

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до виконання лабораторних робіт з дисципліни**

**«Математичне моделювання процесів  
технічних систем»**

для студентів спеціальності  
131 «Прикладна механіка»  
освітньої програми «**Технології машинобудування**»  
галузі знань «Механічна інженерія»  
всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Математичне моделювання процесів технічних систем» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» галузі знань «Механічна інженерія» всіх форм навчання / Укл.: Гончар Н.В., Степанов Д.М. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 27 с.

Укладачі: Гончар Н.В., доцент, канд. техн. наук, доц. каф. ТМБ  
Степанов Д.М., старш. викладач каф. ТМБ

Рецензент: Кононов В.В., доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: доц., к.т.н. Дядя С.І.

Затверджено  
на засіданні кафедри ТМБ  
протокол № 1  
від 22.08.2019 р.

Рекомендовано до видання НМК  
машинобудівного факультету  
протокол № 1  
від 03.09.2019 р.

## **ВИМОГИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ**

1. Пам'ятати про особисту відповідальність за дотримання правил охорони праці і техніки безпеки.
2. Протягом усього робочого часу утримувати в порядку робоче місце, не захаращувати проходи до нього.
3. Повідомити про недоліки у роботі комп'ютера або несправність обладнання, якщо, наприклад, при ввімкненні комп'ютера на дисплеї не з'являється ніяка інформація (екран порожній), або по центру висвічується яскрава смуга.
4. Помітивши порушення інструкції іншими особами або небезпеку для навколишнього середовища, не залишатися байдужими, попередити їх про необхідність дотримання вимог, що забезпечують безпеку робіт, або повідомити викладача чи адміністратора класу.
5. При виявленні запаху гару в пристроях ПЕОМ (персональна електронна обчислювальна машина) – ПК (персональний комп'ютер) негайно вимкнути апаратуру, удруге не включати і звернутися до адміністратора комп'ютерного класу і викладача.

### **Забороняється**

1. Залишати своє робоче місце без відома викладача.
2. Вмикати і вимикати (крім аварійних випадків) устаткування і механізми, робота на яких не доручена.
3. Від'єднувати (приєднувати) будь-які пристрої і кабелі ПЕОМ в увімкненому в електромережу комп'ютері.
4. Працювати та ремонтувати несправне устаткування.
5. Торкатися до струмопровідних частин, електричних дротів (навіть ізольованих), кабелів, клем, наступати на переносні дроти на підлозі.
6. Відволікатися сторонніми справами і розмовами, ходити по приміщенню, відволікаючи інших.
7. Виконувати розпорядження адміністрації, якщо воно суперечить правилам охорони праці і може призвести до нещасного випадку.

**ЗМІСТ**

<b>Лабораторна робота 1</b>	
Визначення критичного числа обертів диска компресора з урахуванням тиску газового потоку .....	5
<b>Лабораторна робота 2</b>	
Моделювання процесу роботи лопатки компресора .....	9
<b>Лабораторна робота 3</b>	
Дослідження коливань плоского зразка з концентратором напружень .....	13
<b>Лабораторна робота 4</b>	
Модальний аналіз лопатки ГТД та її спрощеної моделі.....	16
<b>Лабораторна робота 5</b>	
Термічне навантаження деталей з нерівномірним прогрівом ...	18
<b>Лабораторна робота 6</b>	
Проведення міцностного аналізу деталей з додатковими тер- мічними навантаженнями .....	21
<b>Лабораторна робота 7</b>	
Проведення вібраційного аналізу деталей з додатковими тер- мічними навантаженнями .....	23
Рекомендована література .....	26

## Лабораторна робота 1

# ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОГО ЧИСЛА ОБЕРТІВ ДИСКА КОМПРЕСОРА З УРАХУВАННЯМ ТИСКУ ГАЗОВОГО ПОТОКУ

### 1.1 Мета роботи

- визначитись із ступенем спрощеності моделі диска;
- змодельовати процес роботи диска компресора та отримати критичне значення числа обертів, що забезпечить необхідний запас міцності при дії відцентрових та «парасолькових» навантажень.

### 1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Створіть в будь-якій CAD-системі поперечний профіль диску компресора (рис. 1.1). При створенні профілю диску необхідно враховувати вісь обертання. Імпортуйте його в ANSYS. Або створіть профіль за допомогою ANSYS. Модель повинна бути площиною (Area).

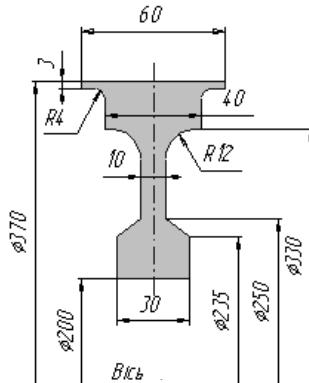


Рисунок 1.1 – Профіль диску ГТД

1.2.2 Відтворіть координати точок контуру і впевніться, що координата X відповідає вказаним на кресленні радіусам.

1.2.3 Оберіть тип плоского кінцевого елемента другого порядку (Solid 8node 82).

Визначте для обраного типу KE опцію "Вісесіметричний напружено-деформований стан":

Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete... → Options ...  
 K3 – Axisymmetric;  
 K5 – No extra output;  
 K6 – No extra output.

1.2.4 Визначте властивості матеріалу диска (сплав жароміцний на основі нікелю ЭИ698-ВД): модуль пружності  $2,1 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона 0,31; щільність 8320 кг/м<sup>3</sup>.

Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models  
 Виберіть по черзі Structural, Linear, Elastic, Isotropic.  
 Введіть 2E11 в полі EX. Введіть 0.3 в полі PRXY. Потім [OK].  
 Виберіть Density (щільність).  
 Введіть 8.3E3 (або 8320) в полі DENS. Потім [OK].

1.2.5 Виконайте розбиття за допомогою вільної сітки кінцевих елементів. Використовуйте діалогове вікно MeshTool. Загальна кількість елементів в моделі не повинна перевищувати 800 шт.

Виконайте "згущення" сітки КЕ у точках вірогідної концентрації напружень (радіуси галтелей, точки різкого збільшення діаметрів тощо).

Main Menu → Preprocessor → Meshing → Modify mesh → Refine At →  
 → Keypoints  
 Встановіть рівень згущення сітки Level of refinement – значення 1.

1.2.6 Обмежте переміщення диску впродовж осі шляхом завдання нульового переміщення за віссю обертання лінії, яка є границею для центрального отвору диску:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply →  
 → Structural → Displacement → On Lines

1.2.7 Оберіть швидкість обертання диску:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply →  
 → Structural → Inertia → Angular Velocity... → Global

У панелі, яку призначено для вибору окружної швидкості, задати швидкості обертання навколо вісей X,Y,Z. Наприклад, віссю обертання є вісь Y, тоді необхідно задати:

- X-comp – 0; Y-comp – 500; Z-comp – 0 [OK]

Де Y-comp – швидкість обертання навколо Y, рад/сек.

Якщо експлуатаційну частоту обертання задано в об/хв, необхідно перерахувати її в окружну швидкість в рад/сек, враховуючи  $1 \text{ рад} = 57^\circ$ .

1.2.8 Виконайте розрахунок напруженого стану диску:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS

Проаналізуйте розташування головних компонентів напруженого стану та напружень за Мізесом на перетині диску (рис. 1.2). Визначте еквівалентне напруження в конструктивних концентраторах перетину та значення коефіцієнту концентрації.

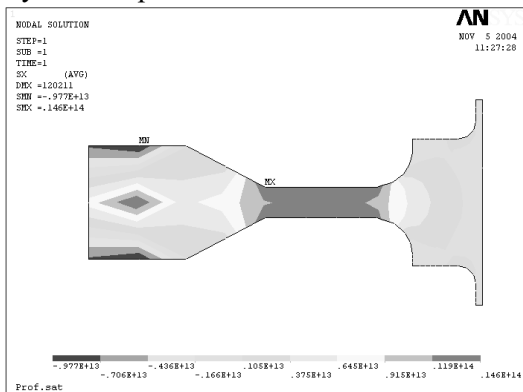


Рисунок 1.2 – Розподіл напружень у профілі диску компресора.

1.2.9 Визначте критичну швидкість обертання диску, за умов якої виникне міцнісна відмова, та номінальну частоту обертання, яка відповідає запасу міцності 1,6. У якості критерія міцності використовуйте межу текучості сплаву ЭИ698-ВД, яка дорівнює 920 МПа.

1.2.10 Ще раз розрахуйте диск на міцність за умовою, що його навантажено силами інерції від своєї ваги (при номінальній частоті обертання ротора, який було визначено в п. 1.9) та розподіленою силою тиску газового потоку – «парасольковим» навантаженням, прикладеним до верхньої частини бокової поверхні диску (100 МПа).

Визначте критичний (максимальний) і номінальний розмір газового потоку для поточних умов.

### 1.3 Зміст звіту

- креслення диску;
- картина розподілення напружень в перерізі дисків;
- послідовність розрахунку критичного та номінального числа обертів диска;
- розрахунок максимального та номінального тиску газового потоку;
- загальні висновки.

#### 1.4 Контрольні питання

1. Порядок закріплення та навантаження вісесіметричних тіл обертання, типу дисків.
2. Поняття запасу міцності, послідовність його визначення в ANSYS.
3. Поняття концентрації напружень. Коефіцієнти концентрації напружень. Послідовність їх визначення в ANSYS.
4. Особливості напруженого стану дисків компресорів. Характерні точки. Небезпечні місця, в яких можливе зародження тріщин.
5. «Парасолькове» навантаження і деформація дисків.
6. Засоби забезпечення достатньої точності розрахунку напружено-деформованого стану деталей ГТД у місцях концентрації напружень.
7. Яким чином перерахувати частоту обертів з відомої розмірності об/хв або об/с в необхідну в ANSYS окружну швидкість в рад/с.
8. Критичні частоти обертання дисків.
9. Номінальні частоти обертання дисків.
10. Коефіцієнт запасу міцності. Послідовність його визначення в ANSYS.



## Лабораторна робота 2

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЛОПАТКИ КОМПРЕСОРА

### 2.1 Мета роботи

- створити або імпортувати твердотільну модель лопатки та спрощену модель лопатки у вигляді плоскої балки постійного перерізу;
- порівняти результати розрахунку лопатки та її простої моделі, до яких прикладені аналогічні граничні умови, близькі до експлуатаційних; вирахувати коефіцієнт точності розрахунку;
- визначити критичне число обертів для забезпечення нормованого коефіцієнта запасу міцності для відповідальних деталей авіаційних двигунів і енергетичних установок.

### 2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Завантажте модель лопатки компресора: файл "loratka.db" (рисунком 2.1). Створіть або імпортуйте спрощену модель лопатки прямокутного постійного перерізу, з врахуванням кута повороту відносно хвостовика, що в моделі також є балкою постійного прямокутного перерізу (рис. 2.1,б та ескіз рис. 2.2).



Рисунок 2.1 – Лопатка компресора двигуна ТВ3-117: твердотільна повнорозмірна модель (а) та її спрощена модель (б)

2.2.2 При необхідності перемістіть модель лопатки таким чином, щоб вона знаходилася на відстані 400 мм (0,4 м) від осі обертан-

ня, що відповідає радіусу циліндричної поверхні диска, по якій його встановлено у виробі під час експлуатації. Для цього визначте координати точки, що знаходиться в площині підшви лопатки і розрахуйте величину і напрямок необхідного переміщення. При необхідності поверніть модель.

Для переміщення моделі лопатки використовуйте команди:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → → Move/Modify → Volumes

2.2.3 Перемістіть робочу площину (WP) на відстань 5,1 мм від хвостовика лопатки і поверніть її таким чином, щоб робоча площина XY відтінала перо лопатки від хвостовика.

Розбийте модель лопатки на два об'єми для того, щоб зробити її більш топологічною для побудови регулярної сітки кінцевих елементів в пері лопатки.

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → → Volu by WrkPlane

2.2.4 Визначте властивості матеріалу лопатки (титановий сплав VT3, модуль пружності  $1,1 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3, щільність  $2,5 \text{ г/см}^3$ ).

2.2.5 Виберіть тип кінцевих елементів Solid 95.

Створіть сітку кінцевих елементів в об'ємі пера і хвостовика моделі лопатки. В об'ємі пера лопатки створіть *регулярну* сітку кінцевих елементів розміром 2 мм. В об'ємі хвостовика створіть *вільну* сітку кінцевих елементів. Розмір елементів вибирайте в межах 0,5...1,2 мм.

2.2.6 Задайте кутову швидкість обертання лопатки:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → → Inertia → Angular Velocity → Global.

В панелі, що відкрито, задайте швидкість обертання навколо осей X,Y,Z. Наприклад, віссю обертання є вісь Y, тоді необхідно задати:

X-comp - 0; Y-comp - 500; Z-comp - 0 [OK]

де Y-comp – швидкість обертання щодо осі Y, рад/сек.

2.2.7 Виконайте розрахунок напруженого стану пера лопатки:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS

2.2.8 Проаналізуйте розподіл головних компонент напруженого стану і еквівалентних напруг по четвертій теорії міцності, визначте розташування небезпечного перерізу.

2.2.9 Закріпіть лопатку по бічних поверхнях хвостовика і додатково прикладіть до поверхні корита тиск повітряного потоку (100 МПа) розподіленим навантаженням. Виконайте розрахунок лопатки на міцність при комплексному навантаженні. Визначте еквівалентне напруження у конструктивних концентраторах напружень лопатки і значення коефіцієнта концентрації напружень.

2.2.10 Аналогічне моделювання процесу проведіть із спрощеною моделлю лопатки. Порівняйте результати розрахунків із повнорозмірною моделлю лопатки компресора.

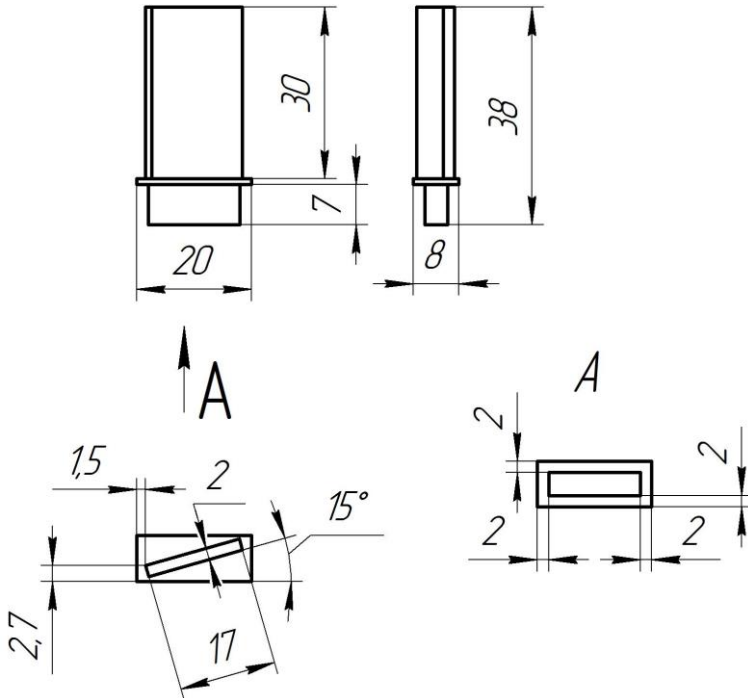


Рисунок 2.2 – Ескіз спрощеної моделі лопатки. Хвостовик та перо мають постійний прямокутний переріз.

2.2.11 Задаючись різними значеннями кутової швидкості обертання ротора газотурбінного двигуна, визначте критичну частоту обертання ротора, за умов якої виникне міцнісна відмова, а також номінальну частоту обертання, при якій запас міцності лопатки знаходиться в

діапазоні 1,4...1,6.

### **2.3 Зміст звіту**

- ескіз лопатки з прикладеним навантаженням;
- загальний вид спрощеної моделі;
- етапи розрахунку;
- порівняльні результати всіх розрахунків обох моделей;
- висновки.

### **2.4 Контрольні питання**

1. Послідовність завдання кутової швидкості обертання.
2. Закономірності розподілу компонентів напруженого стану при комплексному навантаженні. Їх особливості.
3. Поняття критичної частоти обертання ротора ГТД за критерієм міцності пера лопаток компресора. Способи визначення і чинники, що на неї впливають.
4. Конструктивні концентратори напружень в лопатках компресора і методи зниження величини концентрації напружень.

### Лабораторна робота 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ПЛОСКОГО ЗРАЗКА З КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ

### 3.1 Мета роботи

- створити твердотільну модель стандартного лабораторного зразка з концентратором для випробувань на втомленість;
- проаналізувати залежність максимальних напружень в небезпечному перерізі зразка від величини амплітуди коливань і від радіуса концентратора;
- накреслити графік  $\sigma_{max}=f(2A)$  та порівняти його з результатами тарировки, попередньо отриманими за допомогою тензодатчиків і спеціального обладнання.

### 3.2 Порядок виконання роботи

3.2.1 Створіть твердотільну модель лабораторного зразка (рис. 3.1). Можливо створення моделі у довільній CAD-системі та імпортувати її в ANSYS. Для накладення граничних умов, еквівалентних умовам консольного закріплення зразка за хвостовик, необхідно відділити площини хвостовика розділенням за допомогою команди Divide.

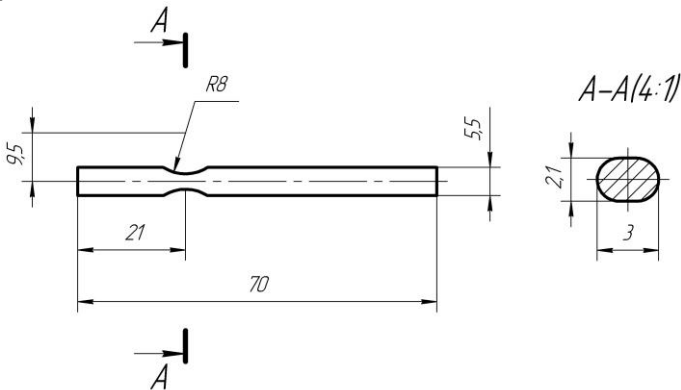


Рисунок 3.1 – Ескіз лабораторного зразка

3.2.2 Визначте властивості матеріалу диска (нікелевий жароміцний сплав ЭИ698-ВД): модуль пружності  $2,1 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона 0,31; щільність  $8,32 \text{ г/см}^3$ , аналогічно п. 1.4.

3.2.3 Виконайте розбиття за допомогою вільної сітки об'ємних кінцевих елементів Solid 95. Використовуйте діалогове вікно MeshTool.

Виконайте «згущення» сітки КЕ у місці концентрації напружень (в радіусах галтелей надризу).

Main Menu → Preprocessor → Meshing → Modify mesh → Refine At →...

Встановіть рівень згущення сітки Level of refinement – значення 1.

3.2.4 Накладіть граничні умови – закріпіть з двох сторін хвостовик зразка:

Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural →  
→ Displacement → On areas...

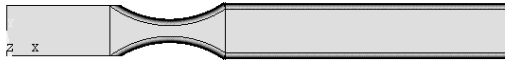


Рисунок 3.2 – Зразок для розрахунку.

3.2.5 Проведіть розрахунок гармонійної вібрації:

3.2.5.1 Призначте тип аналізу – гармонійний:

Main menu → Solution → Analysis Type → New analysis... → Harmonic... [OK]

3.2.5.2 Проведіть розрахунок гармонійних коливань без навантаження.

3.2.5.3 Навантажте конструкцію зміщенням (напівамплитудою) на лінію дальнього від хвостовика торця, що дорівнює 1 мм:

Main menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural →

→ Displacement → On lines...

3.2.5.4 Проведіть розрахунок:

Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Freq And Substps...

значення: HARFRQ = від 200 до 1000 Гц – інтервал частот, а NSUBST = 50 – кількість кроків та галочку STEPPED. Натискаємо [OK]. Потім:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS [OK].

3.2.6 Знайдіть максимальне напруження в місці концентратора напружень. Накресліть графік  $\sigma_{max}=f(2A)$  та порівняйте його з результатами тарировки, попередньо отриманими за допомогою тензодатчиків і спеціального обладнання.

3.2.7 Проведіть модальний аналіз консольно закріпленого зразка.

3.2.8 Створіть ще дві моделі зразка із змінням радіуса концентратора. Замість 8 мм радіус розрізу 2 мм та 14 мм. Однак, слідкуйте, щоб переріз А-А (рис.3.1) був незмінний. Знов проведіть модальний та гармо-

нійний аналіз. Накресліть графік залежності максимальних еквівалентних напружень в концентраторі від радіуса надрізу концентратора.

3.2.9 Створіть модель плоского зразка зовсім без концентратора. Проведіть розрахунок напружень. Визначте значення ефективного коефіцієнта концентрації напружень для трьох зразків з концентраторами радіусом 2, 8, 14 мм. Накресліть графік відповідної залежності.

### 3.3 Зміст звіту

- ескізи чотирьох зразків, що розраховувались у роботі;
- із граничними умовами;
- етапи розрахунку;
- результати, графіки;
- висновки.

### 3.4 Контрольні питання

1. Забезпечення еквівалентних початкових і граничних умов для консольно закріплених балок.
2. Методи досягнення найліпшої топології для створення регулярної сітки кінцевих елементів.
3. Моделювання процесу тарирування зразків.
4. Модальний аналіз, його мета.
5. Гармонійний аналіз, мета його проведення.
6. Визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень.
7. Ефективний коефіцієнт концентрації напружень, його визначення для плоских лабораторних зразків з концентраторами напружень.

## Лабораторна робота 4

### МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛОПАТКИ ГТД ТА ЇЇ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ

#### 4.1 Мета роботи

- створити твердотільну повнорозмірну модель лопатки;
- дослідити моди коливань лопатки за допомогою анімації і спостереженням вузлів, частоти різних форм коливань лопатки;
- порівняти з аналогічними дослідженнями спрощеної моделі.

#### 4.2 Порядок виконання роботи

4.2.1 Для дослідження мод коливань можна використати твердотільну повнорозмірну модель лопатки компресора та її спрощену модель з практичної роботи №2 (рис. 2.1 та 2.2).

4.2.2 Визначте властивості матеріалу лопатки (титановий сплав ВТ3, модуль пружності  $1,1 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3, щільність  $2,5 \text{ г/см}^3$ ).

4.2.3 Створіть сітку кінцевих елементів як в п.2.3 та 2.5.

4.2.4 Закріпіть модель лопатки консольно за хвостовик, як закріплено лопатку в роботі №2.

4.2.5 Завдання типу рішення і його властивостей.

Визначення типу аналізу.

Main Menu → Solution → Analysis Type → New Analysis.

- Виберіть Modal. Потім [ОК].

Main Menu → Solution → Analysis Type → Analysis Options.

Виберіть Block Lanczos.

Визначте кількість мод коливань, що вивчатимемо – їх п'ять. Введіть 5 в полі No of modes to extract. Введіть 5 в іншому полі No of modes to expand. Потім [ОК].

У панелі, що з'явилась, Block Lanczos Method натисніть [ОК]. (Всі значення за умовчанням підходять для даного аналізу.)

Збережіть результат.

4.2.6 Отримайте рішення з поточними настройками:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS.

Закрийте вікно з повідомленням SOLUTION is done.



#### 4.2.7 Визначення власних частот:

Main Menu → General Postproc → Results Summary

Після переглядання списку, закрити вікно.

#### 4.2.8 Анімація результатів.

##### 4.2.8.1 Анімація першої моди:

Main Menu → General Postproc → Read Results → First Set.

Utility Menu → PlotCtrls → Animate → Mode Shape. Потім [ОК].

Ви можете спостерігати форму першої моди.

4.2.8.2 Поміняйте різні опції у вікні Animation Controller (наприклад, змініть швидкість відображення коливань), потім закрийте вікно.

##### 4.2.8.3 Анімація наступної моди:

Main Menu → General Postproc → Read Results → Next Set.

Utility Menu → PlotCtrls → Animate → Mode Shape. Потім [ОК].

Повторіть кроки 4.8.2 – 4.8.3, як було показано вище, і прогляньте три моди, що залишилися (форми третьої, четвертої, п'ятої моди коливань моделі лопатки).

4.2.9 Прогляньте переміщення точок пера лопатки і визначте вузлові перетини.

4.2.10 Аналогічний модальний аналіз проведіть із спрощеною моделлю лопатки. Порівняйте результати розрахунків із повнорозмірною моделлю лопатки.

### 4.3 Зміст звіту

- схема закріплення моделей лопатки;
- таблиця частот відповідних 5-ти мод коливань;
- їх спрощені схеми коливань; аналіз порівняння результатів;
- висновок.

### 4.4 Контрольні питання

1. Основні задачі, що вирішуються при модальному аналізі.
2. Завдання геометричної моделі лопатки компресора. Прийняті спрощення геометрії лопатки.
3. Завдання властивостей матеріалу моделі деталі.
4. Типи елементів, які вживаються при модальному аналізі моделей лопатки.
5. Особливості визначення граничних умов.
6. Анімація одержаних мод коливань моделей деталей машин.
7. Оцінка результатів модального аналізу.

## Лабораторна робота 5

### ТЕРМІЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНИМ ПРОГРІВОМ

#### 5.1 Мета роботи

- визначити час прогріву охолоджуваної лопатки турбіни з перфорованими отворами та її термонапружений стан в період, коли різниця (перепад) температур максимальна;

- проаналізувати динаміку термічних деформацій, що мають місце під час прогріву та охолодження диска компресора, та визначити час його прогріву та охолодження (вирівнювання температури до різниці в 20 °С) при режимі «зліт» та зупинці двигуна.

#### 5.2 Порядок виконання роботи

5.2.1 Створіть модель фрагмента охолоджувальної лопатки турбіни (рис. 5.1). Модель фрагмента лопатки може бути побудована безпосередньо в системі ANSYS або в будь-якій системі твердотільного моделювання й імпортована в ANSYS.

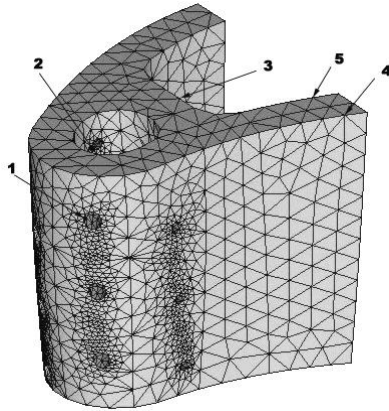


Рисунок 5.1– Ескіз моделі охолоджуваної лопатки турбіни

5.2.2 Визначте фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалу (модель матеріалу). Властивості матеріалу незалежні від температури (лінійний тепловий аналіз):

одиниці виміру температури – градуси Цельсія °С;

(ЕХ)  $2 \cdot 10^{11}$  Па – модуль пружності;

- (PRXY) 0.3 – коефіцієнт Пуассона;
- (ALPX)  $13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{\circ}\text{C}$  – коефіцієнт теплового розширення;
- (DENS)  $8300 \text{ кг/м}^3$  – щільність;
- (C)  $0.134 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$  – теплоємність;
- (KXX)  $50 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$  – теплопровідність;
- (reference temperature)  $20^{\circ}\text{C}$  – базова температура.

5.2.3 Створіть сітку кінцевих елементів. При створенні сітки використайте метод генерування вільної сітки. Тип кінцевих елементів – SOLID 90. Опція Smart Size – 4. Оптимальна кількість кінцевих елементів у моделі – 7...8 тис. шт.

5.2.4 Визначте опції теплового аналізу. Тип аналізу – повний тепловий нестационарний (Transient Full). Час кінця рахунку – 0,1сек; кількість кроків – 5; метод визначення навантаження – однократне (stepped).

Main Menu → Solution → Load Step Opts → OutputCtrls → Db\Result File  
виберіть Every Substep, [OK].

Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequency...

TIME and Substep виберіть: TIME At end of load step = 0.1; Number of substeps = 5.

5.2.5 Завдайте граничні умови теплового аналізу. Для кожної поверхні моделі визначте коефіцієнт теплообміну  $h$  ( $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ) з навколишнім середовищем і температуру  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) середовища. Якщо коефіцієнт теплообміну дорівнює нулю поверхня вважається ізольованою від навколишнього середовища (теплообмін відсутній).

- Зовнішня поверхня лопатки  $h = 1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $t = 1000^{\circ}\text{C}$ ;
- поверхня циліндричного каналу  $h = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $t = 500^{\circ}\text{C}$ ;
- поверхні отворів перфорації  $h = 200 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $t = 750^{\circ}\text{C}$ ;
- чотири поверхні перерізів лопатки  $h = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $t = 750^{\circ}\text{C}$ ;
- поверхня центрального каналу  $h = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $t = 0^{\circ}\text{C}$ .

5.2.6 Розрахуйте тепловий стан моделі фрагмента лопатки

Main Menu → Solution → Solve → Current LS.

5.2.7 Побудуйте графіки зміни температури у дослідженому часовому інтервалі. Графіки побудувати в системі координат «час-температура» для точок (рисунок 5.1) №1,2,3,4,5 на одному графіку.

Будуємо графік температури виділених вузлів, залежно від часу за допомогою команд:

Main Menu → Timehist Postpro

У панелі, що з'явилась, додайте змінну, графік якої хочемо отримати – це температура (в одному або кількох вузлах) залежно від часу нагріву лопатки.

Натисніть піктограму з зеленим плюсом (підказка [Add Data]).  
Виберіть:

Nodal Solution → DOF Solution → Temperature, [OK].

Прибрати панель донизу екрану і на поверхні фрагменту лопатки вкажіть вузол №1 (рис. 5.1). Натисніть [OK].

Таким чином обираємо кілька вузлів, температура кожного з яких буде мати свій порядковий номер – номер змінної (VAR – variable).

Зазначимо номери змінних, які будуть відображені на графіку:

Main Menu → Timehist Postpro → Graph Variables...

У вікні, що з'явилося привласнюємо значення змінної NVAR1 = 2 і натискаємо [OK].

Приберіть панель донизу. Проаналізуйте отриманий графік.

5.2.8 Аналогічно проаналізуйте термонапружений стан диску (рис.1.1), при режимі «зліт» температура поверхні внутрішнього отвору 100 °С, ободу 550 °С (під час зупинки двигуна – навпаки). Закріплення і навантаження моделі провести, як в роботі №1.

### 5.3 Зміст звіту

- ескіз моделі проблемної частини лопатки, ескіз диска;
- картина теплового стану;
- графіки, їх аналіз;
- висновок.

### 5.4 Контрольні питання

1. Особливості прогріву та охолодження лопаток турбін з перфорованими отворами.
2. Основні етапи завдання температурних граничних умов для фрагменту лопатки турбіни. Завдання умов міцностного аналізу.
3. Визначення часу повного прогріву лопатки. Визначення часу прогріву та охолодження диска компресора високого тиску останніх ступенів.
4. Послідовність отримання термонапруженого стану фрагменту лопатки. Отримання картини розподілу температур диска компресора під час режиму «зліт».
5. Які місця лопатки та диску є небезпечними перерізами.

## Лабораторна робота 6

### ПРОВЕДЕННЯ МІЦНОСТНОГО АНАЛІЗУ ДЕТАЛЕЙ З ДОДАТКОВИМИ ТЕРМІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

#### 6.1 Мета роботи

- змоделювати процес навантаження лопатки на простій моделі прямокутного постійного перерізу з термічними граничними умовами;
- проаналізувати картину розподілу температур та напружень при різних режимах роботи двигуна;
- порівняти з результатами навантаження при кімнатній температурі (Лабораторна робота №2).

#### 6.2 Порядок виконання роботи

6.2.1 Для даного дослідження можна використати твердотільну спрощену модель лопатки з практичної роботи №2 (рис. 6.1, креслення – рис. 2.2). Зазначте вид аналізу – термічний, одиниця виміру температури – градуси Цельсія.

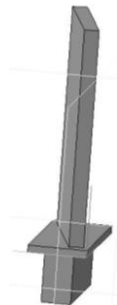


Рисунок 6.1 – Спрощена модель лопатки

6.2.2 Визначте властивості матеріалу лопатки (титановий сплав ВТ3, модуль пружності  $1,1 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3, щільність  $2,5 \text{ г/см}^3$ ).

6.2.3 Створіть сітку термічних кінцевих елементів.

6.2.4 Термічне навантаження –  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  на поверхні пера,  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  – робочі поверхні хвостовика. Отримайте картину розподілу температури.

6.2.5 Після переходу на міцностний аналіз закріпіть модель лопатки консольно за хвостовик, як закріплено лопатку в роботі №2, та наван-

тажте тиском повітряного потоку.

6.2.6 Визначте максимальний прогин лопатки, порівняйте його з результатами роботи №2, зробіть висновки.

6.2.7 Визначте граничне значення тиску повітряного потоку, порівняйте його з результатами роботи №2, зробіть висновки.

6.2.8 Перезакріпіть модель при проведенні міцностного аналізу (попередньо зроблений термічний аналіз потрібно залишити без змін), симулюючи експлуатаційне навантаження – закріпіть хвостовик вздовж по-вздожньої вісі, навантажте обертанням навколо цієї вісі з кутовою швидкістю 500 рад/с. Визначте максимальний вигин з урахуванням відцентрової сили та дії температури, а також максимальне подовження лопатки. Додайте тиск газового потоку. Порівняйте з результатами, отриманими в п. 6.2.6.

6.2.7 Задаючись різними значеннями кутової швидкості обертання ротора газотурбінного двигуна, визначте критичну частоту обертання ротора, за умов якої виникне міцностна відмова, а також номінальну частоту обертання, при якій запас міцності лопатки знаходиться в діапазоні 1,4...1,6.

6.2.8 Визначте граничне значення тиску повітряного потоку при початковому навантаженні кутової швидкості, порівняйте його з результатами роботи №2, зробіть висновки.

### 6.3 Зміст звіту

- ескіз моделі спрощеної лопатки;
- тип кінцевих елементів, їх кількість;
- картина теплового стану;
- порівняльний аналіз отриманих результатів без впливу температури і з її впливом; без впливу відцентрової сили і з нею;
- висновок.

### 6.4 Контрольні питання

1. Особливості прогріву лопаток.
2. Використання термічних кінцевих елементів.
3. Вплив високої температури на значення максимального вигину та значення критичного тиску газового потоку.
4. Додавання обертового навантаження. Як впливає відцентрова сила на збільшення довжини пера лопатки.

## Лабораторна робота 7

### ПРОВЕДЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЕТАЛЕЙ З ДОДАТКОВИМИ ТЕРМІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

#### 7.1 Мета роботи

- змоделювати процес коливання плоского лабораторного зразка (з практичної роботи №3), закріпленого на вібростенді консольно у печі, в умовах високих температур для жаростійкого сплаву з білінійною моделлю матеріалу;

- проаналізувати вплив високої температури на максимальне значення напружень в небезпечному перерізі; скласти залежності  $\sigma^T_{max}=f(2A)$ , враховуючи білінійну модель матеріалу; порівняти з результатами, отриманими для умов кімнатної температури (практична робота №3).

#### 7.2 Порядок виконання роботи

7.2.1 Для даного дослідження можна використати твердотісну модель зразка для досліджень на втому з практичної роботи №3 (рис. 7.1, креслення – рис. 3.1). Зазначте вид аналізу – термічний, одиниця виміру температури – градуси Цельсія.

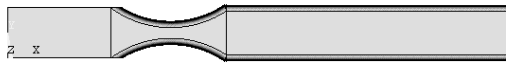


Рисунок 7.1 – Зразок для розрахунку

7.2.2 Визначте властивості матеріалу зразка (нікелевий сплав ЭК79-ИД, модуль пружності  $2,2 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3, щільність  $8,3$  г/см<sup>3</sup>). Модель матеріалу білінійна, після напружень 950 МПа властивості матеріалу змінюються (рис. 7.2).

Завдання білінійної моделі зміцнення матеріалу:

Main menu → Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Nonlinear → Inelastic → Rate Independent → Kinematic Hardening Plasticity → Mises Plasticity → Bilinear

У полі Yield Stss необхідно вказати величину межі текучості матеріалу (950 МПа).

У полі Tang Mod необхідно вказати величину дотичного модуля пружності, що визначається як тангенс кута нахилу кривої в координатах "деформація – напруження" (рис. 7.2) при напруженнях вище за межу текучості (друга частина кривої).

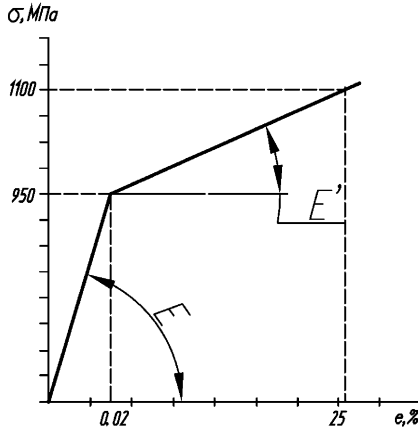


Рисунок 7.2 –Залежність деформація-напруження сплаву ЭК79-ИД

7.2.3 Створіть сітку термічних об'ємних кінцевих елементів.

7.2.4 Термічне навантаження – температура в печі (довколишнього середовища), в якій проводять вібраційні дослідження – 550 °С. Час повного прогріву 2 години після встановлення зразка в «холодну» піч. Дослідження починають тільки після повного прогріву зразка, тому для еквівалентного навантаження необхідно задати температуру всього об'єму зразка також 550 °С.

7.2.5 Проведіть термічний аналіз.

7.2.6 Перейдіть на міцнісний аналіз. Накладіть граничні умови – закріпіть з двох боків хвостовик зразка.

7.2.7 Проведіть розрахунок гармонійної вібрації:

7.2.7.1 Призначте тип аналізу – гармонійний:

Main menu → Solution → Analysis Type → New analysis... → Harmonic... [OK]

7.2.7.2 Проведіть розрахунок гармонійних коливань без навантаження.

7.2.7.3 Навантажте конструкцію зміщенням (напівамплитудою) на лінію дальнього від хвостовика торця, що дорівнює 1 мм:

Main menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → → Displacement → On lines...

7.2.7.4 Проведіть розрахунок:

Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Freq And Substps...



значення: HARFRQ = від 200 до 1000 Гц – інтервал частот, а NSUBST = 40 – кількість кроків та галочку STEPPED. Натискаємо [OK]. Потім:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS [OK].

7.2.8 Знайдіть максимальне напруження в місці концентратора напружень. Накресліть графік  $\sigma_{max}=f(2A)$  та порівняйте його з результатами, отриманими в практичній роботі №3. Врахуйте білінійність матеріалу.

7.2.9 Створіть модель плоского зразка зовсім без концентратора. Проведіть аналогічний розрахунок напружень. Визначте значення ефективного коефіцієнта концентрації напружень для трьох зразків з концентраторами радіусом 2, 8, 14 мм при дії високої температури. Накресліть графік відповідної залежності, порівняйте з результатами роботи №3.

### 7.3 Зміст звіту

- ескізи зразків, що розраховувались у роботі із указанням граничних умов;
- етапи розрахунку;
- результати, графіки; порівняльний аналіз результатів при кімнатній температурі і при високих температурах;
- висновки.

### 7.4 Контрольні питання

1. Забезпечення еквівалентних початкових і граничних умов для проведення гармонійного аналізу консольно закріплених зразків.
2. Методи досягнення найліпшої топології для створення регулярної сітки термічних об'ємних кінцевих елементів.
3. Моделювання процесу тарирування зразків при високій температурі, використання пічі, симуляція процесу.
4. Гармонійний аналіз, мета його проведення.
5. Визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень.
6. Відмінності коефіцієнта концентрації напружень при кімнатній температурі та при термічному навантаженні зразків з концентраторами напружень.
7. Ефективний коефіцієнт концентрації напружень, його визначення для плоских лабораторних зразків з концентраторами напружень.

### Рекомендована література

1. Офіційний сайт ANSYS. Електронний ресурс: [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
2. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник. Под общ. ред. В.И. Мяченкова / М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов: Основы / Перевод с англ. – М.: Мир, 1984. – 215 с.
4. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
5. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения / М.: Наука, 1980. – 256 с.
6. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / М.: Мир, 1975. – 541 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
9. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
10. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие / М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
11. Колюхов А.В. Основы анализа конструкций в системе ANSYS / Казань: КГУ, 2001. – 101 с.
12. Югов В.П. Решение задач теплообмена в системе ANSYS / М.: Техноинжиниринг, 2001. – 110 с.
13. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. — М.: ДМК Пресс, 2009. – С. 248.

### Додаткова література

14. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов / М.: Наука, 1986. – 560 с.
15. Маслов Л.Б. Численные методы для решения задач теории упругости: Методическое пособие / Иваново: ИГЭУ, 1999. – 28 с.
16. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элемен-

тов / Перевод с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

17. Самарский А.А. Введение в численные методы / М.: Наука, 1987. – 459 с.

18. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / М.: Машиностроение, 1981. – 550 с.

19. Механическое поведение металлов при различных видах нагружения. Справочник / В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др. / К.: Логос, 2000. – 571 с.

20. Трощенко В.Т. и др. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие в 2-х т. / К.: Наукова думка, 1993. –Т.1. – 285 с.