, що її обмежують.

Турбінна частина: її призначення, головні характеристики. Розподіл генерованої турбіною потужності між компресором ГТА та споживачем. Споживачі механічної енергії, яка генерується турбіною. Необхідність використання редуктора. Температура газів на виході з ГТА простого термодинамічного циклу. Ефективний ККД ГТА простого термодинамічного циклу.

Процеси, що складають ідеальний цикл ГТА на тепловій діаграмі (цикл Дж. Брайтона).

Особливості використовуємої в техніці термінології: газотурбінний агрегат (ГТА), газотурбінний двигун (ГТД), газотурбінна установка (ГТУ).

Основні системи, що обслуговують ГТА: система запуску, паливна система, масляна система, система охолодження, система стисненого повітря, система суфлювання та розвантаження, повітроприймальна та газовипускна системи.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть будову найпростішого газотурбінного агрегату.
2. Назвіть процеси, які складають цикл Брайтона.
3. Поясніть призначення компресора у складі газотурбінного агрегату.
4. Поясніть призначення камери згоряння у складі газотурбінного агрегату.
5. Поясніть призначення турбіни у складі газотурбінного агрегату.
6. Дайте характеристику системам, обслуговуючим газотурбінні агрегати.

Література до теми

Основна

1. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 1. Загальна будова та класифікація [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2016. – 216 с.

Допоміжна

1. **Левенберг, В. Д.** Конструктивна будова головних газотурбінних агрегатів [Текст] / В. Д. Левенберг, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – 86 с.

2. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2005. – 344 с.

3. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 2. Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2008. – 420 с.

Тема 2. Принципи конструювання компресорної частини газотурбінних агрегатів

Призначення компресорної частини ГТА. Типи використовуваних у складі газотурбінних агрегатів компресорів.

Будова та принцип дії осьового багатоступінчастого компресора. Його головні структурні елементи: вхідний патрубок; вхідний напрямний апарат; робочі та напрямні лопатки, що утворюють окремі ступені компресора; спрямний апарат; вихідний дифузор; ротор; опори; корпус. Їх призначення та будова.

Переваги та недоліки осьових компресорів порівняно з іншими типами лопаткових компресорів. Особливості використання у складі газотурбінних агрегатів.

Будова та принцип дії відцентрового компресора. Його головні структурні елементи. Робочі колеса відкритого, закритого та напіввідкритого типів. Робочі колеса з лопастями, загнутими назад, вперед або розміщеними радіально. Односторонній та двосторонній вхід повітря до відцентрового компресора. Компресора з однопотоковими та двопотоковими робочими колесами.

Переваги та недоліки відцентрових компресорів порівняно з іншими типами лопаткових компресорів. Особливості використання у складі газотурбінних агрегатів.

Будова та принцип дії осевідцентрового компресора. Його головні структурні елементи. Особливості використання у складі газотурбінних агрегатів.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть, які типи компресорів використовують у складі газотурбінних агрегатів.
2. Розкрийте будову та принцип дії осьового компресора.
3. Охарактеризуйте переваги осьових компресорів.
4. Охарактеризуйте недоліки осьових компресорів.
5. Розкрийте будову та принцип дії відцентрового компресора.
6. Поясніть особливості конструкції робочих коліс відцентрових компресорів.
7. Назвіть переваги і недоліки відцентрових компресорів.
8. Поясніть особливості конструкції осевідцентрових компресорів.

Література до теми

Основна

1. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 1. Загальна будова та класифікація [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2016. – 216 с.

Допоміжна

1. **Левенберг, В. Д.** Конструктивна будова головних газотурбінних агрегатів [Текст] / В. Д. Левенберг, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – 86 с.

2. **Романовський, Г. Ф.** Основи проектування компресорів суднових газотурбінних двигунів [Текст] / Г. Ф. Романовський, М. В. Ващенко, М. П. Седько. – Миколаїв : НУК, 2008. – 292 с.

3. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2005. – 344 с.

4. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 2. Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2008. – 420 с.

Тема 3. Принципи конструювання камер згоряння газотурбінних агрегатів

Призначення камер згоряння газотурбінних агрегатів. Загальна схема і будова камери згоряння ГТА. Процеси, що відбуваються в камері згоряння.

Принципи організації процесу спалювання палива. Поділ внутрішнього об'єму жарових труб на дві зони: горіння і змішування. Первинне і вторинне повітря. Ступеневе підведення первинного повітря за довжиною зони горіння.

Турбулізація потоку в зоні горіння. Лопаткові завихрювачі. Стабілізація фронту полум'я. Схема течії газів у зоні горіння. Зона зворотних струмів. Оптимальний розподіл подаваного палива за перерізом жарових труб. Схема найпростішої відцентрової форсунки. Використання двоканальних відцентрових форсунок. Охолодження

елементів камери згоряння. Методи охолодження стінок жарових труб.

Класифікація камер згоряння за компонованням з іншими частинами газотурбінного агрегату. Особливості конструкції, переваги, недоліки та специфіка застосування виносних камер згоряння у складі ГТА.

Різновиди камер згоряння, вбудованих у корпус газотурбінного агрегату. Камери згоряння кільцеві, секційні, трубчасто-кільцеві та індивідуальні. Особливості їх конструкції, переваги, недоліки та специфіка використання у складі ГТА.

Класифікація камер згоряння за характером руху робочого тіла. Камери згоряння прямотовкові та протитоківкові. Особливості їх конструкції, переваги, недоліки та специфіка використання у складі ГТА. Розміщення протитоківкових камер згоряння у компонованні з осьовими та відцентровими (осевідцентровими) компресорами.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть необхідність поділу робочого об'єму камер згоряння газотурбінних агрегатів на дві зони.
2. Поясніть функціональне призначення первинного і вторинного повітря в камерах згоряння.
3. Поясніть необхідність ступеневого підведення первинного повітря по довжині зони горіння.
4. Як здійснюється стабілізація полум'я в камерах згоряння газотурбінних агрегатів?
5. Як здійснюється турбулізація потоку в зоні горіння?
6. Поясніть принцип дії відцентрової форсунки.
7. Назвіть основні типи камер згоряння газотурбінних агрегатів.
8. Проаналізуйте особливості конструкції прямотовкових і протитоківкових камер згоряння.

Література до теми

Основна

1. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 1. Загальна будова та класифікація [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2016. – 216 с.

Допоміжна

1. **Левенберг, В. Д.** Конструктивна будова головних газотурбінних агрегатів [Текст] / В. Д. Левенберг, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – 86 с.

2. **Романовський, Г. Ф.** Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін. – Миколаїв : УДМТУ, 2000. – 259 с.

3. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2005. – 344 с.

4. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 2. Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2008. – 420 с.

Тема 4. Принципи конструювання турбінної частини газотурбінних агрегатів

Призначення турбінної частини ГТА. Типи використовуваних у складі газотурбінних агрегатів турбін.

Будова та принцип дії осьової турбіни. Її головні структурні елементи, їх призначення і будова. Особливості робочого процесу турбіни як теплового двигуна. Ступінь турбіни. Типи турбінних ступенів. Вибір числа ступенів турбінної частини ГТА.

Переваги та недоліки осьових турбін порівняно з іншими типами турбін, що використовуються у складі ГТА. Особливості застосування у складі газотурбінних агрегатів.

Будова та принцип дії доцентрової радіальної турбіни. Її головні структурні елементи. Особливості конструкції радіально-осьових турбін. Однопотоків та двопотоків радіально-осьові турбіни. Типи робочих колес доцентрових турбін. Особливості конструкції багатоступінчастих турбін.

Переваги та недоліки доцентрових радіальних турбін у порівнянні з осьовими турбінами. Особливості застосування у складі газотурбінних агрегатів. Використання доцентрових турбін в агрегатах наддуву дизельних двигунів та в системах запуску газотурбінних двигунів.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Назвіть типи турбін, які використовують у складі газотурбінних агрегатів.
2. Поясніть будову та принцип дії осьової турбіни.
3. Розкрийте особливості турбіни як теплового двигуна.
4. Поясніть будову та принцип дії доцентрових радіальних турбін.
5. Назвіть основні переваги та недоліки доцентрових турбін.
6. Охарактеризуйте головні галузі застосування доцентрових турбін.

Література до теми

Основна

1. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 1. Загальна будова та класифікація [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2016. – 216 с.

Допоміжна

1. **Левенберг, В. Д.** Конструктивна будова головних газотурбінних агрегатів [Текст] / В. Д. Левенберг, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – 86 с.

2. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2005. – 344 с.

3. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 2. Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2008. – 420 с.

4. **Романовський, Г. Ф.** Теорія та розрахунок парових і газових турбін [Текст] / Г. Ф. Романовський, О. Я. Іпатенко, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – 292 с.

Тема 5. Особливості конструкції, переваги та недоліки, галузі застосування різних типів газотурбінних агрегатів. Їх класифікація

Класифікація газотурбінних агрегатів за призначенням. ГТА енергетичні, приводні, транспортні.

Класифікація газотурбінних агрегатів за характером підведення тепла в камері згоряння. ГТА безперервного (підведення тепла при постійному тиску в камері згоряння) та пульсуючого (підведення тепла при постійному об'ємі в камері згоряння) горіння. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за принципом охолодження робочого тіла. ГТА відкритого та закритого (замкнутого) циклів. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за типом силової турбіни. ГТА з вільною та блокованою силовими турбінами. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за типом генератора газу. ГТА з турбокомпресорним та вільно-поршневим генератором газу. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за кількістю компресорів. ГТА з однокаскадним, двокаскадним та трикаскадним компресором. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за кількістю роторних валів. ГТА одновальні, двовальні, тривальні та чотиривальні. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за способом передачі потужності споживачу. ГТА прямої дії (прямодіючі), з механічною (зубчастою) та електричною передачами. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за наявністю реверсу. ГТА нереверсивні, з реверсивною електричною передачею, з реверсивним редуктором та з реверсивною силовою турбіною. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за типом компонування. ГТА промислового та авіаційного типів. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Класифікація газотурбінних агрегатів за типом теплової схеми. ГТА простої теплової схеми (простого термодинамічного циклу) та складних теплових схем. ГТА з регенеративним підігрівом повітря перед камерою згоряння випускними газами. ГТА з проміжним охолодженням повітря між компресорами. ГТА з проміжним підігрівом газів між турбінами. ГТА з утилізацією тепла випускних газів. Конструктивні схеми, переваги та недоліки, галузі застосування.

Когенераційні установки з утилізацією тепла. Парогазові установки одно- та багатовальні, з теплоутилізаційними контурами одного, двох або трьох тисків. Контактні газотурбінні установки з теплоутилізаційним контуром. Технологія "Водолій".

Питання і завдання для самоконтролю

1. Як класифікують газотурбінні агрегати за призначенням?
2. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за характером підведення тепла в камері згоряння.
3. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за принципом охолодження робочого тіла.
4. Охарактеризуйте класифікацію газотурбінних агрегатів за типом силової турбіни.
5. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за типом генератора газу.
6. Охарактеризуйте класифікацію газотурбінних агрегатів за кількістю компресорів.
7. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за способом передачі потужності споживачу.
8. Охарактеризуйте основні типи газотурбінних агрегатів складних теплових схем.

Література до теми

Основна

1. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 1. Загальна будова та класифікація [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2016. – 216 с.

Допоміжна

1. **Левенберг, В. Д.** Конструктивна будова головних газотурбінних агрегатів [Текст] / В. Д. Левенберг, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – 86 с.
2. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2005. – 344 с.

3. **Романовський, Г. Ф.** Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 2. Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2008. – 420 с.

Змістовий модуль 2. ОЦІНЕННЯ МІЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН

Тема 6. Типи навантажень та деформацій. Статична та динамічна міцність

Типи навантажень. Нормальні і дотичні сили. Згинальні і крутні моменти. Навантаження статичні та динамічні.

Деформації прості і складні. Види простих деформацій: розтягнення (стискання), згин, кручення, зсув (зріз). Деформації пружні та пластичні.

Міцність як здатність матеріалу витримувати навантаження без руйнування. Руйнування як поява спеціальних, заздалегідь обумовлених ознак. Ознаки руйнування: тріщини, злами, пластичні деформації, знос, викришування поверхонь, корозійні пошкодження.

Статична та динамічна міцність. Жорсткість як здатність деталі зберігати форму під навантаженням. Критерії жорсткості.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Назвіть основні типи навантажень, що діють на деталі турбінних агрегатів.
2. У чому полягає різниця між навантаженнями статичними і динамічними?
3. Охарактеризуйте види простих деформацій.
4. Чим відрізняються пластичні деформації від пружних?
5. Що розуміють під міцністю деталей?
6. Поясніть термін "жорсткість деталі".

Література до теми

Основна

1. **Биргер, И. А.** Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

Допоміжна

1. **Александров, А. В.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высшая школа, 2003. – 560 с.

2. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1965. – 856 с.

3. **Биргер, И. А.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

4. **Гафаров, Р. Х.** Что нужно знать о сопротивлении материалов [Текст] : учеб. пособие / Р. Х. Гафаров, В. С. Жернаков. – М. : Машиностроение, 2001. – 276 с.

Тема 7. Міцнісні характеристики матеріалів, що використовуються у турбінобудуванні

Міцнісні характеристики матеріалів. Методика експериментального визначення. Діаграма деформування (розтягування) матеріалу. Відносне подовження і відносне звуження. Справжні та умовні напруження. Границя пропорційності. Закон Гука. Модуль пружності матеріалу при розтягуванні (модуль Юнга). Границя пружності. Границя текучості. Майданчик текучості. Границя міцності.

Особливості діаграми розтягування для легованих сталей і сплавів. Умовна границя текучості.

Втомлене руйнування матеріалу. Границя витривалості. Концентрація напружень. Зразки концентраторів напружень. Малоциклова втома. Термічна втома.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть, як експериментально визначають міцнісні характеристики матеріалів.
2. Що відкладають по осях діаграми розтягування матеріалу?
3. Чим відрізняються умовні напруження, які розраховуються для зразка матеріалу при розтягуванні, від справжніх?
4. Охарактеризуйте діаграму розтягування, побудовану для вуглецевої сталі.
5. Чим відрізняється "умовна границя текучості" від "границі текучості"?
6. Поясніть, що розуміють під границею пружності.
7. Що таке втомлене руйнування матеріалу?

Література до теми

Основна

1. **Биргер, И. А.** Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомшины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.

Допоміжна

1. **Александров, А. В.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высшая школа, 2003. – 560 с.
2. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1965. – 856 с.

3. **Биргер, И. А.** Соппротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

4. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.

5. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

6. **Орлов, П. И.** Основы конструирования [Текст] : справочно-метод. пособие в 3 кн. Кн. 1 / П. И. Орлов. – М. : Машиностроение, 1977. – 623 с.

Тема 8. Методи оцінення міцності деталей турбомашин

Способи оцінення міцності деталей турбомашин. Оцінення за величиною навантаження, яке відповідає руйнуванню. Оцінення за кількістю годин (циклів роботи) до руйнування. Оцінення за ймовірністю руйнування протягом заданого терміну служби.

Запас міцності. Перша форма запису умови міцності. Допустимий (нормативний) запас міцності. Фактори, що впливають на допустимий запас міцності.

Запас міцності за граничними напруженнями. Місцевий запас міцності.

Запас міцності за граничними навантаженнями. Запас міцності з несучої здатності.

Допустимі напруження. Друга форма запису умови міцності. Кореляція результатів оцінення міцності, виконаного різними способами.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Що таке "запас міцності"?
2. Які фактори найбільш істотно впливають на допустиме значення запасу міцності?

3. Що таке "запас міцності з несучої здатності"?
4. Чим відрізняється перша форма запису умови міцності від другої?
5. Дайте визначення поняттю "допустимі напруження".

Література до теми

Основна

1. **Биргер, И. А.** Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.

Допоміжна

1. **Александров, А. В.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высшая школа, 2003. – 560 с.

2. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1965. – 856 с.

3. **Биргер, И. А.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

4. **Орлов, П. И.** Основы конструирования [Текст] : справочно-метод. пособие в 3 кн. Кн. 1 / П. И. Орлов. – М. : Машиностроение, 1977. – 623 с.

5. **Серенсен, С. В.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность [Текст] / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.

Тема 9. Особливості роботи матеріалів при високій температурі

Тривала міцність матеріалів. Помірні та високі температури. Границя тривалої міцності. Залежність границі тривалої міцності від часу прикладання навантаження в подвійних логарифмічних координатах.

Вплив робочої температури. Аналітична залежність границі тривалої міцності від часу прикладання навантаження.

Спосіб визначення границі тривалої міцності Ф. Ларсона і Дж. Міллера. Параметр Ларсона-Міллера. Характеристики матеріалів, використовуваних підприємством ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект" для виготовлення робочих лопаток турбінних ступенів.

Повзучість матеріалу. Графік повзучості. Стадії повзучості. Вплив робочої температури і діючих в деталі напружень на збільшення з часом залишкової деформації. Швидкість повзучості. Границя повзучості. Оцінювання часу до руйнування деталі.

Релаксація напружень, що виникають під навантаженням в деталі. Графік релаксації напружень. Вплив робочої температури і допустимої за умовами роботи деформації деталі на зменшення з часом напружень в деталі.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Назвіть основні особливості роботи матеріалів під навантаженням при високих температурах.
2. Чим відрізняється границя тривалої міцності від границі короткочасної міцності?
3. Як впливає робоча температура на значення границі тривалої міцності?
4. Охарактеризуйте методику розрахунку границі тривалої міцності, запропоновану Ф. Ларсоном і Дж. Міллером.
5. Поясніть сутність явища "повзучість матеріалу"?
6. Чим відрізняється границя повзучості від умовної границі текучості?

Література до теми

Основна

1. Мандель, В. С. Предельные нагрузки и расчет на прочность

элементов ротора турбомашины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.

2. Термопрочность деталей машин [Текст] / под ред. И. А. Биргера и Б. Ф. Шора. – М : Машиностроение, 1975. – 455 с.

Допоміжна

1. **Александров, А. В.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высшая школа, 2003. – 560 с.

2. **Биргер, И. А.** Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

3. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1965. – 856 с.

4. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.

5. Прочность, устойчивость, колебания [Текст] : справочник в 3 т. Т. 1 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – 831 с.

Змістовий модуль 3. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ЛОПАТОЧНОГО АПАРАТУ ТУРБОМАШИН

Тема 10. Статична міцність робочих лопаток. Розтягнення профільної частини робочих лопаток відцентровими силами

Статична міцність робочих лопаток осьових турбомашин. Навантаження, які діють на робочі лопатки турбомашин при обертанні ротора. Вплив вібрації та високої температури.

Розтягування профільної частини робочих лопаток відцентровими силами. Основні геометричні параметри, що характеризують конструкцію

лопаток. Відцентрова сила, що діє на виділений елемент профільної частини робочої лопатки. Відцентрова сила, що діє в довільному перерізі робочої лопатки. Напруження розтягнення, що виникають в довільному перерізі лопатки. Зміна напружень розтягнення за довжиною профільної частини робочої лопатки.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Які навантаження діють на профільну частину робочих лопаток осьових турбомашин при обертанні ротора?
2. Охарактеризуйте вплив вібрації та високої температури на міцностний стан робочих лопаток.
3. Поясніть, як змінюються напруження розтягнення за довжиною профільної частини робочих лопаток.
4. Поясніть, як визначається відцентрова сила, що діє на виділений елемент профільної частини робочої лопатки.
5. Поясніть, як визначається відцентрова сила, що діє в довільному перерізі робочої лопатки.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Дондошанский, В. К.** Динамика и прочность судовых газотурбинных двигателей [Текст] / В. К. Дондошанский. – Л. : Судостроение, 1978. – 336 с.
2. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.
3. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
4. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.
6. **Патлайчук, В. М.** Деталі проточних частин турбінних двигунів [Текст] / В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1999. – 89 с.
7. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.
8. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 11. Робоча лопатка постійного перерізу. Робоча лопатка змінного перерізу

Робоча лопатка постійного перерізу. Особливості конструкції. Області застосування. Напруження розтягнення від відцентрових сил в кореневому перерізі лопатки. Модифікації формули визначення напружень

розтягнення. Вплив густини матеріалу, частоти обертання ротора, геометричних розмірів ступеня (довжини лопаток, середнього діаметра, кільцевої площі проточної частини) та потужності турбомашини на величину напружень розтягнення.

Робоча лопатка змінного перерізу. Особливості конструкції. Необхідність застосування таких лопаток. Степеневий закон зміни площі поперечного перерізу лопатки за довжиною. Визначення параметрів даного закону за трьома відомими площами поперечного перерізу. Розрахунок напружень розтягнення для кореневого (найбільш небезпечного) перерізу робочої лопатки. Визначення напружень розтягнення для довільного перерізу робочої лопатки.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Як визначити величину напружень розтягнення від відцентрових сил в кореновому перерізі робочої лопатки постійного за довжиною перерізу?
2. Які параметри впливають на величину напружень розтягнення для лопатки постійного за довжиною перерізу?
3. Наведіть приклади найчастіше використовуваних в практичних розрахунках модифікацій формули для визначення напружень розтягнення в кореновому перерізі робочої лопатки постійного перерізу.
4. Поясніть необхідність зменшення площі поперечного перерізу робочих лопаток від кореня до периферії.
5. Поясніть сутність методу визначення параметрів степеневого закону за трьома відомими площами поперечного перерізу робочої лопатки.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых

турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.

2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомашины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

2. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

3. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

4. **Патлайчук, В. М.** Деталі проточних частин турбінних двигунів [Текст] / В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 1999. – 89 с.

5. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.

6. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 12. Чисельний метод розрахунку робочих лопаток на розтягнення. Рівномісна лопатка

Особливості визначення напружень розтягнення від відцентрових сил в профільній частині робочих лопаток, оснащених бандажною полицею (стрічкою).

Чисельний метод визначення напружень розтягнення в профільній частині робочих лопаток. Особливості його застосування для охолоджуваних робочих лопаток.

Рівномісна робоча лопатка. Спосіб конструювання рівномісної лопатки шляхом підбору температурного поля за її довжиною. Можливості застосування такого способу на практиці. Спосіб конструювання рівномісної робочої лопатки шляхом підбору площі її поперечного перерізу. Комбінована робоча лопатка, що складається з рівномісної внутрішньої частини і зовнішньої частини постійного перерізу.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть сутність чисельного методу визначення напружень розтягнення в профільній частині робочих лопаток.
2. Поясніть особливості розрахунку напружень розтягнення для робочих лопаток, оснащених бандажною полицею (стрічкою).
3. Що таке "рівномісна робоча лопатка"?
4. Як можна створити рівномісну лопатку підбором температурного поля за її довжиною?
5. Як можна створити рівномісну лопатку підбором за її довжиною площі поперечного перерізу?

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. Локай, В. И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. Максимова, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомашины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

2. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

3. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

4. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 13. Згин робочих лопаток газодинамічними силами. Згин робочих лопаток відцентровими силами. Визначення запасу міцності профільної частини робочих лопаток

Згин робочих лопаток газодинамічними силами. Рівняння Ейлера для розрахунку газодинамічної сили в проекції на осьовий та коловий напрямки. Головні осі інерції профілю робочої лопатки – вісь мінімальної та вісь максимальної жорсткості. Кут зсуву координатних систем. Розрахунок складових газодинамічної сили в проекції на головні осі інерції. Визначення згинальних моментів, що діють в кореневому (найбільш небезпечному) перерізі робочої лопатки. Розрахунок напружень від газодинамічного згину для довільної точки кореневого перерізу робочої лопатки. Моменти опору і осьові моменти інерції профілю робочої лопатки.

Згин робочих лопаток відцентровими силами. Особливості появи даного згину. Визначення згинальних моментів, що діють в кореновому перерізі робочої лопатки. Розрахунок напружень від відцентрового згину для довільної точки коренового перерізу робочої лопатки.

Розвантаження згину робочих лопаток. Умова повного розвантаження в проекції на головні осі інерції. Графічна залежність зміни напружень газодинамічного і відцентрового згинів, а також їх суми за довжиною профільної частини робочої лопатки.

Визначення запасу міцності профільної частини робочих лопаток. Умова міцності. Спрощений розрахунок сумарних напружень для коренового (найбільш небезпечного) перерізу робочої лопатки. Точки профілю, найбільш віддалені від головних осей інерції.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Як визначаються складові газодинамічної сили в проекції на коловий та осьовий напрямки?
2. Що таке "головні осі інерції" і як вони проходять через профіль робочої лопатки?
3. Як визначаються згинальні моменти при газодинамічному згині для коренового перерізу робочої лопатки?
4. Як визначаються напруження газодинамічного згину для довільної точки коренового перерізу робочої лопатки?
5. Чим пояснюється поява в робочих лопатках згину через позацентрове прикладення відцентрової сили?

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.

2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомшины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

2. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

3. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

4. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 14. Вібрація робочих лопаток турбомашин. Головні поняття. Причини вібрації

Вільні коливання робочих лопаток. Частота вільних коливань (власна частота коливань). Вимушені коливання робочих лопаток. Частота вимушених коливань.

Прості та складні форми коливань робочих лопаток. Згинні форми коливань лопаток. Крутильні форми коливань лопаток. Вузлові лінії. Співвідношення між частотами вільних коливань для лопатки постійного перерізу.

Графік вільних коливань. Амплітуда коливань. Період коливань.

Логарифмічний декремент коливань. Фактори, що впливають на логарифмічний декремент коливань.

Графік вимушених коливань. Резонансний інтервал. Вплив логарифмічного декремента коливань і величини зовнішньої сили, що викликає коливання, на прогин робочої лопатки при резонансі.

Причини вібрації робочих лопаток. Група причин, обумовлених нерівномірністю потоку по колу проточної частини турбомашини. Вплив вихідних і вхідних кромок соплових лопаток. Вплив стійок в проточній частині. Вплив відборів робочого тіла з проточної частини. Вплив парціального впуску робочого тіла. Вплив вхідних і випускних пристроїв газотурбінного двигуна.

Група причин вібрації, обумовлених порушенням обтікання потоком профілю лопатки. Зрив потоку з профілю. Обертаємий зрив потоку. Автоколивання лопаток (флатер).

Передача вібрації на робочі лопатки від суміжних деталей.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Чим відрізняються вільні коливання робочих лопаток від вимушених коливань?
2. Чим визначається частота вимушених коливань?
3. Охарактеризуйте прості форми коливань робочих лопаток.
4. Назвіть основні групи причин, що викликають вібрацію робочих лопаток.
5. Охарактеризуйте групу причин вібрації, обумовлених порушенням обтікання потоком профілю лопатки.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.

2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомашины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.

2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

4. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

5. Прочность, устойчивость, колебания [Текст] : справочник в 3 т. Т. 3 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – 568 с.

6. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 15. Визначення власної частоти коливань робочих лопаток енергетичним методом. Вплив різних факторів на частоту коливань

Визначення власної частоти коливань робочої лопатки. Сутність енергетичного методу. Розрахункова схема лопатки, що коливається.

Рівняння пружної лінії робочої лопатки. Кінетична енергія лопатки, що коливається. Потенційна енергія лопатки, що коливається. Формула Релея.

Залежність ймовірності настання резонансу від величини власної частоти коливань робочої лопатки. Вплив використовуваного матеріалу, площі поперечного перерізу, осьового моменту інерції, температури металу робочої лопатки на значення її власної частоти коливань. Залежність власної частоти коливань від частоти обертання ротора.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть сутність енергетичного методу.
2. Як оцінюється кінетична енергія робочої лопатки, що коливається?
3. Як можна оцінити потенційну енергію робочої лопатки, що коливається?
4. Які основні фактори впливають на значення власної частоти коливань робочої лопатки?
5. Охарактеризуйте залежність власної частоти коливань робочої лопатки від частоти обертання ротора.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомшины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
2. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.
3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.
5. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 16. Оцінка напружень в робочій лопатці при резонансі. Резонансні частоти обертання турбінного двигуна. Резонансна діаграма коливань

Напруження згину в кореневому перерізі робочої лопатки постійного перерізу при резонансі. Вплив величини сили, що викликає коливання, довжини робочої лопатки, логарифмічного декременту коливань, моменту опору і наявності бандажного пристрою (полки або стрічки) на значення напружень згину при резонансі.

Вплив форми коливань робочої лопатки на значення напружень згину при резонансі. Співвідношення між напруженнями газодинамічного згину робочих лопаток і напруженнями згину при резонансі.

Резонансні частоти обертання турбінного двигуна. Допустима різниця між робочою частотою обертання ротора і резонансною.

Резонансна діаграма коливань (діаграма Кемпбелла). Особливості її побудови для парових і газових турбін. Вплив конструктивного коефіцієнта (коефіцієнта кратності) на величину напружень згину при резонансі.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Як можна оцінити напруження згину в кореновому перерізі робочої лопатки постійного перерізу при резонансі?
2. Як впливає наявність бандажа на напруження згину при резонансі?
3. Яка форма згинальних коливань є найбільш небезпечною для робочої лопатки при виникненні резонансу?
4. Як впливає довжина робочої лопатки на напруження згину в ній при резонансі?
5. Охарактеризуйте методику визначення резонансних частот обертання турбомашини за допомогою діаграми Кемпбелла.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

2. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.

3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

4. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

5. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

**Тема 17. Забезпечення надійності робочих лопаток при
коливаннях. Використання бандажів та зв'язуючого дрота для
боротьби з вібрацією. Демпфірування коливань**

Забезпечення надійності робочих лопаток при коливаннях. Потовщення небезпечного перерізу лопаток. Вибір відповідного виникаючим напруженням матеріалу. Застосування операцій зі спеціального зміцнення поверхні лопаток. Зміна власної частоти коливань робочих лопаток (частотна відбудова). Зміна конструкції статора турбомашини (зміна коефіцієнта кратності). Збільшення осьового зазору між елементами статора, що викликають коливання, і робочими лопатками. Застосування бандажних пристроїв і поєднувального дроту. Підвищення демпфірувальної здатності лопаток. Вказівка заборонених частот обертання.

Типи бандажних пристроїв, що використовуються в осьових турбомашинах. Особливості конструкції, вплив на власну частоту коливань робочих лопаток і на напруження при резонансі. Особливості використання поєднувального дроту.

Способи демпфірування коливань робочих лопаток. Демпфірування як гасіння коливань тертям. Демпфірування в матеріалі лопатки (внутрішнє демпфірування), демпфірування в місці кріплення робочої лопатки до ротора, аеродинамічне демпфірування.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте основні способи забезпечення надійності робочих лопаток при резонансі.
2. Які типи бандажних пристроїв застосовують в парових і газових турбінах?
3. Як використовується поєднувальний дріт для боротьби з вібрацією робочих лопаток?
4. Що розуміють під "демпфіруванням коливань"?
5. Охарактеризуйте сутність демпфірування в матеріалі робочої лопатки.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомшины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.
3. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Допоміжна

1. **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А. Г. Костюк. – М. : МЭИ, 2007. – 476 с.

2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

3. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

4. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

5. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

6. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.

Тема 18. Визначення зусиль контакту для елементів кріплення робочої лопатки до ротора. Розрахунок кріплення робочої лопатки на зм'яття

Основні типи кріплень робочих лопаток до ротора. Колові та осьові види кріплень. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Визначення зусиль контакту в місцях кріплення робочих лопаток до ротора. Розрахунок зусиль контакту для Т-образного кріплення, кріплення типу "ластівчин хвіст" і ялинкового кріплення.

Розрахунок на зминання кріплення робочої лопатки до ротора. Визначення напружень зминання. Допустимі напруження зминання. Граничний тиск зминання для різних типів зминаємих поверхонь.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Який вид кріплення робочих лопаток до ротора найбільш поширений в осьових газових турбінах?
2. Чим принципово відрізняються один від одного колові та осьові види кріплень робочих лопаток?
3. Як можна розрахувати зусилля контакту для Т-образного кріплення робочої лопатки?
4. Поясніть методику визначення зусиль контакту для ялинкового кріплення робочих лопаток.
5. Як залежить граничний тиск зминання від типу зминаємої поверхні?

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомшины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.
3. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

Допоміжна

1. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
2. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

3. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

4. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.

Тема 19. Загальний метод розрахунку на міцність елементів кріплення робочої лопатки. Визначення зусиль на ободі диска турбомашини від робочих лопаток та елементів їхнього кріплення

Загальний метод розрахунку на міцність елементів кріплення робочої лопатки до ротора. Визначення небезпечних перерізів місць кріплення, які підлягають перевірці на міцність. Небезпечні перерізи для Т-образного кріплення, кріплення типу "ластівчин хвіст" і ялинкового кріплення.

Розрахунок на міцність елемента ялинкового хвостовика. Визначення робочих навантажень. Складання системи рівнянь для граничних навантажень, кожного з яких достатньо для руйнування. Складання системи рівнянь для граничних навантажень, спільна дія яких призводить до руйнування. Умова втрати несучої здатності. Розрахунок запасу міцності елемента ялинкового хвостовика.

Визначення навантажень на ободі диска від маси робочих лопаток і елементів їх кріплення. Зовнішній розрахунковий радіус диска. Пояс кріплення. Густина пояса кріплення. Відцентрова сила, що діє на пояс кріплення при обертанні ротора.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте найбільш небезпечні перерізи для Т-образного кріплення робочих лопаток до ротора.

2. Охарактеризуйте найбільш небезпечні перерізи для ялинкового кріплення робочих лопаток до ротора.

3. Як складається умова втрати несучої здатності при розрахунку на міцність елемента ялинкового хвостовика?
4. Що таке "пояс кріплення" робочих лопаток?
5. Як визначається відцентрова сила на ободі диска від маси робочих лопаток і елементів їх кріплення?

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомшины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.

Допоміжна

1. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Змістовий модуль 4. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ РОТОРІВ ТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ

Тема 20. Характеристики головних типів роторів турбоагрегатів

Ротори осьових турбомашин. Класифікація роторів за способом виготовлення. Класифікація роторів за конструкцією.

Суцільноковані ротори. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Дискові складені ротори. Ротори з насадними дисками. Ротори зі стяжними болтами. Ротори з радіальними штифтами. Ротори з фланцевим з'єднанням. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Дисково-барабанні складені ротори. Ротори із запресуванням і радіальними штифтами. Ротори зі стяжними болтами. Ротори з фланцевим з'єднанням. Зварні ротори. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Барабанні складені ротори. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

З'єднання роторів турбомашин. Жорсткі (фланцеві) з'єднувальні муфти. Рухливі з'єднувальні муфти. Еластичні (пружні) з'єднувальні муфти. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Назвіть головні типи роторів осьових турбомашин за способом виготовлення та за конструкцією.

2. Охарактеризуйте будову, назвіть переваги та недоліки суцільнокованих роторів.

3. Охарактеризуйте будову, назвіть переваги та недоліки складених роторів.

4. Проаналізуйте конструкцію дискових складених роторів.
5. Поясніть конструкцію дисково-барабанних складених роторів.
6. Проаналізуйте конструкцію барабанних складених роторів.
7. Поясніть головні типи з'єднань роторів турбомашин.
8. Охарактеризуйте будову зубчастої (шлицьової) муфти.

Література до теми

Основна

1. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.

Допоміжна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.

2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

3. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

4. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКІ, 1972. – 114 с.

5. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

6. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

7. **Патлайчук, В. М.** Ротори турбінних двигунів [Текст] / В. М. Патлайчук. – Миколаїв : УДМТУ, 2001. – 78 с.

8. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 21. Розрахунок барабанного ротора. Рівняння рівноваги навантаженого диска

Розрахунок циліндричної обичайки барабанного ротора. Сили, що діють на виділений елемент обичайки. Складання рівняння рівноваги в проекції на радіальний напрямок. Розрахунок колових (тангенціальних) напружень. Умова міцності. Порівняння міцностних властивостей сталевих і титанових барабанних роторів.

Рівняння рівноваги навантаженого диска. Сили, що діють на виділений елемент диска. Радіальні напруження на зовнішній і на внутрішній поверхнях диска. Складання рівняння рівноваги в проекції на радіальний напрямок.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Які сили діють на елемент циліндричної обичайки барабанного ротора?
2. Поясніть методику складання рівняння рівноваги сил, що діють на елемент барабанного ротора.
3. Як визначаються колові напруження в циліндричній обичайці барабанного ротора?
4. Що викликає появу радіальних напружень на зовнішній і на внутрішній поверхнях диска?
5. Поясніть методику складання рівняння рівноваги сил, що діють на елемент диска.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.

Допоміжна

1. **Демьянушко, И. В.** Расчет на прочность вращающихся дисков [Текст] / И. В. Демьянушко, И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 247 с.
2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
3. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. Максимова, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
4. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 22. Визначення запасу міцності за руйнівними обертами для першої та другої форм руйнації диска

Особливості та форми руйнування дисків турбомашин. Визначення запасу міцності за руйнівними обертами для першої форми руйнування

диска. Зміна колових напружень в диску зі зміною частоти обертання ротора. Граничне по пружності число обертів. Граничне по текучості число обертів. Руйнівне число обертів ротора. Рівняння рівноваги диска в момент руйнування. Розрахунок запасу міцності для даної форми руйнування. Зміна конструкції диска з метою збільшення запасу міцності.

Визначення запасу міцності за руйнівними обертами для другої форми руйнування диска. Зміна радіальних напружень в диску зі зміною частоти обертання ротора. Зони пружних і пластичних деформацій. Радіус поділу зон. Рівняння рівноваги зовнішньої кільцевої частини диска в момент руйнування. Розрахунок запасу міцності для даної форми руйнування.

Єдина формула для визначення запасу міцності диска за руйнівними обертами. Умова міцності. Практична схема визначення запасу міцності.

Питання і завдання для самоконтролю

1. У чому полягає різниця між першою та другою формами руйнування диска?
2. Які напруження є домінуючими при першій і при другій формах руйнування диска?
3. Що розуміють під терміном "руйнівне число обертів ротора"?
4. Як проводиться визначення запасу міцності для першої форми руйнування диска?
5. Як проводиться визначення запасу міцності для другої форми руйнування диска?

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.

2. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.

Допоміжна

1. **Демьянушко, И. В.** Расчет на прочность вращающихся дисков [Текст] / И. В. Демьянушко, И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 247 с.

2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.

3. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

4. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

5. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

6. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 23. Рівномісний диск. Поняття про нейтральний радіус диска. Коливання дисків

Рівномісний диск. Умова рівномірності. Рівняння рівноваги навантаженого елемента диска в момент руйнування. Зміна товщини рівномісного диска за радіусом. Особливості профілювання рівномісного диска з постійною за радіусом температурою.

Поняття про нейтральний радіус диска. Зміна запасу міцності диска за руйнівними обертами внаслідок зміни конфігурації диска. Оцінення величини нейтрального радіусу.

Коливання дисків турбомашин. Прості і складні форми коливань. Зонтичні коливання. Розташування вузлових ліній у вигляді вузлових кіл. Причини, що викликають дані коливання.

Віялові коливання дисків. Розташування вузлових ліній у вигляді вузлових діаметрів. Причини, що викликають дані коливання. Явище "біжучої хвилі".

Питання і завдання для самоконтролю

1. Дайте визначення умові рівноміцності при проектуванні дисків.
2. Поясніть характер зміни товщини рівноміцного диска за радіусом.
3. Як використовується "нейтральний радіус" диска для оцінення його міцностного стану?
4. Охарактеризуйте основні форми коливань дисків турбомашин.
5. Що є причиною віялових коливань дисків?

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Левин, А. В.** Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин [Текст] / А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон. – Л. : Машиностроение, 1981. – 710 с.
3. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.

Допоміжна

1. **Демьянушко, И. В.** Расчет на прочность вращающихся дисков [Текст] / И. В. Демьянушко, И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 247 с.
2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.
5. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 24. Поняття про критичне число обертання ротора.

Визначення критичних обертів енергетичним методом. Вплив різних факторів на критичне число обертання вала

Критичне число обертів ротора. Ексцентриситет розташування центру тяжіння. Однодисковий міжопорний ротор з вертикальним розташуванням вала. Прогин вала ротора при обертанні. Критична кутова швидкість обертання.

Однодисковий міжопорний ротор з горизонтальним розташуванням валу. Урахування впливу прогину вала від власної маси. Зв'язок між критичною швидкістю обертання і власною частотою коливань ротора. Форми коливань лінії валу.

Застосування енергетичного методу до визначення критичних обертів ротора. Розрахунок потенційної і кінетичної енергії вала, що коливається. Зіставлення даних енергій для двох характерних положень лінії валу.

Вплив гіроскопічних моментів дисків, податливості опор і конструкції ротора на критичне число його оборотів.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Чим пояснюються коливання лінії вала ротора турбомашини при обертанні?
2. Проаналізуйте сили, що діють на однодисковий міжопорний ротор при його обертанні.
3. Що таке "критична кутова швидкість обертання ротора"?
4. Як використовується енергетичний метод для визначення критичних обертів ротора?
5. Охарактеризуйте найпростіші форми коливань лінії вала ротора.

Література до теми

Основна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. Максимова, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

Допоміжна

1. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
2. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст]

/ З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

3. Прочность, устойчивость, колебания [Текст] : справочник в 3 т. Т. 3 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – 568 с.

4. Скубачевский, Г. С. Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Змістовий модуль 5. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ

Тема 25. Визначення осьових зусиль, що діють на ротор турбомашини. Розвантажувальні порожнини. Ущільнення турбомашин

Визначення осьових зусиль, що діють на ротор турбомашини. Розрахункова схема ротора. Розподіл контуру, обведеного навколо ротора, на ділянки. Визначення геометричних і режимних параметрів на окремих ділянках. Розрахунок осьового навантаження на упорний підшипник.

Методи зменшення навантаження на упорний підшипник. Використання розвантажувальних порожнин в парових реактивних турбінах. З'єднання компресорних і турбінних роторів в газотурбінних двигунах. Використання розвантажувальних порожнин в газотурбінних агрегатах.

Ущільнення периферійних радіальних зазорів турбомашин. Ущільнення повітряно-газових порожнин. Ущільнення масляних порожнин. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть методику визначення осьових навантажень, що діють на ротор турбомашини.
2. Як здійснюється визначення геометричних і режимних параметрів для окремих ділянок контура, обведеного навколо досліджуваного ротора турбомашини?
3. Як використовуються розвантажувальні порожнини для зменшення навантажень на упорний підшипник в парових турбінах?
4. Як використовуються розвантажувальні порожнини для зменшення навантажень на упорний підшипник в газотурбінних двигунах?
5. В яких місцях сучасних газотурбінних двигунів організовують розвантажувальні порожнини?

Література до теми

Основна

1. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет на прочность элементов ротора турбомашин [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1972. – 114 с.
2. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.

Допоміжна

1. Конструирование и автоматизированное проектирование газовых уплотнений судовых турбомашин [Текст] / Н. П. Седько, Н. В. Ващенко, В. Г. Безродный, А. М. Шихватов. – Николаев : НКИ, 1991. – 72 с.
2. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
3. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. Максудова, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

4. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.

5. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.

6. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 26. Конструкція опор турбомашин. Основи їх перевірочних розрахунків на міцність

Вимоги, що пред'являються до опор турбомашин. Розташування опор в сучасних парових турбінах і газотурбінних агрегатах.

Опори з підшипниками кочення. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування. Розрахунок довговічності кулькових і роликів підшипників кочення. Вибір підшипників кочення з використанням каталогів і довідників.

Опори з підшипниками ковзання. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування. Основи проектування опорних і упорних підшипників ковзання.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Назвіть головні вимоги до конструкцій опор турбомашин.
2. Проаналізуйте послідовність конструювання опор турбомашин.
3. Розкрийте головні переваги та недоліки опор з підшипниками кочення.
4. Поясніть вибір числа опор для роторів газотурбінних агрегатів.

5. Поясніть способи кріплення кілець підшипників кочення в опорах турбомашин.
6. Розкрийте особливості конструкції опор гнучких роторів.
7. Розкрийте головні переваги та недоліки опор з підшипниками ковзання.
8. Поясніть принцип роботи опорного підшипника ковзання.

Література до теми

Основна

1. **Перель, Л. Я.** Подшипники качения : расчет, проектирование и обслуживание опор [Текст] : справочник / Л. Я. Перель. – М. : Машиностроение, 1983. – 543 с.
2. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.
3. **Чернавский, С. А.** Подшипники скольжения [Текст] / С. А. Чернавский. – М. : Машгиз, 1963. – 244 с.

Допоміжна

1. **Воскресенский, В. А.** Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка) [Текст] / В. А. Воскресенский, В. И. Дьяков. – М. : Машиностроение, 1980. – 224 с.
2. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

Тема 27. Конструкція корпусів турбінних агрегатів. Основи їх перевірочних розрахунків на міцність

Основні принципи конструювання корпусів турбомашин. Вхідні пристрої газотурбінних агрегатів осьового, кільцевого, коліноподібного та равликового типів. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Корпуси осьових компресорів. Вимоги, що пред'являються до них. Особливості конструкції. Способи виготовлення. Монтажні і технологічні роз'єми. Одностінні та двостінні корпуси.

Корпуси газових турбін. Вимоги, що пред'являються до них. Особливості конструкції. Способи виготовлення. Монтажні і технологічні роз'єми. Одностінні та двостінні корпуси.

Газовипускні пристрої газотурбінних агрегатів. Пристрої осьового, равликового та коліноподібного типів. Особливості конструкції, переваги і недоліки, області застосування.

Рами та теплоізолюючі контейнери (кожуха) газотурбінних двигунів. Особливості конструкції. Варіанти застосування в стаціонарній і судновій енергетиці.

Напруження в основних типах корпусів турбомашин. Розрахунок фланцевих з'єднань. Запаси міцності корпусів турбомашин.

Питання і завдання для самоконтролю

1. Поясніть призначення вхідних пристроїв газотурбінних агрегатів.
2. Розкрийте особливості будови вхідних пристроїв осьового, кільцевого та радіальних типів.
3. Поясніть особливості будови корпусів осьових компресорів.
4. Розкрийте особливості будови корпусів газових турбін.
5. Охарактеризуйте будову газовипускних пристроїв осьового типу.

6. Проаналізуйте будову газовипускних пристроїв радіальних типів.
7. Поясніть призначення та будову рам газотурбінних агрегатів.
8. Охарактеризуйте призначення та будову теплоізолюючих контейнерів газотурбінних агрегатів.

Література до теми

Основна

1. **Мандель, В. С.** Предельные нагрузки и расчет лопаток и элементов корпуса турбомашины [Текст] / В. С. Мандель. – Николаев : НКИ, 1973. – 92 с.
2. **Романовський, Г. Ф.** Газотурбінні агрегати : у 2 ч. Ч. 2. Елементи конструкцій [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2017. – 198 с.

Допоміжна

1. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин [Текст] / под ред. Г. С. Жирицкого. – М. : Машиностроение, 1968. – 520 с.
2. **Локай, В. И.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов : теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Струнkin. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
3. **Манушин, Э. А.** Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. **Паллей, З. С.** Конструкция и прочность авиационных ГТД [Текст] / З. С. Паллей, И. М. Королев, Э. В. Ровинский. – М. : Транспорт, 1967. – 428 с.
5. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные ГТД : Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М. : Машиностроение, 1981. – 550 с.

3. ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДЛЯ МОДУЛЬНИХ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

Змістовий модуль 1. ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ

1. Поясніть будову газотурбінного агрегату простого термодинамічного циклу.
2. Назвіть процеси, які складають цикл Брайтона.
3. Поясніть призначення компресора у складі газотурбінного агрегату.
4. Поясніть призначення камери згоряння у складі газотурбінного агрегату.
5. Поясніть призначення турбіни у складі газотурбінного агрегату.
6. Дайте характеристику системам, обслуговуючим газотурбінні агрегати.
7. Поясніть, які типи компресорів використовують у складі газотурбінних агрегатів.
8. Розкрийте будову та принцип дії осьового компресора.
9. Охарактеризуйте переваги осьових компресорів.
10. Охарактеризуйте недоліки осьових компресорів.
11. Поясніть необхідність ступеневого підведення первинного повітря по довжині зони горіння.
12. Як здійснюється стабілізація полум'я в камерах згоряння газотурбінних агрегатів?
13. Як здійснюється турбулізація потоку в зоні горіння?
14. Поясніть принцип дії відцентрової форсунки.
15. Назвіть основні типи камер згоряння газотурбінних агрегатів.
16. Проаналізуйте особливості конструкції прямотокових і протитокових камер згоряння.

17. Назвіть типи турбін, які використовують у складі газотурбінних агрегатів.
18. Поясніть будову та принцип дії осьової турбіни.
19. Розкрийте особливості турбіни як теплового двигуна.
20. Поясніть будову та принцип дії доцентрових радіальних турбін.
21. Назвіть основні переваги та недоліки доцентрових турбін.
22. Охарактеризуйте головні галузі застосування доцентрових турбін.
23. Як класифікують газотурбінні агрегати за призначенням?
24. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за характером підведення тепла в камері згоряння.
25. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за принципом охолодження робочого тіла.

Змістовий модуль 2. ОЦІНЕННЯ МІЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН

1. Дайте визначення поняттям "міцність" та "жорсткість".
2. Назвіть основні ознаки руйнації деталей.
3. Назвіть найбільш навантажені деталі та вузли турбінних двигунів.
4. Дайте характеристику основним способам розрахунку деталей на міцність.
5. Розкрийте сутність методики розрахунку запасу міцності за граничними напруженнями.
6. Розкрийте сутність методики розрахунку запасу міцності за граничними навантаженнями.
7. Проаналізуйте головні фактори, які впливають на мінімальне допустиме значення запасу міцності.
8. Дайте визначення головним видам навантажень, що діють на деталі турбомашин.
9. Охарактеризуйте головні види деформацій деталей.

10. Проаналізуйте методику побудови діаграми деформування матеріалу та принципи її використання.
11. Дайте визначення границям пропорційності та пружності матеріалу. Наведіть приклади їхнього використання для міцностних розрахунків.
12. Дайте визначення границям текучості та міцності матеріалу. Наведіть приклади їхнього використання для міцностних розрахунків.
13. У чому полягає відмінність границі умовної текучості матеріалу від границі текучості?
14. Охарактеризуйте явище втомленої руйнації матеріалу. Дайте визначення границі витривалості матеріалу.
15. Розкрийте сутність явища термічної втоми матеріалу.
16. Проаналізуйте особливості роботи матеріалів при високій температурі.
17. Дайте характеристику явища "повзучості" матеріалу.
18. У чому полягає відмінність границі повзучості матеріалу від границі умовної текучості? Поясніть особливості їхнього використання.
19. Проаналізуйте методику розрахунку часу до руйнації деталі із використанням даних про другий етап повзучості матеріалу.
20. Охарактеризуйте явище "релаксації" напружень.

Змістовий модуль 3. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ЛОПАТОЧНОГО АПАРАТУ ТУРБОМАШИН

1. Дайте характеристику будові робочих лопаток осьових компресорів.
2. Які матеріали використовують для виготовлення робочих лопаток осьових компресорів?
3. Поясніть способи з'єднання робочих лопаток осьових компресорів з ротором.
4. Охарактеризуйте конструкцію напрямних лопаток осьових компресорів.

5. Поясніть будову поворотних напрямних лопаток компресорів.
6. Охарактеризуйте будову соплових лопаток осьових турбін.
7. Поясніть конструкцію робочих лопаток осьових турбін.
8. Проаналізуйте способи охолодження лопаток турбін газотурбінних агрегатів.
9. Дайте характеристику навантаженням, що діють на робочі лопатки турбомашин.
10. Розкрийте сутність понять "статична міцність" і "динамічна міцність".
11. Охарактеризуйте явище розтягнення профільної частини робочих лопаток відцентровими силами.
12. Проаналізуйте відмінності розрахунку на міцність робочих лопаток постійного і змінного перерізів.
13. Дайте характеристику чисельного методу розрахунку робочих лопаток на розтягнення.
14. Охарактеризуйте методики проектування рівномірної робочої лопатки.
15. Розкрийте сутність розрахунку робочих лопаток на міцність при їх згині газодинамічними силами.
16. Порівняйте природу виникнення та особливості згину робочих лопаток від дії газодинамічної та відцентрової сил.
17. Проаналізуйте методику розвантаження робочих лопаток від газодинамічного згину.
18. Проаналізуйте методику визначення запасу міцності профільної частини робочих лопаток.
19. Дайте характеристику причинам вібрації робочих лопаток турбомашин.
20. У чому полягає відмінність власної частоти коливань робочої лопатки від частоти її вимушених коливань?
21. Охарактеризуйте форми коливань робочих лопаток.

22. Розкрийте сутність методики визначення власної частоти коливань робочої лопатки енергетичним методом.
23. Охарактеризуйте вплив різних факторів на власну частоту коливань робочої лопатки.
24. Поясніть, як можна оцінити напруження в робочій лопатці постійного перерізу при резонансі.
25. Дайте характеристику резонансним частотам обертання турбінного двигуна.

Змістовий модуль 4. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ РОТОРІВ ТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ

1. Назвіть головні типи роторів осьових турбомашин за способом виготовлення та за конструкцією.
2. Охарактеризуйте будову, назвіть переваги та недоліки суцільнокованих роторів.
3. Охарактеризуйте будову, назвіть переваги та недоліки складених роторів.
4. Проаналізуйте конструкцію дискових складених роторів.
5. Поясніть конструкцію дисково-барабанних складених роторів.
6. Проаналізуйте конструкцію барабанних складених роторів.
7. Поясніть головні типи з'єднань роторів турбомашин.
8. Охарактеризуйте будову зубчастої (шлицьової) муфти.
9. Дайте характеристику критеріям, які використовуються для порівняння типів роторів турбомашин.
10. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування суцільнокованих роторів.
11. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування складених роторів.

12. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування дискових роторів.
13. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування барабанних роторів.
14. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування дисково-барабанних роторів.
15. Охарактеризуйте основні типи поєднань роторів турбоагрегатів між собою та із споживачем енергії.
16. Дайте характеристику методиці розрахунку барабанного ротора.
17. Поясніть методику складання рівняння рівноваги навантаженого диска.
18. Розкрийте сутність методики визначення запасу міцності диска за руйнівними обертами для першої форми його руйнації.
19. Розкрийте сутність методики визначення запасу міцності диска за руйнівними обертами для другої форми його руйнації.
20. Охарактеризуйте методику перевірного розрахунку диска за руйнівними обертами.
21. Проаналізуйте методику проектування рівномірного диска.

Змістовий модуль 5. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ

1. Назвіть головні вимоги до конструкцій опор турбомашин.
2. Проаналізуйте послідовність конструювання опор турбомашин.
3. Розкрийте головні переваги та недоліки опор з підшипниками кочення.
4. Поясніть вибір числа опор для роторів газотурбінних агрегатів.
5. Поясніть способи кріплення кілець підшипників кочення в опорах турбомашин.
6. Розкрийте особливості конструкції опор гнучких роторів.

7. Розкрийте головні переваги та недоліки опор з підшипниками ковзання.
8. Поясніть принцип роботи опорного підшипника ковзання.
9. Дайте визначення поняттю "критичне число обертання ротора".
10. Поясніть зв'язок між критичною частотою та власною частотою коливань ротора.
11. Розкрийте сутність методики визначення критичних обертів ротора енергетичним методом.
12. Проаналізуйте вплив різних факторів на критичне число обертання вала турбомашини.
13. Дайте характеристику методиці визначення осьових зусиль, що діють на ротор турбомашини.
14. Поясніть принципи використання розвантажувальних порожнин в турбінних агрегатах.
15. Дайте характеристику особливостей конструкції та галузей застосування підшипників кочення в опорах турбоагрегатів.
16. Дайте характеристику особливостей конструкції та галузей застосування підшипників ковзання в опорах турбоагрегатів.
17. Охарактеризуйте методику розрахунку довготривалості підшипників кочення.
18. Поясніть методику розрахунку опорних підшипників ковзання.
19. Поясніть особливості конструювання корпусів газотурбінних агрегатів.
20. Проаналізуйте особливості конструкції рам та теплоізолюючих контейнерів (кожухів) газотурбінних двигунів.

4. ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДО ЗАЛІКУ

1. Охарактеризуйте класифікацію газотурбінних агрегатів за типом силової турбіни.

2. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за типом генератора газу.
3. Охарактеризуйте класифікацію газотурбінних агрегатів за кількістю компресорів.
4. Поясніть класифікацію газотурбінних агрегатів за способом передачі потужності споживачу.
5. Охарактеризуйте основні типи газотурбінних агрегатів складних теплових схем.
6. Розкрийте будову та принцип дії відцентрового компресора.
7. Поясніть особливості конструкції робочих коліс відцентрових компресорів.
8. Назвіть переваги і недоліки відцентрових компресорів.
9. Поясніть особливості конструкції осевідцентрових компресорів.
10. Поясніть необхідність поділу робочого об'єму камер згоряння газотурбінних агрегатів на дві зони.
11. Поясніть функціональне призначення первинного і вторинного повітря в камерах згоряння.
12. Дайте визначення поняттю "тривала міцність".
13. Поясніть методику розрахунку границі тривалої міцності матеріалу.
14. Охарактеризуйте напрями створення рівномірної робочої лопатки.
15. Розкрийте методику визначення зусиль контакту для елементів замка робочої лопатки.
16. Розкрийте методику розрахунку замка робочої лопатки на зм'яття.
17. Дайте характеристику загального методу розрахунку на міцність елементів кріплення робочої лопатки.
18. Поясніть методику побудови і використання резонансної діаграми коливань.
19. Поясніть відмінності побудови резонансної діаграми коливань для парових турбін із сопловим регулюванням та для газових турбін.

20. Розкрийте сутність основних способів забезпечення надійності робочих лопаток турбомашин при коливаннях.
21. Порівняйте ефективність використання бандажів та зв'язуючого дрота для боротьби з вібрацією робочих лопаток.
22. Проаналізуйте методи демпфірування коливань робочих лопаток.
23. Поясніть особливості демпфірування коливань в матеріалі робочих лопаток.
24. Поясніть особливості демпфірування коливань в місцях кріплення робочих лопаток до ротора.
25. Дайте характеристику аеродинамічному демпфіруванню коливань робочих лопаток.

5. ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДО ЕКЗАМЕНУ

1. Дайте характеристику критеріям, які використовуються для порівняння типів роторів турбомашин.
2. Назвіть головні типи роторів осьових турбомашин за способом виготовлення та за конструкцією.
3. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування суцільнокованих роторів.
4. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування складених роторів.
5. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування дискових роторів.
6. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування дисково-барабанних роторів.
7. Поясніть особливості конструкції, переваги, недоліки та галузі застосування барабанних роторів.
8. Охарактеризуйте основні типи поєднань роторів турбоагрегатів між собою та із споживачем енергії.

9. Охарактеризуйте будову зубчастої (шлицьової) муфти.
10. Дайте характеристики методиці розрахунку барабанного ротора.
11. Поясніть методику складення рівняння рівноваги навантаженого диска.
12. Розкрийте сутність методики визначення запасу міцності диска за руйнівними обертами для першої форми його руйнації.
13. Розкрийте сутність методики визначення запасу міцності диска за руйнівними обертами для другої форми його руйнації.
14. Охарактеризуйте методику перевірного розрахунку диска за руйнівними обертами.
15. Проаналізуйте методику проектування рівномісного диска.
16. Охарактеризуйте види коливань дисків турбомашин. Назвіть причини їх виникнення.
17. Назвіть головні вимоги до конструкцій опор турбомашин.
18. Проаналізуйте послідовність конструювання опор турбомашин.
19. Розкрийте головні переваги та недоліки опор з підшипниками кочення.
20. Поясніть вибір числа опор для роторів газотурбінних агрегатів.
21. Поясніть способи кріплення кілець підшипників кочення в опорах турбомашин.
22. Розкрийте особливості конструкції опор гнучких роторів.
23. Розкрийте головні переваги та недоліки опор з підшипниками ковзання.
24. Поясніть принцип роботи опорного підшипника ковзання.
25. Дайте визначення поняттю "критичне число обертання ротора".
26. Поясніть зв'язок між критичною частотою та власною частотою коливань ротора.
27. Розкрийте сутність методики визначення критичних обертів ротора енергетичним методом.

28. Проаналізуйте вплив різних факторів на критичне число обертання вала турбомашини.
29. Дайте характеристику методиці визначення осьових зусиль, що діють на ротор турбомашини.
30. Поясніть принципи використання розвантажувальних порожнин в турбінних агрегатах.
31. Дайте характеристику особливостям конструкції та галузям застосування підшипників кочення в опорах турбоагрегатів.
32. Дайте характеристику особливостям конструкції та галузям застосування підшипників ковзання в опорах турбоагрегатів.
33. Охарактеризуйте методику розрахунку довготривалості підшипників кочення.
34. Охарактеризуйте методику розрахунку підшипників ковзання.
35. Поясніть характер зміни радіальних зазорів між корпусом і торцями робочих лопаток газових турбін на різних режимах роботи.
36. Поясніть необхідність ущільнення монтажних радіальних та осьових зазорів в газотурбінних агрегатах.
37. Як здійснюється ущільнення периферійних радіальних зазорів в газотурбінних агрегатах?
38. Охарактеризуйте основні типи ущільнень повітряно-газових порожнин газотурбінних агрегатів.
39. Поясніть будову та принцип дії лабіринтового ущільнення.
40. Поясніть будову та принцип дії щіткового ущільнення.
41. Поясніть будову та принцип дії сухих газодинамічних ущільнень.
42. Охарактеризуйте основні типи ущільнень масляних порожнин.
43. Поясніть призначення вхідних пристроїв газотурбінних агрегатів.
44. Розкрийте особливості будови вхідних пристроїв осьового, кільцевого та радіальних типів.
45. Поясніть особливості будови корпусів осьових компресорів.
46. Розкрийте особливості будови корпусів газових турбін.

47. Охарактеризуйте будову газовипускних пристроїв осьового типу.
48. Проаналізуйте будову газовипускних пристроїв радіальних типів.
49. Поясніть призначення та будову рам газотурбінних агрегатів.
50. Охарактеризуйте призначення та будову теплоізолюючих контейнерів газотурбінних агрегатів.