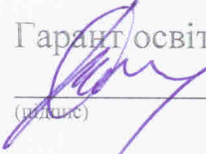


Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра конструкції авіаційних двигунів (№ 203)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми  
  
(підпис) О. В. Білогуб  
(ініціали та прізвище)

«  »    2021 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ОBOB'ЯЗКОВОЇ  
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**РЕСУРСНЕ ПРОЕКТУВАННЯ І ВИПРОБУВАННЯ  
АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**  
(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»  
(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність: 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма «Авіаційні двигуни та енергетичні установки»  
(найменування освітньої програми)

**Форма навчання: денна**

**Рівень вищої освіти:**  
другий (магістерський)

**Харків 2021 рік**

Розробник: С. В. Єпіфанов, докт. техн. наук, професор  
(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь і вчене звання)

  
(підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри  
конструкції авіаційних двигунів (203)  
(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 30 » серпня 2021 р.

Завідувач кафедри 203, д.т.н., професор

(ініціали та прізвище)

 С. В. Єпіфанов  
(науковий ступінь і вчене звання) (підпис)

## 1. Опис навчальної дисципліни

| Найменування показників                                                                                                       | Галузь знань, спеціальність, рівень вищої освіти                                          | Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Кількість кредитів – 5                                                                                                        | <b>Галузь знань:</b><br>13<br>«Механічна інженерія»<br>(шифр і назва)                     | Обов’язкова                                                                       |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |
| Кількість модулів – 2                                                                                                         | <b>Спеціальність:</b><br>134<br>«Авіаційна та ракетно-космічна техніка»<br>(шифр і назва) | <b>Навчальний рік</b><br>2021 / 2022                                              |
| Кількість змістових модулів – 2                                                                                               |                                                                                           | <b>Освітня програма:</b><br>Авіаційні двигуни та енергетичні установки<br>(назва) |
| <b>Індивідуальне завдання:</b><br><br><b>Розрахункова робота за темою:</b><br>«Оцінка ресурсу диска турбіни ГТД»<br>(назва)   |                                                                                           |                                                                                   |
| Загальна кількість годин – 48*/150                                                                                            |                                                                                           |                                                                                   |
| <b>Кількість тижневих годин для денної форми навчання:</b><br><br>аудиторних – 2,5<br><br>самостійної роботи студента – 6,375 | <b>Рівень вищої освіти:</b><br><br><u>другий (магістерський)</u>                          |                                                                                   |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |
|                                                                                                                               |                                                                                           |                                                                                   |

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить: для денної форми навчання – 48 / 102.

\* Аудиторне навантаження може бути зменшене або збільшене на одну годину в залежності від розкладу занять.

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета:** додати до знань студентів в області перевірочних розрахунків елементів конструкції на міцність, які вони одержали під час вивчення дисципліни «Конструкція та міцність АД», заглиблених знань з міцностної надійності деталей АД, їх ресурсного проектування, ресурсних випробувань, встановлення та подовження їх ресурсів згідно з прийнятою в галузі методологією.

**Завдання:** на підставі узагальнення знань з міцностної надійності, механізмів та моделей довговічності елементів АГТД викласти методологію їх ресурсного проектування та управління ресурсами в експлуатації.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей:**

**Загальні компетентності:** *Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми. Здатність до проведення досліджень для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності. Навички використання новітніх інформаційних технологій. Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків.*

**Спеціальні (фахові) компетентності:** *Здатність кваліфіковано обирати клас матеріалів для елементів конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки, у тому числі за нечітких умов і вимог. Здатність оцінювати техніко-економічну ефективність проектування, досліджень, технологічних процесів та інноваційних розробок з урахуванням невизначеності умов і вимог. Усвідомлення робочих процесів у системах та елементах авіаційної та ракетно-космічної техніки, необхідних для розуміння, опису, вдосконалення об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки та оптимізації їх параметрів. Здатність ставити та вирішувати професійні задачі на основі знань та розуміння гідравлічних, пневматичних, електричних та електронних систем.*

**Програмні результати навчання:** *Вміння розв'язувати складні інженерні завдання і проблеми авіаційної та / або ракетно-космічної техніки, що потребує оновлення та інтеграції знань, у тому числі в умовах неповної / недостатньої інформації та суперечливих вимог. Навички складання звітної документації за результатами робіт з виконання професійних (науково-технічних) задач, підготовки науково-технічних публікацій, доповідей та презентацій за результатами виконаних досліджень. Вміння використовувати новітнє спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності відповідно до освітньої програми. Навички прийняття рішень при виникненні нестандартних складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності в умовах невизначеності умов та вимог, наявності спектра думок та обмеженості часу. Готовність до подальшого навчання у сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки, механічної інженерії і дотичних галузей знань, яке значною мірою є автономним та самостійним. Вміння аналізувати передові наукові та технічні досягнення в галузі проектування та виробництва елементів та об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки в умовах різних етапів розвитку, використовуючи історичну, патентну та науково-технічну літературу. Вміння обґрунтовано призначати клас матеріалів для елементів та систем авіаційної та ракетно-космічної техніки, мати навички вибору методів модифікації їх властивостей. Розуміння принципів навички обґрунтованого призначення показників якості об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки. Навички організації виконання складних завдань у професійній діяльності шляхом послідовного та якісного виконання їхніх окремих етапів, в тому числі з залученням колективу виконавців. Вміння обчислювати напружено-деформований стан, визначати несінну здатність конструктивних елементів та надійність систем авіаційної та ракетно-космічної техніки та засобів промислового виробництва з використанням новітнього програмного забезпечення, яке використовується в галузі.*

**Міждисциплінарні зв'язки:** системи автоматичного управління авіаційних двигунів і енергетичних установок, конструкція та міцність АД та ЕУ, системи охолодження елементів АД і ЕУ, теорії ПРД, лопаткові машини, газова динаміка, теплопередача, опори матеріалів, інтеграція експлуатаційних характеристик силової установки і планера ла, віброакустика АД і ЕУ, перспективні технології виробництва АД і ЕУ.

### 3. Програма навчальної дисципліни

#### Модуль 1

##### Змістовий модуль 1

**ТЕМА 1.** Предмет вивчення та задачі дисципліни. Місце дисципліни в учбовому плані. Рекомендована література. Основні поняття та визначення. Характеристика АД як об'єкта проектування. Узагальнений польотний цикл (УПЦ). Надійність АД. Міцнісні відмови. Міцнісна надійність (МН – як основна характеристика конструкції саме АД).

**ТЕМА 2.** Показники МН деталі – безвідмовність та довговічність (технічний ресурс) у вірогідній формі. Приклад: безвідмовність деталі за критерієм тривалої міцності (ТМ). Поняття експлуатаційних ресурсів АД.

**ТЕМА 3.** Структура моделі МН елементів АД. Моделі (підмоделі) форми, руйнування, виробітку ресурсу та інше. Загальна структура моделі МН деталі.

**ТЕМА 4.** Моделі деформаційних властивостей конструкційних матеріалів. Умовна діаграма "σ-ε", основні показники пластичності матеріалів. Вплив температури на деформаційні властивості матеріалів. Дійсна діаграма "σ-ε". Дійсні напруження та залишкова деформація при руйнуванні.

**ТЕМА 5.** Поведінка матеріалу при тривалому сталому навантаженні в умовах підвищених температур. Моделі ТМ матеріалу: базова, Ларсона-Мілера та інші. Статистичні властивості моделей. Явище високотемпературної тривалої міцності та повзучості при сталому навантаженні, основні закономірності. Моделі повзучості: базова, ізохронна та узагальнена, їх особливості, засоби побудови та призначення. Взаємодії повзучості та ТМ. Вплив попередньої пластичної деформації на повзучість. Вплив тривалого статичного навантаження на пластичність та ТМ.

**ТЕМА 6.** Релаксація напруг з приводу високотемпературної повзучості матеріалу в локальних частинах деталі з жорсткими зв'язками. Основні кількісні закономірності та приклади виникнення явища.

**ТЕМА 7.** Моделі руйнування зразків матеріалу при циклічному навантаженні. Загальні відомості: форма циклів та їх параметри. Основні типи руйнування. Малоциклова втома (МЦВ). Багатоциклова втома (БЦВ) чи витривалість. МЦВ та БЦВ – спільне та різниці. БЦВ - моделі довговічності матеріалів деталей АД та ЕУ при багато - цикловому навантаженні (криві втоми або витривалості). Фізичні основи втоми. Механізм та особливості руйнування. Детерміновані моделі втоми при симетричному циклі. Симетричний цикл. Асиметричний цикл. Вплив стану поверхневого шару.

**ТЕМА 8.** Малоциклова втома матеріалу деталей АД та ЕУ. Криві деформування при малоцикловому навантаженні для матеріалів з різними властивостями. Універсальні моделі малоциклової втоми (МЦВ). Моделі МЦВ при «жорсткому» режимі навантаження. Моделі при «м'якому» режимі навантаження. Моделі Коффіна та Менсона. Врахування асиметрії циклу та концентрації напруг при «м'якому» навантаженні. Експериментальні моделі МЦВ. Статистичні моделі малоциклової втоми. Логнормальний розподіл.

#### Модульний контроль

#### Модуль 2

##### Змістовий модуль 2

**ТЕМА 9.** Загальна структура моделі НДС: пружність, пластичність та врахування повзучості. Тензори напруг та деформацій. Пластичність. Деформаційна теорія пластичності. Основні припущення. Метод змінних параметрів пружності. Метод гіперболи Нейбера. Повзучість в деталях АД. Основні положення деформаційної теорії повзучості (старіння). Алгоритм розрахунків повзучості за теорією старіння. Її обмеження для умов навантаження деталей АД та ЕУ.

**ТЕМА 10.** Основи механіки руйнування. Історичні аспекти та сучасні галузеві проблеми. Об'єкт та задачі механіки руйнування. Напряга при вершині тріщини. Типи розтріскування. Рішення Ірвіна. Коефіцієнт інтенсивності напруг. Зона пластичності при вершині тріщини. В'язкість руйнування. Порівняльні приклади (за типами матеріалу). Критерії руйнування з причини

зросту тріщини: межового розкриття тріщини та енергетичний. Вплив форми та особливостей розташування тріщини на деталі. Розрахунок циклічної довговічності з урахуванням періоду розвитку тріщини. Рівняння Періса. Критичний розмір тріщини. Рішення рівняння Періса та його практичне використання.

**ТЕМА 11.** Моделі руйнування деталей АД та ЕУ. Еквівалентні напруги. Запаси міцності в просторі факторів, що пошкоджують. Співвідношення запасів міцності та довговічності. Показники ПН міцності та імовірність руйнування деталей АД. Основні фактори виробітку ресурсів: тривала міцність та малоциклова втома. Многоциклова втома, її урахування. Лінійна теорія підсумовування пошкоджень. Ресурсне проектування з урахуванням багаторежимної роботи деталей АД. Поняття пошкодження. Лінійна теорія підсумовування пошкоджень. Поняття нелінійної теорії підсумовування. Однорідні та різнорідні пошкодження при комплексному навантаженні деталі. Крайня поверхня у просторі факторів, що пошкоджують. Взаємний вплив факторів, що пошкоджують: МЦВ та повзучість, МЦВ та втома.

**ТЕМА 12.** Методи встановлення ресурсів АД: прямої наробітки, на підставі еквівалентно-циклових випробувань (ЕЦВ) та розрахунковий. Ретроспективний метод КБ «Івченко-Прогрес». Загальні вимоги до ресурсних випробувань АД. Спеціальні випробування. Прискорені еквівалентно-циклові випробування (ЕЦВ). Формування типових, узагальнених та випробувальних циклів. Особливості випробувань та інженерні показники ПН на прикладі двоконтурних АГТД для транспортної авіації. Випробування та доведення АД. Теорія доведення акад. Муравченка Ф.М. Поле доведення. Стратегія доведення.

**ТЕМА 13.** Основні положення та нормативи встановлення та подовження ресурсів газотурбінних двигунів цивільної авіації. Три стратегії управління ресурсами СУР. Основні деталі, що випробуються на малоциклову втому, та інші. Реалізація концепцій безпечної працездатності та безпечного зростання тріщин.

**ТЕМА 14.** Забезпечення МН деталей АД на етапі експлуатації. Експлуатація за регламентом та за технічним станом. Системи діагностування стану АД на підставі цифрового аналізу. Система моніторингу виробітку ресурсу МВР АД, розроблена кафедрою 203 ХАІ.

#### Модульний контроль

### 4. Структура навчальної дисципліни

| Назви змістових модулів і тем                                                                                                                                                                | Кількість годин |              |   |     |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|---|-----|------|
|                                                                                                                                                                                              | денна форма     |              |   |     |      |
|                                                                                                                                                                                              | усього          | у тому числі |   |     |      |
|                                                                                                                                                                                              |                 | л            | п | лаб | с.р. |
| 1                                                                                                                                                                                            | 2               | 3            | 4 | 5   | 6    |
| <b>Модуль 1</b>                                                                                                                                                                              |                 |              |   |     |      |
| <b>Змістовий модуль 1</b>                                                                                                                                                                    |                 |              |   |     |      |
| <b>ТЕМА 1.</b> Предмет вивчення та задачі дисципліни. Місце дисципліни в учбовому плані. Рекомендована література.                                                                           | 3               | 1            | - | -   | 2    |
| <b>ТЕМА 2.</b> Показники МН деталі – безвідмовність та довговічність (технічний ресурс) у вірогідній формі.                                                                                  | 5               | 1            | - | -   | 4    |
| <b>ТЕМА 3.</b> Структура моделі МН елементів АД. Моделі (підмоделі) форми, руйнування, виробітку ресурсу та інше. Загальна структура моделі МН деталі.                                       | 8               | 1            | - | 2   | 5    |
| <b>ТЕМА 4.</b> Моделі деформаційних властивостей конструкційних матеріалів. Умовна діаграма "σ-ε", основні показники пластичності матеріалів.                                                | 9               | 1            | 2 | -   | 6    |
| <b>ТЕМА 5.</b> Поведінка матеріалу при тривалому сталому навантаженні в умовах підвищених температур. Моделі ТМ матеріалу: базова, Ларсона-Міллера та інші. Статистичні властивості моделей. | 12              | 2            | 2 | 2   | 6    |
| <b>ТЕМА 6.</b> Релаксація напружень з приводу високотемпературної повзучості матеріалу в локальних частинах деталі з жорс-                                                                   | 12              | 2            | - | 4   | 6    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |           |          |           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|
| ткими зв'язками. Основні кількісні закономірності та приклади виникнення явища.                                                                                                                                                                                                                                           |            |           |          |           |            |
| <b>ТЕМА 7.</b> Моделі руйнування зразків матеріалу при циклічному навантаженні. Загальні відомості: форма циклів та їх параметри. Основні типи руйнування. Малоциклова втома (МЦВ). Багатоциклова втома (БЦВ) чи витривалість. МЦВ та БЦВ – спільне та різниці.                                                           | 10         | 4         | -        | -         | 6          |
| <b>Модульний контроль</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1          | -         | -        | -         | 1          |
| <b>Разом за змістовим модулем 1</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>60</b>  | <b>12</b> | <b>4</b> | <b>8</b>  | <b>36</b>  |
| <b>Модуль 2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |           |          |           |            |
| <b>Змістовий модуль 2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |           |          |           |            |
| <b>ТЕМА 8.</b> Малоциклова втома матеріалу деталей АД та ЕУ. Криві деформування при малоцикловому навантаженні для матеріалів з різними властивостями. Універсальні моделі малоциклової втоми (МЦВ). Моделі МЦВ при «жорсткому» режимі навантаження. Моделі при «м'якому» режимі навантаження. Моделі Коффіна та Менсона. | 8          | 2         | -        | 2         | 4          |
| <b>ТЕМА 9.</b> Загальна структура моделі НДС: пружність, пластичність та врахування повзучості. Тензори напружень та деформацій.                                                                                                                                                                                          | 8          | 2         | -        | 2         | 4          |
| <b>ТЕМА 10.</b> Основи механіки руйнування. Історичні аспекти та сучасні галузеві проблеми. Об'єкт та задачі механіки руйнування.                                                                                                                                                                                         | 8          | 2         | 2        | -         | 4          |
| <b>ТЕМА 11.</b> Моделі руйнування деталей АД та ЕУ. Еквівалентні напруження. Запаси міцності в просторі факторів, що пошкоджують. Співвідношення запасів міцності та довговічності.                                                                                                                                       | 9          | 2         | -        | 3         | 4          |
| <b>ТЕМА 12.</b> Методи встановлення ресурсів АД: прямої наробітки, на підставі еквівалентно-циклових випробувань (ЕЦВ) та розрахунковий. Ретроспективний метод КБ «Івченко-Прогрес»                                                                                                                                       | 9          | 2         | 2        | -         | 5          |
| <b>ТЕМА 13.</b> Основні положення та нормативи встановлення та подовження ресурсів газотурбінних двигунів цивільної авіації.                                                                                                                                                                                              | 9          | -         | -        | -         | 9          |
| <b>ТЕМА 14.</b> Забезпечення МН деталей АД на етапі експлуатації. Експлуатація за регламентом та за технічним станом. Системи діагностування стану АД на підставі цифрового аналізу. Система моніторингу виробітку ресурсу МВР АД, розроблена кафедрою 203 ХАІ.                                                           | 8          | 2         | -        | 1         | 5          |
| <b>Модульний контроль</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1          | -         | -        | -         | 1          |
| <b>Разом за змістовим модулем 2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>60</b>  | <b>12</b> | <b>4</b> | <b>8</b>  | <b>36</b>  |
| <b>Індивідуальне завдання</b><br><b>Розрахункова робота на тему: «Оцінка ресурсу диска турбіни ГТД»</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>30</b>  | -         | -        | -         | <b>30</b>  |
| <b>Усього годин</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>150</b> | <b>24</b> | <b>8</b> | <b>16</b> | <b>110</b> |

## 7. Теми практичних занять

| Теми змістових модулів | № | Назви занять                                                                                                                    | Кількість годин |
|------------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Тема 4</b>          | 1 | Визначення робочої точки на характеристиці матеріалу в умовах пружньо-пластичної деформації за допомогою методу сікучих модулів | 2               |
| <b>Тема 5</b>          | 2 | Побудова моделі Ларсона- Міллера за відомими експеримен-                                                                        | 2               |

|                |   |                                                                                                                    |          |
|----------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
|                |   | тальними характеристиками тривалої міцності матеріалу                                                              |          |
| <b>Тема 10</b> | 3 | Визначення ресурсу деталі за динамікою зростання тріщин                                                            | 2        |
| <b>Тема 12</b> | 4 | Визначення коефіцієнтів еквівалентності та прискорення випробувань за програмою еквівалентно-циклічних випробувань | 2        |
| <b>Разом</b>   |   |                                                                                                                    | <b>8</b> |

### 7. Теми лабораторних робіт

| Теми змістових модулів | №   | Назви занять                                                                                                    | Кількість годин |
|------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Тема 3</b>          | 1   | Розрахунки пружно-пластичного стану диска на типових режимах узагальненого польотного циклу                     | 2               |
| <b>Тема 5</b>          | 2   | Дослідження основних моделей тривалої міцності жароміцних конструкційних матеріалів                             | 2               |
| <b>Тема 6</b>          | 3   | Дослідження релаксації напружень та накопичення пластичних деформацій в наслідок високотемпературної повзучості | 2               |
| <b>Теми 8-11</b>       | 4   | Пружно-пластичний розрахунок диска турбіни методом гіперболи Нейбера                                            | 2               |
|                        | 5   | Розрахунки показників МН робочої лопатки турбіни АГТД на підставі її УПЦ                                        | 2               |
|                        | 5.1 | Частина 1. Розрахунки пошкоджень лопатки за один УПЦ за критеріями ТМ та МЦВ                                    | 3               |
|                        | 5.2 | Частина 2. Оцінки детермінованих показників безвідмовності та довговічності (ресурсу) лопатки                   | 1               |
|                        | 6   | Розрахунок пошкодження диску за один УПЦ за критеріями ТМ та МЦ                                                 | 1               |
| <b>Тема 14</b>         | 6   | Планування еквівалентно-циклічних випробувань АГТД                                                              | 1               |
| <b>Разом</b>           |     |                                                                                                                 | <b>16</b>       |

### 8. Самостійна робота

| Тема змістових модулів | Назва теми                                                                                                                            | Кількість годин |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Тема 1</b>          | Огляд рекомендованої літератури                                                                                                       | 2               |
| <b>Тема 2</b>          | Перегляд конспекту лекцій з надійності авіаційних двигунів та енергетичних установок                                                  | 4               |
| <b>Тема 3</b>          | Модель міцнісної надійності ([1], розділ 1.1; [2], розділ 1                                                                           | 5               |
| <b>Тема 4</b>          | Справжня діаграма деформування "σ-ε" ([7], розділ 14, с. 82-87)                                                                       | 6               |
| <b>Тема 5</b>          | Характеристики тривалої міцності конструкційних матеріалів ([12], розділ 1.1.1, с. 6-11)                                              | 6               |
| <b>Тема 6</b>          | Властивості матеріалу при підвищеній температурі ([8], глава 1, розділи 1-4, с.с. 5-48)                                               | 6               |
| <b>Тема 7</b>          | Багатоциклова втома матеріалів при циклічному навантаженні ([1], розділ 1.13; [7], розділ 16, с. 92-100; [11], розділ 2.2., с. 27-35) | 6               |
| <b>Тема 8</b>          | Малоциклова втома матеріалів. ([1], розділ 1.14; [2], розділи 10, 11, 12)                                                             | 4               |
| <b>Тема 9</b>          | Загальна структура моделі НДС (перегляд конспекту лекцій з опору матеріалів; ([1], розділ 1.9))                                       | 4               |
| <b>Тема 10</b>         | Основи механіки руйнування ([4])                                                                                                      | 4               |
| <b>Тема 11</b>         | Механізм зростання тріщини та руйнування елементів конструкції ([1], розділ 1.16; [10], розділ 2, с. 30-65; [4])                      | 4               |
| <b>Тема 12</b>         | Накопичення пошкоджень та оцінки довговічності деталей АГТД та                                                                        | 5               |

|                |                                                                                                               |            |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                | етапі проектування.([12], розділ 8.1-8.3 (с.с. 240-247); розділ 8.5 (с.с.274-286))                            |            |
| <b>Тема 13</b> | Перегляд конспекту лекцій з ресурсного проектування. Перегляд розділів Авіаційних правил АП-21, АП-25, АП-33. | 9          |
| <b>Тема 14</b> | Перегляд конспекту лекцій з ресурсного проектування. Перегляд розділів Авіаційних правил АП-21, АП-25, АП-33. | 5          |
|                | Модульний контроль                                                                                            | 2          |
|                | Виконання розрахункової роботи                                                                                | 30         |
|                | <b>Разом</b>                                                                                                  | <b>102</b> |

## 9. Індивідуальне завдання

### 1. Розрахункова робота за темою: «Оцінки ресурсу диска турбіни АГТД»

#### Розділи роботи:

1. Розрахунки пружно-пластичного стану диска на типових режимах узагальненого польотного циклу (УПЦ).
2. Розрахунки довговічності диску на сталих та перехідних режимах УПЦ.
3. Розрахунок пошкодження диску за один УПЦ за критеріями ТМ та МЦУ.
4. Оцінювання загальних експлуатаційних показників міцностної надійності диску – безвідмовності та довговічності (ресурсу).

## 10. Методи навчання

#### Основні форми навчання:

- лекційна;
- практичні роботи;
- лабораторні роботи;
- розрахунково-графічна робота;
- індивідуальна самостійна робота студента;
- іспит.

На лекціях студентів даються основні поняття, основи теорії, закономірності, необхідні для підготовки до виконання практичних та лабораторних робіт, самостійної роботи, а також виконання індивідуального завдання.

Лекція, розв'язує тільки одну дидактичну задачу – дає первісне знайомство з темою, організовує первісне сприйняття матеріалу, формулює основні проблеми.

Проведення лабораторних робіт базується на словесному (аналітичному) описанні об'єкта (системи охолодження та охолоджуваних деталей), а також й на матеріальному його відображенні за допомогою спеціальних дидактичних матеріалів (розрізні макети, плакати та ін.). Під час проведення лабораторних робіт використовується бригадний характер праці студентів.

Проведення практичних робіт базується на виконанні студентами розрахунків параметрів систем охолодження деталей.

Основною формою навчання є самостійна робота. До неї не можна приступати без певного багажу знань, які даються на лекції. Під час самостійної роботи студенті поглиблено вивчають лекційний матеріал, готуються до проведення лабораторних робіт, виконують домашню розрахунково-графічну роботу.

## Питання для самостійної роботи студентів

### Модуль 1

#### Змістовий модуль 1

1. Общая характеристика АГТД как объекта разработки и эксплуатации. Жизненный цикл АГТД.
2. Прочностная надежность деталей АГТД и ее показатели. Что она характеризует в составе понятия надежность АГТД.
3. Вероятностные показатели прочностной надежности деталей АГТД – их безотказность и долговечность (технического ресурса).
4. Основные разновидности понятия «ресурс детали АГТД».
5. Ресурсное проектирование АД: понятие, особенности, цели и задачи.
6. Структура модели прочностной надежности АГТД (показать по ее структурной схеме).
7. Прочностная надежность (ПН) деталей АД, основные понятия и структура модели ПН.
8. Исходные подмодели модели прочностной надежности деталей АГТД.
9. Модели нагружения деталей АД по характеру действия.
10. Кратковременное статическое нагружение. Характеристики пластичности материалов.
11. Истинная диаграмма деформирования материала и ее связь с условной.
12. Истинные разрушающие напряжение  $S_k$  и конечная деформация  $\epsilon_{и,k}$  при разрушении.
13. Аппроксимация кривых деформирования « $\sigma$ - $\epsilon$ » пластических материалов.
14. Особенности длительного статического нагружения материала при повышенных температурах и модели его длительной прочности.
15. Модели длительной прочности материалов: «кривые ДП» и Ларсена-Миллера и области их использования.
16. Статические модели длительной прочности материала.
17. Пределы длительной прочности материалов АГТД при растяжении и сжатии.
18. Ползучесть конструкционных материалов. Три фазы и скорости ползучести.
19. Модели установившейся ползучести материала деталей АГТД.
20. Связь между ползучестью и длительной прочностью. Обобщенные кривые ползучести и их построение.
21. Релаксация напряжений в болтовом соединении из-за ползучести материала.
22. Модели роста трещин при циклическом нагружении. Уравнение Пэриса.
23. Модели материалов при циклических нагружениях, основные понятия, характеристики циклов и влияющие факторы.
24. Многоцикловая усталость материала и ее модели при симметричном нагружении.
25. Многоцикловая усталость материала, основные влияющие факторы. Учет асимметрии цикла.
26. Многоцикловая усталость материала. Влияние концентрации напряжений.
27. Малоцикловая усталость. Циклически стабильные и нестабильные материалы при «жестком» и «мягком» нагружениях.
28. Универсальные модели малоциклового усталости Коффина и Мэнсона.
29. Модель малоциклового усталости материала Мэнсона, ее разновидности в области применения.
30. Экспериментальные модели малоциклового термической усталости материала.
31. Влияние выдержки в цикле на максимальной температуре на малоцикловую усталость материала.
32. Модели МЦУ материала при «мягком» нагружении.
33. Допустимые области использования универсальных моделей МЦУ.

1. Основные положения и виды упругих моделей НДС детали (законов Гука).
2. Модели НДС детали, назначение, состав и разновидности.
3. Алгоритм метода переменных параметров упругости (секущих модулей) для учета пластичности НДС детали.
4. Учет пластических деформаций с использованием гиперболы Нейбера и область его применения.
5. Цели и задачи механики разрушения.
6. Напряжения при вершине трещины и типы растрескивания. Коэффициент интенсивности напряжений.
7. Роль и размер зоны пластичности при вершине трещины.
8. Вязкость разрушения и методы ее определения. Основной показатель трещиностойкости материала.
9. Вязкость разрушения материала K<sub>1C</sub> и критический размер трещины.
10. Завершающие подмодели модели прочностной надежности детали и области их применения.
11. Понятие и виды эквивалентных напряжений в деталях АГТД.
12. Модели разрушения деталей при однородных нагружениях по критерию долговечности.
13. Модели разрушения деталей при однородных нагружениях по критериям их прочности.
14. Запасы прочности и долговечности деталей по ДП и МЦУ.
15. Соотношение между запасами прочности и долговечности деталей АД по критерию ДП.
16. Понятие повреждений и повреждаемости деталей по ДП и МЦУ.
17. Модели разрушения детали при многорежимных однородных нагружениях.
18. Понятие эквивалентных режимов.
19. Детерминированные показатели безотказности и долговечности детали при многорежимных однородных нагружениях по критериям ДП и МЦУ.
20. Линейное суммирование повреждений деталей при многорежимных повреждениях.
21. Суммирование неоднородных повреждений, возможности и проблемы.
22. Виды специальных испытаний АГТД. Их классификация (четыре группы).
23. Испытания и доводка АГТД. Основные положения.
24. Методы установления ресурсов АГТД, их достоинства и недостатки.
25. Эквивалентно-циклические ресурсные испытания АД, назначение и обоснование. Коэффициенты соответствия обобщенных полетных и испытательных циклов.
26. Эквивалентно-циклические испытания деталей АД. Выбор параметров испытательного цикла, коэффициент ускорения испытаний.
27. Расчетный метод установления ресурсов АГТД. Основания появления и условия применения.
28. Виды систем управления ресурсами (СУР) АГТД, их основные отличия и особенности применения в эксплуатации АГТД.
29. Концепции безопасной долговечности и безопасного роста трещин при назначении и продлении ресурсов АГТД. Две группы основных деталей по виду ресурсных испытаний.

## 11. Методи контролю

Матеріал дисципліни розбито на два змістових модулі:

1. Модель міцнісної надійності, аналіз конструкції в умовах тривалого статичного навантаження та багатоциклової втоми.
2. Аналіз конструкцій в умовах малоциклової втоми. Основи механіки руйнування. Призначення, експериментальне підтвердження та експлуатаційний моніторинг ресурсу..

**Складання модуля 1 – на 8-му тижні (один раз), складання модуля 2 – на 16-му тижні (один раз).**

До складання модулів студент допускається за умови виконання всіх видів обов'язкових робіт, передбачених у модулях.

Оформлення лабораторних робіт – *письмово*, захист – *усно*.

Строк захисту домашнього завдання – 15-й тиждень. Затримка захисту домашнього завдання на тиждень – мінус 2 бали, на 2 тижні – мінус 4 бали.

Семестр 2 - *іспит*

## 12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

### 12.1 Розподіл балів, які отримують студенти (кількісні критерії оцінювання)

| Складові навчальної роботи                         | Бали за одне заняття (завдання) | Кількість занять (завдань) | Сумарна кількість балів |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>Змістовний модуль 1</b>                         |                                 |                            |                         |
| Робота на лекціях                                  | 0...0,5                         | 8                          | 0...4                   |
| Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт | 1...2                           | 4                          | 4...8                   |
| Модульний контроль                                 | 15...20                         | 1                          | 12...25                 |
| <b>Змістовний модуль 2</b>                         |                                 |                            |                         |
| Робота на лекціях                                  | 0...0,5                         | 6                          | 0...4                   |
| Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт | 1...2                           | 4                          | 4...8                   |
| Модульний контроль                                 | 15...25                         | 1                          | 15...25                 |
| Виконання і захист РР                              | 16...26                         | 1                          | 16...26                 |
| <b>Усього за семестр</b>                           |                                 |                            | <b>60...100</b>         |

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту. Допуск до іспиту надається за умов відпрацювання та здачі усіх лабораторних робіт, а також виконання та успішного захисту домашнього завдання.

Під час складання семестрового іспиту студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Білет для іспиту складається з двох теоретичних запитань та двох практичних завдань. Теоретичні запитання розподілено таким чином:

Перше запитання - змістовий модуль 1;

Друге запитання – змістовий модуль 2;

Перше практичне завдання містить 8 тестів за тематикою модулю 1. На кожний тест наведено можливі відповіді. Студент повинен обрати вірні відповіді.

Друге практичне завдання містить 8 тестів за тематикою модулю 2. На кожний тест наведено можливі відповіді. Студент повинен обрати вірні відповіді.

Максимальна кількість балів за кожне запитання білету – 25.

### 12.2 Якісні критерії оцінювання

Для одержання позитивної оцінки студент повинен

**знати:**

- зв'язок між показниками міцності та надійності;
- структуру ресурсного проектування та види необхідних моделей;
- основи опору матеріалів;
- основні моделі, що визначають здатність матеріалів опиратися довготривалому статичному навантаженню;
- явище повзучості та модель Нортона;
- модель довговічності при багатоцикловій втомі;
- фактори, що впливають на здатність матеріалів опиратись багатоцикловій втомі;
- природу малоциклової втоми та її відмінність від багатоциклової втоми;
- моделі малоциклової втоми;
- основні положення механіки руйнування, модель зростання тріщин Періса;

- зміст стратегій керування ресурсами;
- види ресурсних випробувань;
- головні принципи експлуатаційного моніторингу ресурсів.

**вміти:**

- визначати ресурс деталей, що працюють в умовах сталого довготривалого навантаження та високих температур;
- визначати ресурс деталей, що працюють в умовах малоциклової втоми;
- оцінювати коефіцієнти відповідності еквівалентних випробувальних циклів.

### 12.3 Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

**Задовільно (60-74).** Мати необхідний мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та захистити індивідуальне завдання (розрахунково-графічну роботу). Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати показники міцнісної надійності та їх зв'язок з ресурсом. Пояснювати структуру та складові етапи ресурсного проектування. Визначати ресурс за відомим напруженням та температурою в умовах довготривалого навантаження. Пояснювати порядок аналізу конструкцій в умовах дії повзучості. Визначати границю витривалості за заданої характеристики багатоциклової втоми матеріалу. Знати, які вихідні дані необхідні для визначення ресурсу за малоцикловою втомою. Знати зміст стратегій керування ресурсами. Пояснювати сенс та порядок визначення еквівалентно-циклічних випробувань.

**Добре (75-89).** Твердо опанувати мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати зв'язки між показниками надійності та ресурсу, між запасами міцності та довготривалості. Знати моделі довготривалої міцності у вигляді діаграм та формули Ларсона-Міллера. Вміти визначати запас довготривалої міцності. Знати моделі багатоциклової втоми та фактори, що впливають на здатність матеріалів опиратися циклічному навантаженню. Пояснювати сенс складових моделі Менсона. Вміти визначати запас довготривалості в умовах малоциклового навантаження. Знати основні положення механіки руйнування, формулу Періса для аналізу зростання тріщин. Знати стратегії керування ресурсами та порядок призначення ресурсу. Пояснювати програму еквівалентно-циклічного випробування та її походження на основі заданого узагальненого польотного циклу. Знати основні положення експлуатаційного моніторингу ресурсу.

**Відмінно (90-100).** Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре або відмінно захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з відмінною оцінкою (припускається здати один з двох модулів з оцінкою «добре» і кількістю балів не менше 80). Повно знати основний та додатковий матеріал. Знати структуру ресурсного проектування та детально пояснювати усі моделі, необхідні для її реалізації. Знати основні параметри діаграми деформування, а також показники матеріалу, що характеризують його пружні властивості та пластичне деформування. Знати, як виконується аналіз міцності в умовах багатовимірного напружено-деформованого стану. Володіти моделями довготривалої міцності, вміти перейти від однієї моделі до іншої. Вміти розраховувати збірні конструкції в умовах повзучості. Знати основи багатоциклової втоми, уміти визначати запас довготривалості в умовах асиметричного циклічного навантаження. Знати моделі малоциклової втоми, пояснювати та використовувати формулу Менсона. Вміти розраховувати ресурс конструкції з тріщиною. Знати основи призначення та експериментального підтвердження ресурсу. Знати основні види ресурсів. Пояснювати головні положення та порядок експлуатаційного моніторингу ресурсу.

#### Шкала оцінювання: національна та ECTS

| Сума балів за всі види навчальної діяльності | Оцінка за національною шкалою |            |
|----------------------------------------------|-------------------------------|------------|
|                                              | Для іспиту                    | Для заліку |
| 90-100                                       | Відмінно                      | Зараховано |
| 75-89                                        | Добре                         |            |
| 60-74                                        | Задовільно                    |            |

|       |              |               |
|-------|--------------|---------------|
| 01-59 | Незадовільно | Не зараховано |
|-------|--------------|---------------|

### 13. Методичне забезпечення

1. Методичні посібники до кожної з лабораторних робіт, перелік яких дано в розділі 7 програми.
2. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи за темою «Оцінки ресурсу диска турбіни АГТД».
3. Методичні посібники кафедри 203 до суміжних дисциплін.

### 14. Рекомендована література

#### Базова

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. - М.: Машиностроение, 2007. – 204 с.
2. Ануров, Ю.М., Федорченко Д.Г. Основы обеспечения прочностной надежности авиационных двигателей и силовых установок / Ю.М. Ануров, Д.Г. Федорченко. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.
3. Боровиков, В.М. Материалы и прочность оборудования ТЭС: учеб. пособие / В.М. Боровиков, Л.Б. Гецов, Ю.С. Воробьев, А.Я. Копсов, С.В. Петин, Г.Д. Пигрова, А.И. Рыбников; под ред. В.М. Боровикова, Л.Б. Гецова. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 611 с.
4. Николаева, Е.А. Основы механики разрушения / Е.А. Николаева. – Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2010. – 103 с.
5. Гецов, Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин / Л.Б. Гецов. - М.: Недра, 1996. - 591 с.
6. Єпіфанов, С.В. Міцність і ресурс деталей авіаційних газотурбінних двигунів / С.В. Єпіфанов, Д.Ф. Симбірський, Є.В. Марценюк. - Харьков: ХАИ. – 2017. - 75 с.
7. Крикунов Д.В. Оценка прочностного ресурса деталей ГТД / Д.В. Крикунов. – Харьков: ХАИ. – 2006. - 66 с.
8. Чигрин, В.С. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.С. Чигрин. – Харьков: Нац. Аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2019. – 265 с.

#### Допоміжна

9. Биргер, И.А. Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учеб. пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов – М.: Наука, 1986. – 560 с.
10. Термопрочность деталей машин / Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
11. Кузнецов, Н.Д. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин. – М.: Машиностроение, 1976. – 212 с.
12. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек – М.: Высш. школа, 1980. – 368 с.
13. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, подтверждение / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
14. Ресурсное проектирование авиационных ГТД. Руководство для конструкторов. Вып. 1 / Труды ЦИАМ № 1253, 1990.
15. Каблов, Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е.Н. Каблов, Е.Р. Голубовский. - М.: Машиностроение, 1998. - 168 с.

**13. Інформаційні ресурси** – вивчені попередньо навчальні дисципліни, конспект лекцій, джерела з Інтернету.