

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до практичних робіт з курсу**

**“Твердотільне моделювання і основи інженерних  
розрахунків”**

**Частина 1**

для студентів денної і заочної форми навчання  
спеціальності

131 «Прикладна механіка»  
спеціалізації «**Технології машинобудування**»  
галузі знань «Механічна інженерія»

2024

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу “Твердотільне моделювання і основи інженерних розрахунків”, частина 1, для студентів денної і заочної форми навчання спеціальності 131 "Прикладна механіка", спеціалізації «Технології машинобудування», галузь знань «Механічна інженерія» / Скл.: Гончар Н.В., Степанов Д.М. – Запоріжжя: – НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 54 с.

Скл.: Гончар Н.В., доц., канд. техн. наук  
Степанов Д.М., доц., канд. техн. наук

Рецензент: Павленко Д.В., професор., доктор технічних наук

Відповідальний за випуск: Дядя С.І., доц., канд. техн. наук

Затверджено  
на засіданні кафедри ТМБ  
(протокол № 1  
від 06.08.2024 р.)

Схвалено НМК  
машинобудівного факультету  
(протокол № 1  
від 27.08.2024 р.)

**ЗМІСТ**

1 Основи роботи в ANSYS .....	4
2 Імпортування геометрії моделей з CAD систем .....	8
3 Спадне твердотільне моделювання .....	11
4 Створення сітки кінцевих елементів .....	23
5 Аналіз напружено-деформованого стану деталей машин .....	28
6 Визначення ефективного і теоретичного коефіцієнтів концент- рації напружень в деталях машин чисельним методом .....	32
7 Розрахунок на міцність ободної частини диска компресора ви- сокого тиску з пазами типу "ластівчин хвіст" .....	39
8 Розрахунок на міцність деталей типу дисків .....	42
9 Розрахунок на міцність лопаток компресора ГТД.....	48
Перелік джерел.....	50

### **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 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.

## 1. ОСНОВИ РОБОТИ В ANSYS

**Мета роботи:** Відпрацювати основні концепції ANSYS: завантаження файлів баз даних та їх збереження, відображення об'єктів, керування видами, створення бази даних, створення й видалення елементарних геометричних об'єктів.

### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

### Порядок виконання роботи

1. Запустіть систему ANSYS 8.0 для роботи в інтерактивному режимі, використовуючи вкладку Пуск >Програми > ANSYS 8.0 > ANSYS.
2. Завантажте файл бази даних зубчастого колеса "wheel.db":  
- File > Resume from . . .

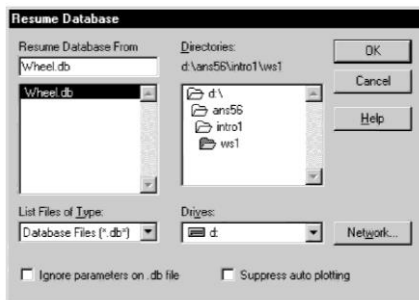


Рисунок 1.1 - Діалогове вікно завантаження нової бази даних

3. Відобразить наступні об'єкти твердотільної моделі зубчастого колеса:
  - Utility Menu → Plot → Keypoints → Keypoints – крапки;
  - Utility Menu → Plot → Lines – лінії;
  - Utility Menu → Plot → Areas – площини;
  - Utility Menu → Plot → Volumes – об'єми.
 Або використайте відповідні команди:

- KPLOT – крапки;
  - LPLOT – лінії;
  - APLOT – площини;
  - VPLOT – об'єми.
4. Відкрийте меню керування видами PanZoomRotate (рис. 1.2).  
Utility Menu → PlotCtrls → Pan Zoom Rotate...
  5. Поекспериментуйте із кнопками меню PanZoomRotate. Увімкніть режим відображення різних проєкцій моделі Top, Front, Bot, Back і ін.
  6. Увімкніть режим "Dynamic Mode" – перемістить, промасштабуйте й поверніть модель, використовуючи кнопки мишки.
  7. Вимкніть режим "Dynamic Mode" і потім динамічно перемістить, промасштабуйте й поверніть модель, натиснувши кнопку клавіатури "Ctrl" та кнопки мишки.
  8. Відобразіть ізометричний вид всієї моделі, натиснувши кнопки для вписування моделі у графічне вікно:
    - [iso]
    - [Fit]
  9. Очистіть базу даних і створіть нову:  
Utility Menu → File → Clear & Start New ...  
Або використайте команду:

/CLEAR

10. Увімкніть відображення крапок, ліній та площин:  
Utility Menu → Plot → Multi-Plots [gplot]
11. У робочій площині задайте чотири крапки за їх координатами:  
Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints → In Active CS
12. В активній системі координат уведіть у відповідні вікна номери точок і їх x,y,z-координати (після введення кожної точки можна натискати кнопку Apply):
 

№1:	0,	0,	0;
№2:	100,	0,	0;
№3:	100,	100,	0;
№4:	0,	100,	0.

13. Створіть замкнений контур з ліній, побудованих попарно за введеними крапками:  
Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Straight Line...

14. Створіть площину з побудованих ліній:  
Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → By Lines...

15. Відобразіть послідовно створені крапки, лінії та площину:  
Utility Menu → Plot → Keypoints → Keypoints...  
Utility Menu → Plot → Lines...  
Utility Menu → Plot → Areas...

16. Увімкніть режим нумерації крапок, ліній і площин:  
Utility Menu → PlotCtrls → Numbering ...

У діалоговому вікні, що відкрилося, Plot Numbering Controls (рис.1.3), укажіть ті геометричні елементи, які необхідно пронумерувати.



Рисунок 1.2 – Меню Pan Zoom Rotate

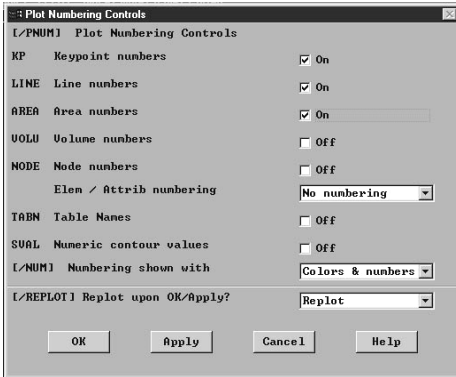


Рисунок 1.3—Діалогове вікно контролю нумерації геометричних елементів

17. Перегляньте список існуючих у поточній базі даних геометричних елементів і визначіть їхню кількість:
  - Utility Menu → List → Keypoint → Coordinates only...
  - Utility Menu → List → Lines ... → Attribute format...
  - Utility Menu → List → Areas...
18. Збережіть створену базу даних у файлі із власною назвою з розширенням ".db":
  - Utility Menu → File → Save as...
 Або використайте команду:  
 SAVE
19. Вилучіть з поточної бази даних площину, декілька ліній і крапок у заданій послідовності:
  - Main Menu → Preprocessor → Modeling → Delete → Areas Only...
  - Main Menu → Preprocessor → Modeling → Delete → Lines Only...
  - Main Menu → Preprocessor → Modeling → Delete → Keypoints...
 Зазначте, які з елементів залишились в робочій зоні після кожного кроку.
20. Завантажте збережений в п.18 файл.
  - Вилучіть площину за допомогою наступного оператора:
    - Main Menu > Preprocessor > -Modeling → Delete → Areas and Below...
  - Перевірте різницю між цими операторами видалення (знищення) геометричних елементів.
21. Знову завантажте збережений в п. 18 файл бази даних:
  - Utility Menu → File → Resume from...
 Або використайте команду:  
 RESUME
22. Відобразіть лінії й крапки:

Utility Menu → Plot → Multi-Plots.

Або використайте команду:

GPLOT

23. Установіть тип аналізу Structural і метод аналізу h-Method:  
Main menu → Preferences...
24. Потренуйтеся у виборі типу кінцевого елемента Solid 45:  
Main menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete... →  
→ Add...
25. Задайте параметри матеріалу деталі для сталі 45: матеріал – ізотропний, модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  ( $E\chi=2e11$ ), коефіцієнт Пуассона 0,3 ( $PRXY=0.3$ ).  
Main menu → Preprocessor → Material Props → Material Models →  
→ Structural → Linear → Elastic → Isotropic
26. Вийдіть із ANSYS, не зберігаючи змін у робочій базі даних:  
Utility Menu → - File → Exit... → Quit-No Save!  
Або використайте команду:  
/EXIT

### Контрольні питання

1. Запуск ANSYS. Налаштування параметрів системи для роботи в інтерактивному режимі.
2. Завантаження й збереження бази даних. Створення робочої бази даних.
3. Команди керування головного меню.
4. Команди відображення геометричних елементів моделі.
5. Використання панелі "PanZoomRotate...".
6. Завдання основних геометричних елементів.
7. Відображення геометричних об'єктів.
8. Вилучення геометричних елементів.
9. Вибір типу розрахунку й кінцевих елементів.
10. Завдання фізичних і механічних властивостей матеріалів.

## 2. ІМПОРТУВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ МОДЕЛЕЙ З CAD-СИСТЕМ

**Мета роботи:** Ознайомитися з прийомами імпортування геометрії моделей з AutoCAD, КОМПАС 3D та SolidEdge.

### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

### Порядок виконання роботи

#### 1. Імпортування геометрії моделей у форматі IGES:

а) увійдіть у робочу папку ANSYS, вказану викладачем, використовуючи "iges" як ім'я задачі;

б) імпортуйте файл IGES "bracket.igs", використовуючи опцію імпорту без спрощення геометрії:

Utility Menu → File → Import → IGES ...

- Виберіть "Defeature model", потім [OK].

- Виберіть файл "bracket.igs", потім [OK].

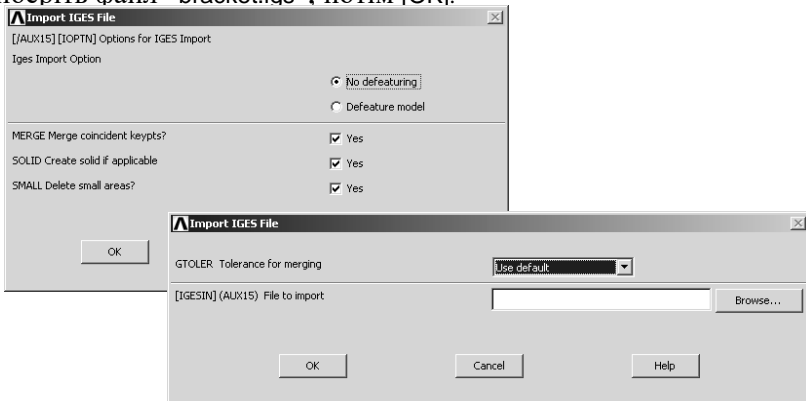


Рисунок 2.1 – Діалогові вікна імпорту геометрії у форматі IGES

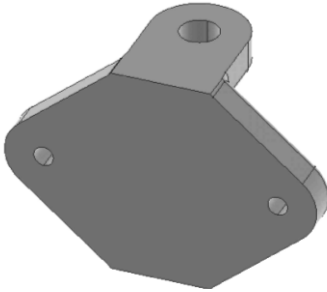


Рисунок 2.2 – Результат імпорту геометрії моделі у форматі IGES

в) збережіть отриману базу даних:

Натисніть кнопку "Save Analysis" у Toolbar

(або Utility Menu → File → Save as Jobname.db)

## 2. Імпортування геометрії моделей у форматі SAT

### 2.1. Очистіть базу даних ANSYS:

Utility Menu → File → Clear & Start New ...

- [OK], ПОТІМ [Yes].

### 2.2. Змініть ім'я задачі на "sat":

Utility Menu → File → Change Jobname ...

- уведіть "sat" у якості нового імені задачі, потім [OK].

### 2.3. Імпортуйте файл SAT "gear.sat":

Utility Menu → File → Import → SAT ...

- Виберіть файл "gear.sat", потім [OK].

Або використовуйте команду:

SATIN,gear,sat,,SOLIDS,0

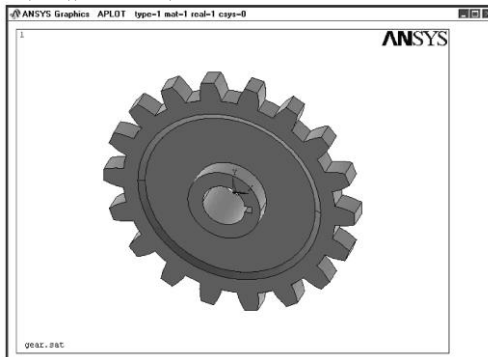


Рисунок 2.3 – Результат імпорту моделі у форматі SAT

2.4. Увімкніть опцію "Normal Faceting":

Utility Menu → PlotCtrls → Style → Solid Model Facets ...

- Виберіть "Normal Faceting", потім [OK]

Utility Menu → Plot → Replot

Або використовуйте команди:

/FACET,NORML

/REPLOTT

2.5. Збережіть базу даних:

Натисніть кнопку "Save Analysis" у Toolbar

(або виберіть: Utility Menu → File → Save as Jobname.db)

### **Завдання для самостійної роботи**

Імпортуйте з системи КОМПАС 3D і AutoCAD моделі геометрії деталей у форматі IGES та SAT, вказані викладачем.

### **Контрольні питання**

1. Послідовність імпорту геометрії моделі у форматі IGES.
2. Послідовність імпорту геометрії моделі у форматі SAT.
3. Послідовність імпорту геометрії збірки у форматі SAT.
4. Послідовність імпорту геометрії моделі у форматі Parasolid.
5. Послідовність імпорту геометрії збірки у форматі Parasolid.

### 3. СПАДНЕ ТВЕРДОТІЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Мета роботи:** Одержати практичні навички спадного твердотільного моделювання деталей машин засобами моделювання ANSYS 8.0.

**Постановка задачі:** Побудувати геометричну модель опори вала (рис. 3.1, 3.2).

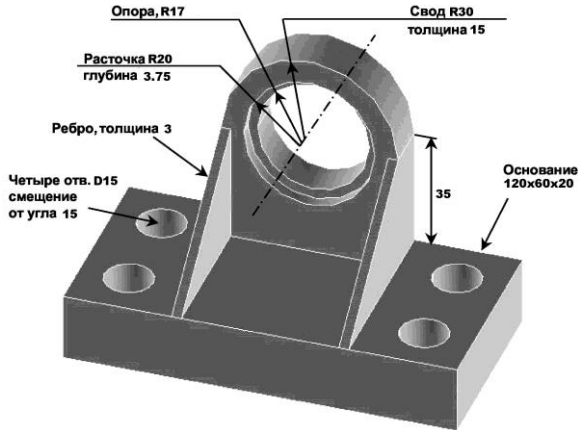


Рисунок 3.1 – Опора вала

#### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

#### Порядок виконання роботи

1. Увійдіть у робочу директорію ANSYS, зазначену викладачем, використовуючи в якості ім'я завдання file.
2. Встановіть ізометричний вид:  
Utility Menu → PlotCtrls → Pan, Zoom, Rotate ...  
- [ISO]  
Або використайте команду: /VIEW, 1, 1, 1, 1
3. Створіть половину моделі основи опори вала, як блок за координатами вершин:  
Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Block→

→ By Dimensions ... → Введіть значення координат у відповідні ячейки:

X1= 0    X2= 0.060

Y1= 0    Y2= 0.020

Z1= 0    Z2= 0.060

далі [ОК].

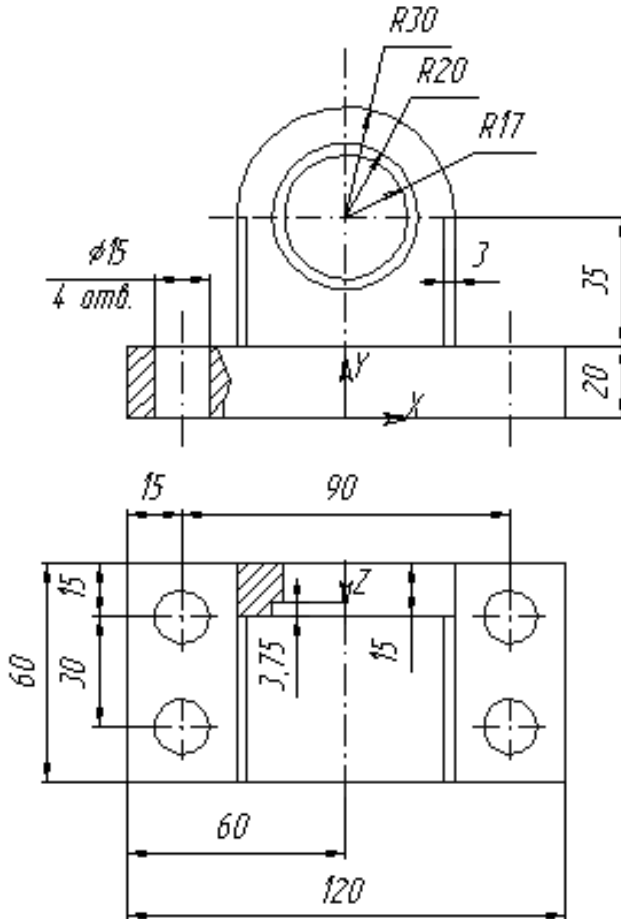


Рисунок 3.2 – Ескіз опори вала з геометричними розмірами

Або використайте команду:

/PREP7

BLOCK,0,0.06,0,0.020,0,0.060

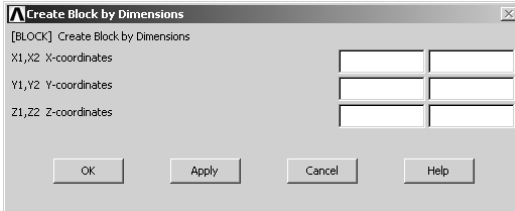


Рисунок 3.3 – Меню створення блоку за розмірами

4. Перемістите робочу площину в точку на осі отвору в основі опори вала (положення  $X=0.045$ ,  $Y=0.025$ ,  $Z=0.015$ ) та поверніть систему координат, щоб вісь  $OZ$  мала напрямок вздовж вісі майбутнього отвору:

Utility Menu → WorkPlane → Offset WP by Increments...

- Введіть значення  $X,Y,Z$  Offsets: 0.045, 0.025, 0.015

- Введіть значення  $XY, YZ, ZX$  Angles: 0, -90, 0, далі [ОК] (це означає повернути систему координат в площині  $YZ$  на  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою)

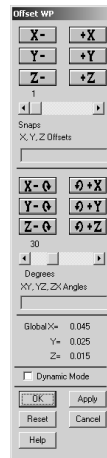


Рисунок 3.4 – Меню керування робочою площиною (WP)

Або використайте команду:

WPOFF, 0.045, 0.025, 0.015

WPROT, 0, -90, 0

5. Створіть суцільний циліндр, діаметр якого дорівнює діаметру отвору (15 мм) і висотою, що перевищує товщину основи опори вала на 5...10 мм (30 мм):

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → Solid Cylinder

- Radius =  $0.015/2$

- Depth = -0.030, далі [ОК]

Або використайте команду:

CYL4, , , 0.015/2, , , -0.030

6. Скопіюйте цей суцільний циліндр у положення другого отвору в отпорі вала:  $DZ=0.030$  – переміщення по осі z на 30мм:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Copy → Volumes

- Укажіть стрілкою циліндричний об'єм (Об'єм 2), [OK]

-  $DZ = 0.030$ , [OK]

Або використайте команду:

VGEN,2,2, , , , ,0.030, ,0

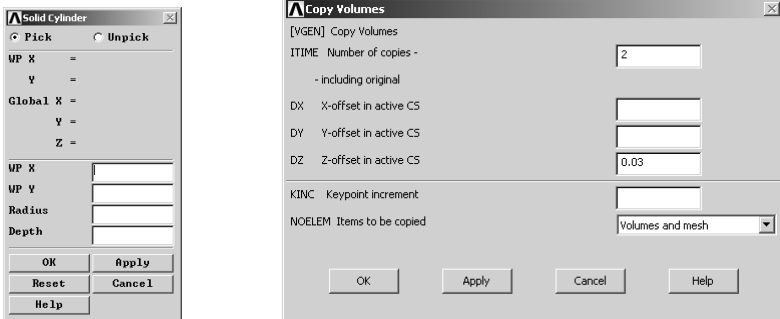


Рисунок 3.5 – Меню створення суцільного циліндра і копіювання об'ємів

7. Для отримання отворів відніміть два суцільних циліндри з основи:  
Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans →  
→ Subtract → Volumes

- Кликніть на об'єми, що залишаються – це об'єм основи (Об'єм 1), далі [OK]

- Кликніть на об'єми, що необхідно видалити – для цього вкажіть послідовно два циліндричні об'єми (Об'єми 2 і 3), [OK]

Або використайте команду:

VSBV, 1, ALL

8. Сполучіть робочу площину із центром Глобальної системи координат (тобто верніть її в початкове положення):

Utility Menu → - WorkPlane → Align WP with → Global Cartesian

Або використайте команду:

WPCSYS,-1,0 VPLOT

9. Створіть основу кронштейна опори:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Block →  
→ By 2 Corners & Z

- WP X = 0

- WP Y = 0.020

- Width = 0.030
- Height = 0.035
- Depth = 0.015, далі [OK]

Або використайте команду:

BLC4,0,0.020,0.030,0.035,0.015

10. Перемістіть робочу площину на передню поверхню кронштейна опори:

Utility Menu → - WorkPlane → Offset WP to → Keypoints +

- Вкажіть точку у верхній лівій вершині передньої поверхні – точку, через яку проходить вісь отвору в кронштейні опори вала, потім [OK].

Або використайте команду: KWPAVE, 16

11. Створіть свод кронштейна опори:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → Partial Cylinder...

- WP X = 0
- WP Y = 0
- Rad-1 = 0
- Theta-1 = 0
- Rad-2 = 0.030
- Theta-2 = 90
- Depth = -0.015, далі [OK].

Або використайте команду:

CYL4,0,0,0,0,0.030,90,-0.015

12. Створіть циліндри для розточки й наскрізного отвору в кронштейні опори:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → Solid Cylinder...

- WP X = 0
- WP Y = 0
- Radius = 0.020
- Depth = -0.00375, далі [Apply]
- WP X = 0
- WP Y = 0
- Radius = 0.017
- Depth = -0.040, далі [OK].

Або використайте команду:

CYL4,0,0,1, , , , -0.00375 CYL4,0,0,0.017, , , , -0.040

13. Відніміть ці два суцільних циліндри для створення розточки та наскрізного отвору в кронштейні опори:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Subtract → Volumes...

- Вкажіть стрілкою обидва об'єми, що утворюють основу й свод кронштейну опори, далі [Apply].
- Вкажіть циліндр розточки. Далі [Apply].
- Вкажіть ті ж самі два об'єми, що залишаються [Apply].
- Вкажіть наскрізний циліндр. Далі [ОК].

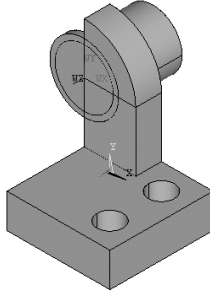


Рисунок 3.6 – Опора вала до вирахування циліндрів (п. 12)

14. Об'єднайте точки, що співпадають:

Main Menu → Preprocessor → NumberingCtrls → Merge items...

Встановіть Label - "Keypoints", далі [ОК].

Або використайте команду:

NUMMRG,KP

15. Створіть ребро жорсткості, для цього:

а) Створіть точку посередині передньої кромки основи:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints →  
→ KP between KPs...

- Вкажіть стрілкою дві передні точки основи, між якими починається ребро жорсткості, далі [ОК]

- Введіть  $RAT1 = 0.5$ , (рис. 3.7), далі [ОК] (0.5 – відношення довжини всього відрізка до відстані між першою та новою точкою).

Або використайте команду:

KBETW,7,8,0,RAT1,0.5

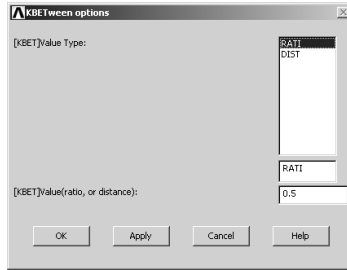


Рисунок 3.7 – Створення точки посередині відрізка між вказаними точками (RATI = 0,5 – відношення довжини всього відрізка до відстані між першою та новою точкою)

б) Створіть трикутну поверхню (площину) по 3 точкам:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → Through KPs..

- Вкажіть 1-у точку (1st keypoint), де кронштейн опори перетинається з основою: X=0.030

- Вкажіть 2-у точку (2nd keypoint), де основа кронштейна опори перетинає нижню поверхню своду: X=0.030

- Вкажіть 3-ю точку (3rd keypoint), створену в пункті 15.1: X=0.030, Y=0.020, Z=0.060 [OK]

Або використайте команду:

A,14,15,9

в) Витягніть створену поверхню (площину) на величину товщини ребра жорсткості (3 мм) уздовж нормалі до неї (рис. 3.8):

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude → Areas → Along Normal...

- Вкажіть трикутну поверхню, створену в кроці 15.2, далі [OK]

- DIST = -0.003, далі [OK]

Або використайте команду:

VOFFST,3,-0.003

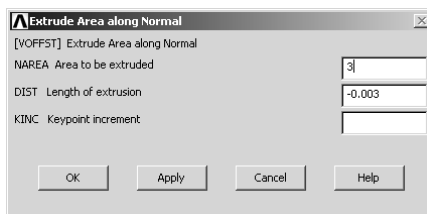


Рисунок 3.8 – Меню протягання площини уздовж нормалі

16. Далі необхідно склеїти створені об'єми:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Glue →  
→ Volumes  
- [Pick All]

Або використайте команду:

VGLUE,ALL

17. Включіть відображення номерів об'ємів, і потім відобразіть об'єми:

Utility Menu - PlotCtrls → Numbering ...

- Встановіть Volume numbers, увімкніть on, далі [OK]

Або використайте команду:

/PNUM,VOLU,1 VPLOT

18. Збережіть створену базу даних і вийдіть з ANSYS.

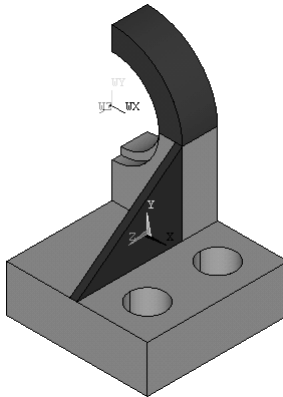


Рисунок 3.9 – Розрахункова модель опори вала (результат побудови)

*Примітка:* Для міцностних розрахунків достатньо половини симетричної моделі. В тому випадку, коли потрібно моделювати цю деталь повністю, необхідно дзеркально відобразити (MainMenu → Preprocessor → Modeling → Operate → Reflect → Volume) другу половину деталі відносно площини ZY.

### Контрольні запитання

1. Основні прийоми спадного твердотілого моделювання в процесорі системи ANSYS 8.0.
2. Роль Робочої площини (WP) в спадному твердотільному моде-

люванні.

3. Використання функцій: створення (Create), копіювання (Copy), переміщення (Move), відображення (Reflect), видалення (Delete) геометричних елементів.

4. Використання булевих (Boolean) операцій моделювання.

5. Ціль об'єднання, "склеювання" (Glue) об'ємів, як завершальної операції спадного твердотільного моделювання й об'єднання співпадаючих точок.

### Завдання для самостійної роботи 3.1

Побудуйте модель опори вала (рис. 3.1 та 3.10) відповідно до розмірів, заданих у таблиці 3.1.

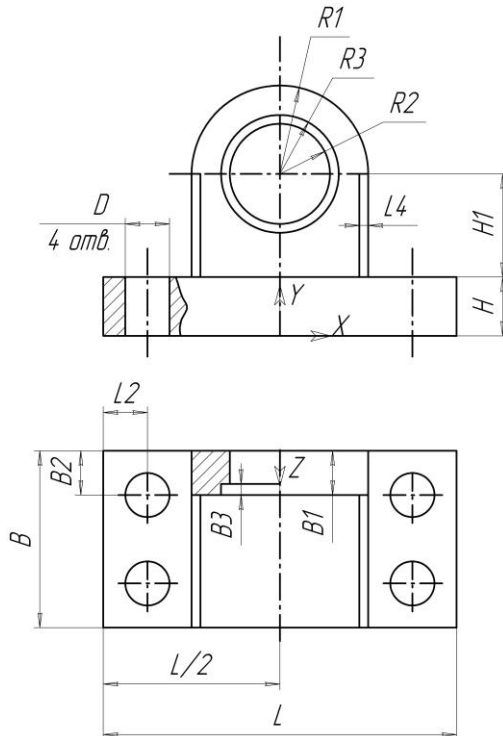


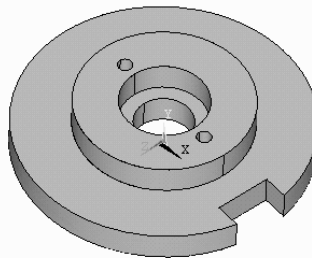
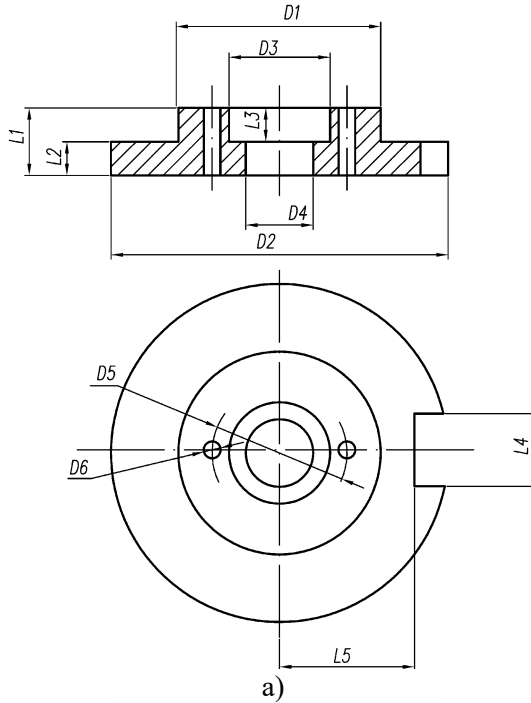
Рисунок 3.10 – Ескіз опори вала з геометричними розмірами

Таблиця 3.1 – Завдання для самостійної роботи 3.1

Варіант	Основа	Свод			Ø4-х отворів	Зміщення від ку- та		Наскрізний отвір в опорі	Розточка	Глибина	Товщина ребра
		радіус	товщина	висота		L2	B2				
	L×B×H	R1	B1	H1	D	L2	B2	R2	R3	B3	L4
1	370×185×62	370/4	54	108	48	48	48	54	62	12.5	10.0
2	240×120×40	240/4	30	70	30	30	30	34	40	7.5	6.0
3	290×140×50	290/4	36	84	36	36	36	42	48	9.0	7.0
4	130×70×20	130/4	17	40	16	16	16	18	22	4.5	3.5
5	140×75×25	140/4	18	44	18	18	18	20	24	4.5	3.5
6	300×150×50	300/4	42	88	37	37	37	42.5	50	9.0	7.5
7	310×155×25	310/4	44	92	38	38	38	44	52	9.75	8.0
8	320×160×54	320/4	46	96	40	40	40	46	54	10.0	8.0
9	330×170×56	330/4	48	98	42	42	42	48	56	10.5	8.5
10	350×175×58	350/4	50	102	44	44	44	50	58	11.5	9.0
11	360×180×60	360/4	52	105	46	46	46	52	60	12.0	9.5
12	160×80×28	160/4	20	46	20	20	20	22.5	26	5.0	4.0
13	170×85×30	170/4	22	50	21	21	21	24	28	5.25	4.0
14	180×90×35	180/4	24	54	22	22	22	25	30	5.75	4.5
15	190×95×32	190/4	26	56	24	24	24	27	32	6.0	5.0
16	200×100×34	200/4	28	60	26	26	26	29	34	6.5	5.0
17	220×105×36	220/4	32	64	27	27	27	30	36	6.75	5.5
18	230×110×38	230/4	34	68	28	28	28	33	38	7.0	6.0
19	250×125×42	250/4	35	74	32	32	32	35.5	42	8.0	6.5
20	260×130×44	260/4	38	78	33	33	33	37	44	8.25	6.5
21	280×140×46	280/4	40	82	34	34	34	39	46	8.5	7.0

### Завдання для самостійної роботи 3.2

Побудуйте модель диска (рис. 3.11) відповідно до розмірів, заданих у таблиці 3.2.



б)

а – умовні позначки розмірів відповідно до таблиці 3.2

б – модель диска в ізометрії

Рисунок 3.11 – Диск

Таблиця 3.2 – Завдання для самостійної роботи 3.2 (рис. 3.11)

Ва- ріант	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	<i>D5</i>	<i>D6</i>	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>
1	60	100	30	20	40	5	20	10	15	20	40
2	120	200	60	40	80	10	40	20	30	40	80
3	144	240	72	48	96	12	48	24	36	48	96
4	66	110	33	22	44	5	22	11	16	22	44
5	72	120	36	24	48	6	24	12	18	24	48
6	138	230	69	46	92	10	46	23	34	46	92
7	150	250	75	50	100	12	50	25	37	50	100
8	90	150	45	30	60	7	30	15	22	30	60
9	96	160	48	32	64	8	32	16	24	32	64
10	102	170	51	34	68	8,5	34	17	25	34	68
11	51	85	25	17	34	4,5	17	7	10	17	34
12	48	80	24	16	32	4	16	8	8	16	32
13	54	90	27	18	36	3	18	9	11	18	36
14	132	220	66	44	88	11	44	22	33	44	88
15	78	130	39	26	52	6	26	13	18	26	52
16	84	140	42	28	56	7	28	14	21	28	56
17	156	260	78	52	104	12	52	26	39	52	104
18	108	180	54	36	72	8	36	18	27	36	72
19	114	190	57	38	76	9	38	19	28	38	76
20	126	210	63	42	84	10	42	21	31	42	84

## 4. СТВОРЕННЯ СІТКИ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Ціль роботи:** отримати практичні навички створення вільної та регулярної сітки кінцевих елементів (КЕ) в системі ANSYS 8.0.

**Постановка задачі:** Виконати розбивання на кінцеві елементи вільною та регулярною сіткою КЕ моделі опори вала, побудованої на самостійному занятті №3.1.

### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

### Порядок виконання роботи

1. Увійдіть в робочу директорію ANSYS, зазначену викладачем.
2. Завантажте файл бази даних опори вала (рисунок 3.8), створений на практичному завданні №3:  
Utility Menu → File → Resume from...  
- Виберіть файл, потім [OK].
3. Увійдіть в препроцесор и виберіть тип кінцевого елемента SOLID95:  
Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete → [Add...]  
- Виберіть "Structural Mass → Solid" і "Brick 20node 95", потім [OK].  
- [Close]

Або використовуйте команди:

/PREP7

ET,1,SOLID95

4. Активізуйте опцію згладжування сітки SmartSize і створіть у моделі вільну сітку тетраедричних елементів:  
Main Menu → Preprocessor → Meshing → MeshTool...  
- Включіть "SmartSize".  
- Встановіть рівень SmartSize - 4. Потім у меню Mesh установіть Volumes і активізуйте опції Tet і Free.  
- [Mesh]  
- [Pick All]

Або використовуйте команди:

SMRT,4 MSHAPE,1,3D MSHKEY,0 VMESH,ALL

5. Визначте кількість кінцевих елементів у моделі. Запишіть у звіт.  
Utility Menu → List → Elements → Attributes Only...  
Удалить сітку кінцевих елементів, використовуючи кнопку [Clear].  
Змінюючи рівень Smartize добийтесь кількості елементів моделі не більш 4000.
6. Збережіть модель (рис.4.1) з вільною сіткою кінцевих елементів (її буде використано в самостійній роботі 5.1 наступного практичного заняття):  
Utility Menu → File → Save as...  
- Введіть ім'я створеної бази даних, потім [OK]
- Або використовуйте команди:  
SAVE,ім'я,db

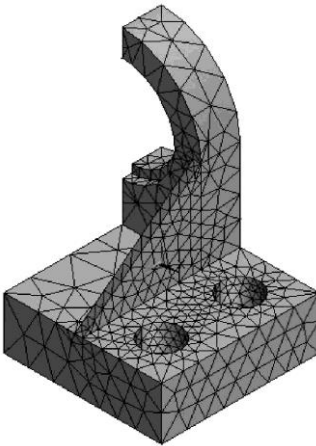


Рисунок 4.1 – Результат розбивання опори вала вільною сіткою кінцевих елементів

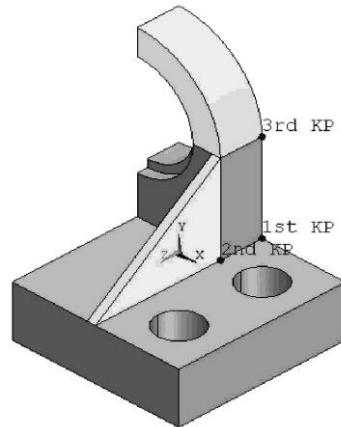


Рисунок 4.2 – Завдання положення робочої площини (WP) за трьома точками

Побудова регулярної сітки кінцевих елементів протягуванням:

7. Видалить вільну (Free) сітку:  
Main Menu → Preprocessor → Meshing → MeshTool...  
- [Clear]  
- [Pick All]
- Відновіть нормальне зображення опори вала:  
Utility Menu → Plot → Volumes...

Або використовуйте команди:

VCLEAR,ALL VPLOT

8. Розділіть об'єм основи на два об'єми (за допомогою переносу робочої площини XY), щоб зробити його топологічно більш підходящим для побудови сітки протягуванням:

Utility Menu → WorkPlane → Align WP with → Keypoints...

- Вкажіть три крапки, як показано на рис. 4.2, потім [OK].

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

- Вкажіть стрілкою об'єм основи, який буде розділено на дві частини робочою площиною, потім [OK]

Utility Menu → WorkPlane → Display Working Plane

Utility Menu → Plot → Volumes

Або використовуйте команди:

KWPLAN, -1, 12, 14, 11

VSBW,7

WPSTYLE

VPLOT

9. Включіть режим створення тетраедричної сітки в об'ємах, що не підходять для побудови сітки протягуванням:

Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh → Volume Sweep →  
→ Sweep Opts...

- Виберіть "Tet mesh in nonsweepable volumes", потім [OK]

Або використовуйте команду:

EXTOPT,VSWE,TETS,ON

10. Залишіть рівень SmartSize - 4 і установіть глобальний розмір елемента 0.125, потім створіть протягуванням змішану (брикет/тетраедр) сітку у моделі:

Main Menu → Preprocessor → Meshing → MeshTool...

- Нажміть [Set] у меню Size Controls: Global

- Уведіть SIZE = 0.125, потім [OK].

- Виберіть "Hex" і "Sweep", і залиште настройку по умовчанням "Auto Src/Trg"

- [Sweep]

- [Pick All]

- [Yes] - для побудови тетраедричної сітки в об'ємі б.

Або використовуйте команди:

SMRT,2 VSWEEEP,ALL

11. Таким чином більшість елементарних об'ємів деталі було розбито більш оптимальною регулярною сіткою, крім об'єму, що неможливо розбити так названим протягуванням, і який автоматично розбито вільною (Free) сіткою.

12. Занесіть кількість КЕ цієї моделі в звіт. Порівняйте з попередньою моделлю, розбитою вільною сіткою в пунктах 4 та 5.

Збережіть модель з регулярною сіткою кінцевих елементів (рис. 4.3), її також буде використано в самостійній роботі 5.1:

Utility Menu → File → Save as ...

Або використовуйте команду:

SAVE,им'я,db

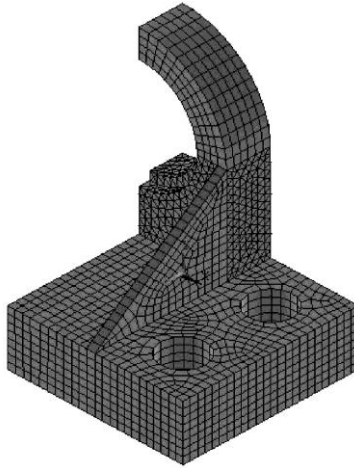


Рисунок 4.3 – Розбивання опори вала регулярною сіткою кінцевих елементів

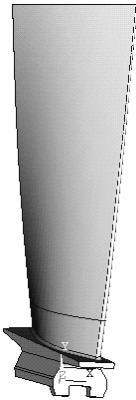
### Контрольні питання

1. Порядок створення сітки кінцевих елементів.
2. Завдання рівня розміру кінцевих елементів.
3. Порядок створення регулярної сітки КЕ.
4. Завдання глобального розміру елементів.
5. Проаналізуйте причини різниці кількості елементів моделей, розбитих вільною і регулярною сіткою кінцевих елементів.

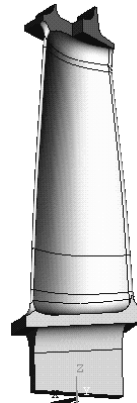
## Самостійна робота 4.1

### Завдання для самостійної роботи

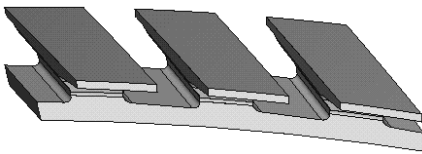
Виконайте створення сітки кінцевих елементів деталей ГТД (рис. 4.4). Зверніть увагу на створення регулярної сітки КЕ уздовж пера лопаток, у полотні диска і уздовж евольвентої поверхні зуба шестерні. Інші об'єми можна розбити вільною сіткою кінцевих елементів.



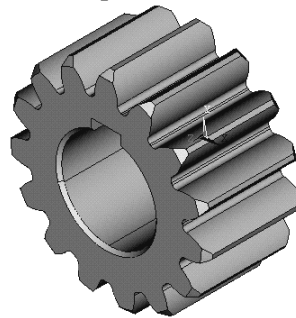
Лопатка компресора дв. ТВЗ-117  
Варіанти 1-5



Лопатка турбіни дв. ТВЗ-117  
Варіанти 6-10



Ободна частина диска КВД  
двигуна Д-36  
Варіант 11-15



Шестерня центрального приводу  
Варіант 16-20

Рисунок 4.4 – Завдання для самостійної роботи 4.1

## 5. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Мета роботи:** Одержати практичні навички прикладення навантажень і розрахунку напружено-деформованого стану деталей машин.

**Постановка завдання:** Визначити запас міцності кронштейна й опори тяги.

### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

### Порядок виконання роботи

1. Завантажте базу даних моделі кронштейна (рис. 5.1). У моделі вже створено вільну сітку тривимірних 20-вузлових кінцевих елементів SOLID95.
2. Задайте властивості матеріалу (сталь 45, модуль пружності  $E=2 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3).

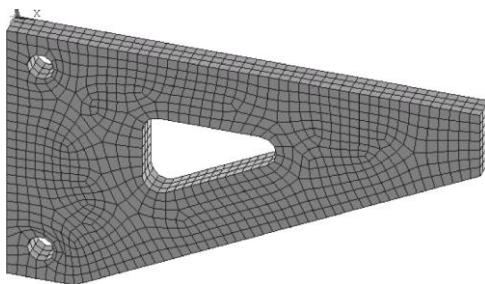


Рисунок 5.1 – Модель кронштейна

3. Увійдіть у головне меню ANSYS і закріпіть кронштейн, обмеживши переміщення внутрішніх поверхонь отворів в усіх напрямках (all dof), тобто у всіх напрямках зміщення дорівнює нулю.  
Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → → Displacement → On Areas +

- Вкажіть чотири поверхні двох отворів – кожен отвір за побудовою елементарних геометричних елементів складається з двох напівциліндричних поверхонь (під номерами 3, 4, 5, і 6), потім [OK].

4. Прикладіть тиск у 4 МПа (що дорівнює  $4 \cdot 10^6$  Па) на верхню поверхню кронштейна:

Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Pressure → On Areas +

- Вкажіть верхню поверхню кронштейна (номер 11), потім [OK]

- Уведіть значення навантаження VALUE = 4E6, потім [OK]

Або використайте команду:

SFA,11,1,PRES,4E11

5. Збережіть базу даних на цьому етапі. Після розрахунку зберігати файли не рекомендується із-за їх великого об'єму пам'яті.

6. Запустіть завдання на розрахунок:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS

- [OK]

Або використайте команди:

SAVE

SOLVE

7. Після завершення розрахунку увійдіть у головний постпроцесор і виведіть зображення напружень по Мизесу (SEQV) (рис. 5.2):

Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot →

→ Nodal Solu...

- Виберіть "Stress" й "von Mises SEQV", потім [OK]

Або використайте команди:

/POST1

PLNSOL,S,EQV

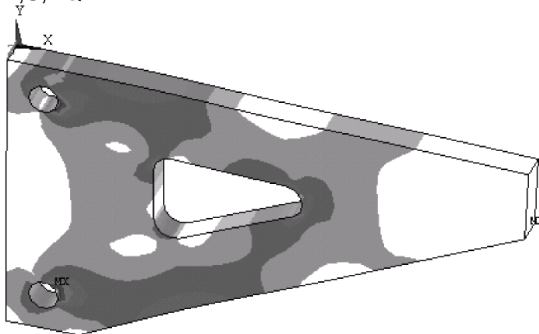


Рисунок 5.2 - Результат розрахунку напруженого стану кронштейна.

8. Визначте максимальну величину еквівалентної напруги в кронштейні й розрахуйте коефіцієнт запасу міцності деталі при  $[\sigma]=165$  МПа.
9. Підбираючи величину тиску на верхню площину кронштейна визначте, при якій величині тиску забезпечується запас міцності кронштейна по величині головних напруг (1st principal S1) у діапазоні  $n=1,4\dots 1,8$ .
10. Визначте небезпечний переріз кронштейна по величині еквівалентних напруг, розрахованих по четвертій теорії міцності (von Mises SEQV).

11. Створіть анімаційний звіт навантаження кронштейна в:

Unility Menu → PlotCtrls → Animate → Deformed shape... або більш інформаційний варіант анімації:

Unility Menu → PlotCtrls → Animate → Deformed results...

12. Визначте прогин кінця кронштейна при підбраній величині навантаження (що забезпечує запас міцності в необхідному діапазоні):

Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot →  
→ Nodal Solu ... → DOF solution → UY

Порівняйте його з допустимим значенням.

Допустиме значення прогину кронштейна, становить 1/500 його довжини. Довжину кронштейна визначають як відстань між крапками кінцевих перетинів за допомогою вимірювання довжини геометричних примітивів:

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Check Geom → KP distances.

Вкажіть дві протилежні точки верхньої площини кронштейну, відстань між якими необхідно виміряти.

*Примітка: кронштейн накреслено в дюймах (").*

### Контрольні питання

1. Завдання граничних умов при навантаженні моделі.
2. Завдання властивостей матеріалу моделі деталі.
3. Прикладення навантажень: переміщень, сили, тиску тощо, у вузлах, на лініях і площинах моделі.
4. Візуалізація й аналіз результатів розрахунку.
5. Визначення напруг, переміщень, деформацій.
6. Анімація.

### Завдання для самостійної роботи 5.1

Визначте максимальне значення еквівалентних напруг в моделі опори вала (створеної на самостійному занятті №3.1 та розбитою вільною та регулярною сіткою кінцевих елементів на практичному занятті №4), і запас міцності за межею текучості ( $\sigma_T$ ). Заповніть таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку опори вала

Вид сітки	Еквівалентні напруги $\sigma_{\max}$ , МПа	Запас міцності $n_\sigma$
Вільна		
Регулярна		

Матеріал опори вала – Сталь 45 ( $\sigma_T = 255$  МПа).

Закріплення опори здійснюється по нижніх границях отворів в основі опори вала. Опору навантажено тиском по нижній чверті внутрішньої поверхні отвору своду 0,04 МПа, у місці розташування у складеному вузлі, або вала з підшипником (під час експлуатації).

Визначте місце розташування небезпечного перерізу. Роль ребра жорсткості. Якщо запас міцності недостатній зробіть більшою товщиною ребра (видаліть ребро жорсткості, перерахуйте та порівняйте).

## **6. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО І ТЕОРЕТИЧНОГО КОЕФІЦІЄНТІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В ДЕТАЛЯХ МАШИН ЧИСЕЛЬНИМ МЕТОДОМ**

**Мета роботи:** Вивчити прийоми розрахунку методом кінцевих елементів (МКЕ) коефіцієнтів концентрації напруг.

**Постановка задачі:** Розрахувати коефіцієнти концентрації напруг, що утворюються центральним отвором при статичному навантаженні плоскої пластини. Порівняти точність розрахунку МКЕ з аналітичним рішенням.

Проаналізувати вплив кількості кінцевих елементів на значення похибки. Знайти оптимальну кількість КЕ для отримання необхідної точності розрахунку.

Розрахувати міцнісні характеристики пластини для білінійної моделі матеріалу.

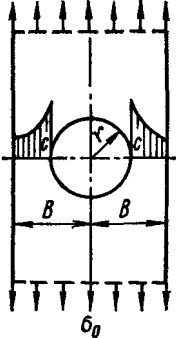
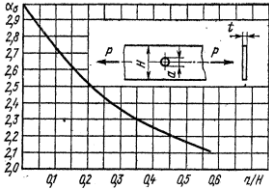
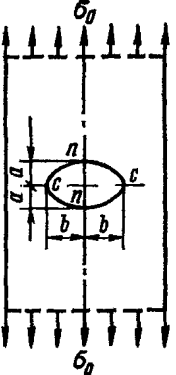
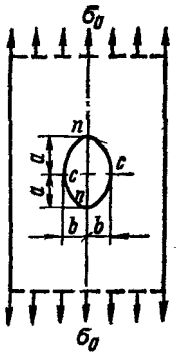
### **Необхідне обладнання та матеріали:**

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

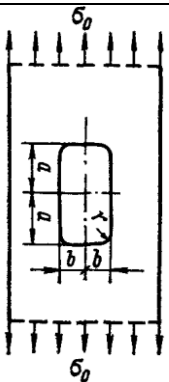
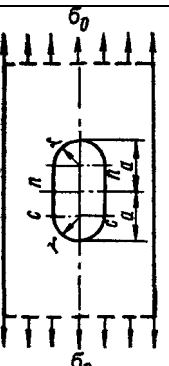
### **Порядок виконання роботи**

1. Створіть геометричну модель пластини з центральним отвором, безпосередньо в системі ANSYS 8.0 або в графічній системі AutoCAD, пластини з центральним отвором, згідно варіанту (табл. 6.1). Довжина і ширина пластини вказані у примітці до табл. 6.1.
2. Імпортуйте модель в систему ANSYS, використовуючи команди імпорту моделей.
3. Визначте тип кінцевого елемента Solid Quad 4 node 42, його характеристики і матеріал деталі.  
Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete...  
Або за допомогою команди:  
ET,1,PLANE42.  
Для матеріалу необхідно вказати модуль пружності ( $2 \cdot 10^5$  МПа і коефіцієнт Пуассона – 0,3).

Таблиця 6.1 – Початкові дані для виконання роботи

№ вар.	Форма пластини	a	b	r	Формула для розрахунку напруг
1		-	-	80	<p>У середньому перетині:</p> $\sigma = \alpha_0 \cdot \sigma_0 \cdot \frac{B}{B-r};$ 
2		-	-	100	
3		-	-	160	
4		-	-	40	
5		80	120	-	<p>У середньому перетині:</p> $\sigma = \sigma_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{b}{a}\right)$
6		60	120	-	
7		100	140	-	
8		110	150	-	
9		120	60	-	<p>У середньому перетині:</p> $\sigma = \sigma_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{b}{a}\right)$
10		150	100	-	
11		160	120	-	
12		100	70	-	

Продовження табл. 6.1

№ вар.	Форма пластини	a	b	r	Формула для розрахунку напруг
13		150	100	30	<p>У кутах:</p> $\sigma = \sigma_0 \cdot \left[ 1 + \left( 1 + 2 \cdot \frac{b^2}{a^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{b}{r}} \right]$
14		150	100	40	
15		150	100	50	
16		120	70	10	
17		120	-	50	<p>На початку переходу радіусу:</p> $\sigma = \sigma_0 \cdot \left( 2 + \frac{r^2}{a^2} \right)$ <p>У середньому перетині:</p> $\sigma = \sigma_0 \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{b^2}{a^2} \right)$
18		150	-	100	
19		200	-	120	
20		180	-	80	

Примітка. Довжина пластини – 800 мм; ширина – 500 мм (B=250 мм).

#### 4. Створіть сітку кінцевих елементів.

Для створення сітки кінцевих елементів потрібно:

а) привласніть атрибути поверхні командою екранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → All Areas...

Для поверхонь потрібно задавати наступні властивості –

приводяться в порядку, вказаному в панелі вибору атрибутів Area Attributes:

*MAT* Material number – номер вживаного матеріалу;

*REAL* Real constant set number – номер набору характеристик

кінцевого елемента (товщина, приєднана маса і т. п. в даному випадку не вказані і не потрібні);

*TYPE Element type number* – номер типу елемента;

*ESYS Element coordinate sys* – номер елементної координатної системи (для ізотропного матеріалу не потрібний).

Через командний рядок «*атрибути поверхні*» задаються командою AATT,1,,1,0.

Виконати дану операцію необхідно, не дивлячись на те, що маємо справу з одним матеріалом і одним типом елемента;

- б) необхідно створити сітку KE, розміри елементів якої на внутрішньому контурі (у зоні концентрації напруг) менше, ніж на зовнішньому.

Для цього слід задавати число елементів на окремих лініях

Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → Manual Size → Lines → Picked Lines

(у панелі Element Sizes on Picked Lines користуватися вікном SPACE Spacing Ratio, за допомогою якого можна задавати довжину ребра, змінну по лінії). Задають кількість кінцевих елементів, на які буде розбита лінія або розмір елемента. Кількість кінцевих елементів або розмір елемента задати самостійно;

- в) створіть сітку KE на поверхні:

Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh → Areas → Free

Або з командного рядка:

AMESH,1 (де 1 – номер поточної поверхні).

Можливий також варіант: AMESH,ALL (для всіх поверхонь).

## 5. Закріплення моделі і визначення навантажень.

Пластина закріплюється по лінії одного з торців і навантажується розподіленим зусиллям з протилежного торця.

Закріплення по лінії здійснить командою екранного меню:

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

Вкажіть курсором на екрані необхідну лінію. У панелі Apply U,ROT on Lines в списку Lab2 DOFs to be constrained слід виділити необхідний напрям переміщення (ALL DOF, тобто за всіма напрямками, або UY в напрямку вісі OY), і в рядку VALUE Displacement value вказати значення переміщення (в даному випадку – 0), тобто пластину закріплено.

Натиснення кнопки ОК призводить до прикладання необхідного переміщення до лінії, а натиснення кнопки Apply дає можливість вибору наступної лінії.

Або з командного рядка: DL,5,,UY,0. В даному випадку 5 – номер лінії, UY — напрям переміщення, 0 – значення переміщення.

Аналогічним чином прикладається розподілене по лінії навантаження на протилежному торці пластини (40 МПа).

Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural →  
→ Pressure → On Lines

Після вказівки необхідної лінії в панелі Apply PRES on lines вкажіть значення навантаження, що прикладається, в рядку VALUE Load PRES – 4E7 [OK]. Знак перед числовим значенням навантаження вибирають виходячи з того, що пластинка повинна бути схильна до розтягування уздовж осьової лінії.

Або з командного рядка:  
SFL,4,PRES,-10.

#### 6. Розрахунок напружено-деформованого стану.

Запустіть завдання на розрахунок моделі з поточними установками:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS

#### 7. Перегляд і аналіз результатів.

Відобразіть розподіл еквівалентних напруг (за Мізесом) в різних частинах зразка:

Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot →  
→ Nodal Solution

#### 8. Розрахунок коефіцієнту концентрації напруг, що створюється центральним отвором.

Для цього визначте величину напруження частини отвору в небезпечному перерізі, використовуючи команду:

Main Menu → General Postproc → Query Results → ANSYS Toolbar →  
→ POWRGRPH → Off → [OK] → Nodal Solu

#### 9. Виконайте розрахунок теоретичного коефіцієнта концентрації напружень аналітичним методом і порівняйте отриманий результат з результатами розрахунку за допомогою чисельного метода. Визначте похибку розрахунку (%).

#### 10. Виконайте розрахунок напруженого стану пластини з центральним отвором з різною кількістю кінцевих елементів. Проаналізуйте вплив числа KE на точність розрахунку, порівнюючи отримані результати з аналітичним рішенням. Побудуйте графік залежності погрішності обчислення від числа елементів в моделі (в координатах $n, \text{шт} - \delta, \%$ ). Визначте оптимальне число KE в моделі.

#### 11. Виконайте розрахунок напруженого стану пластини за допомогою

елементів другого порядку (тип елемента – Plane 82 – 8-м і вузловий ізопараметричний елемент). Зверніть увагу, що достовірний результат можна отримати при значно меншому числі КЕ, ніж при використанні елементів першого порядку (Plane 42). Проаналізуйте точність визначення напружень чисельним методом за допомогою елементів другого порядку і аналітично. Порівняйте отриманий результат з точністю розрахунку при такому ж числі КЕ першого порядку.

12. Побудуйте епюри розподілу напруг в небезпечному перетині пластини, аналогічний зображеному у таблиці 6.1 для варіантів 1-4.

### Розрахунок пластини з використанням білінійної моделі матеріалу

Приклад: задайте білінійну модель зміцнення матеріалу ЭК79-ИД (рис. 6.1) і визначте величину ефективного коефіцієнта концентрації напруг, аналогічно тому, як було визначено величину теоретичного коефіцієнта концентрації.

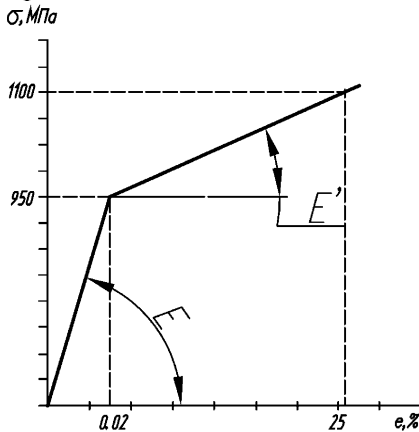


Рисунок 6.1 – Залежність деформація-напруження для сплаву ЭК79-ИД

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 мате-

ріалу (950 МПа).

У полі Tang Mod необхідно вказати величину дотичного модуля пружності, що визначається як тангенс кута нахилу кривої в координатах "деформація – напруження" (рис. 6.1) при напруженнях вище за межу текучості (друга частина кривої).

Зверніть увагу на те, що при завданні білінійного закону зміцнення матеріалу модуль пружності і коефіцієнт Пуассона повинні бути заздалегідь задані як для випадку завдання лінійної моделі зміцнення.

Оформіть звіт з практичної роботи.

### **Контрольні питання**

1. Етапи визначення коефіцієнта концентрації напружень методом КЕ.
2. Елементи першого і другого порядку.
3. Завдання розміру елементу уздовж лінії. Мета такого способу завдання?
4. Чому не можна навантажувати пластину протилежно направленими силами?
5. Вплив кількості КЕ на точність розрахунку.
6. Ефективний і теоретичний коефіцієнти концентрації напружень. Фізичний сенс і методи їх визначення.
7. Лінійна і білінійна моделі матеріалів. Основні особливості і способи завдання.

## 7. РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ОБОДНОЇ ЧАСТИНИ ДИСКА КОМПРЕСОРА ВИСОКОГО ТИСКУ З ПАЗАМИ ТИПУ "ЛАСТІВЧИН ХВІСТ"

**Ціль роботи:** Ознайомитися із основними прийомами розрахунку напружень, діючих при статичному навантаженні консольно закріпленої ободної частини диска КВТ з пазами типу "ластівчин хвіст"

**Постановка задачі:** Визначити максимальні, мінімальні напруження, небезпечний перетин зразка, запас міцності по межі міцності матеріалу та величину концентрації напружень.

### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

### Порядок виконання роботи

Імпортуйте модель ободної частини диску КВТ, ім'я файлу – "DiskKVD.sat".

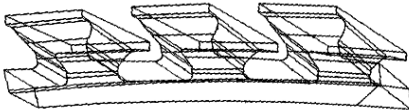


Рисунок 7.1 – Каркасна модель ободної частини диска КВТ.

1. Відобразіть каркасну модель (рис. 7.1) у вигляді площин і об'ємів:  
Utility Menu → PlotCtrls → Style → Solid Model Facets ...  
- Виберіть "Coarse", потім [OK]
2. Виберіть тип кінцевого елемента (Solid 95).
3. Задайте властивості матеріалу (матеріал ізотропний; модуль пружності  $2 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона 0,3).
4. Виконайте розбиття моделі вільною сіткою кінцевих елементів, задалегідь встановивши розмір елемента для розбиття:  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м (1,4 мм).
5. Закріпіть зразок за площини крайнього міжпазового виступу, прилеглі до площин хвостовиків лопаток, які встановлюють в пази при складанні вузла (площини 1, 2, 3, та 4 на рис. 7.2).

6. Виконайте статичне навантаження ободної частини диска. Для цього протилежний торець зразка (лінія 5 на рис. 7.2) змістіть донизу в напрямку відповідної вісі на  $5 \cdot 10^{-4}$  м (0,5 мм), що еквівалентно навантаженню 180 МПа.
7. Виконайте розрахунок напружено-деформованого стану ободної частини диска КВТ с поточними настройками:  
Main Menu → Solution → Solve → Current LS

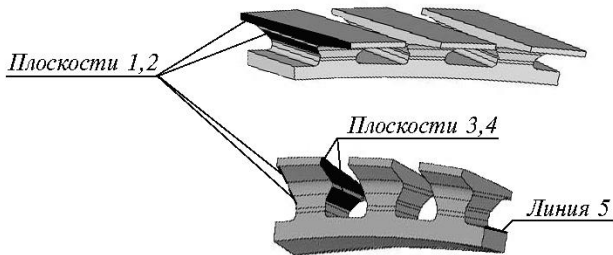


Рисунок 7.2 – Площини та лінії для закріплення і навантаження зразка

8. Відобразить розподіл еквівалентних напружень (за Мізесом) в різних частинах зразка:  
Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solution...  
- Виберіть "Stress" та "von Mises" [OK].
9. Визначте величину максимального і мінімального напруження. Для цього необхідно визначити небезпечний перетин ободної частини диска, місця концентрації напружень.  
Розрахуйте величину запасу міцності по межі міцності матеріалу (жаростійкий сплав на нікелевій основі ЭИ 698-ВД межа міцності  $\sigma_6=1050$  МПа).
10. Визначте коефіцієнт конструктивної концентрації напружень, створений викружкою пазу, для чого визначте величину напруження в зоні викружки та в найближчому до неї перетині, використовуючи команду:  
Main Menu → General Postproc → Query Results  
Далі необхідно відключити функцію POWRGRPH:  
ANSYS Toolbar → POWRGRPH → Off → [OK] → Nodal Solu ...  
Виберіть напруження за Мізесом и вкажіть вузол, в якому необхідно визначити напружений стан.

11. Задайте білінійну модель зміцнення матеріалу, використовуючи залежність між деформацією и напруженнями, приведену на рис. 6.1. Визначте ефективний коефіцієнт концентрації напружень від викружки паза та порівняйте його із величиною теоретичної концентрації напружень.
12. У звіті практичного заняття відобразіть основні етапи оцінки міцностної надійності ободної частини диска та результати розрахунків. Поясніть відмінність між величиною теоретичного и ефективного коефіцієнта концентрації напружень.

### Завдання для самостійної роботи 7.1

Виконайте розрахунок напружено-деформованого стану ободної частини диска за умовою її закріплення по внутрішній поверхні ободної частини и навантаження тиском, прикладеного до бічної поверхні міжпазового виступу. Шляхом підбору величини тиску забезпечте запас міцності величини межі міцності матеріалу в діапазоні 1,6...1,8. Проаналізуйте вплив змін умов закріплення та прикладення навантажень на величину напружень в точках концентрації напружень.

### Завдання для самостійної роботи 7.2

Виконайте аналіз міцностної надійності зразка для випробувань на втомленість (рис. 7.3), виготовленого із диска КВТ. Ім'я файлу “Zrazok.sat” або “Zrazok.db”.

Зразок закріплюється по нижній та верхній площині хвостовика и навантажуються вигином консольної частини на 2 мм.

Визначте величину теоретичної и ефективноі концентрації напружень аналогічно тому, як це було описано в практичній роботі.



Рисунок 7.3 – Зразок для випробувань на втомленість.

### Контрольні запитання

1. Технологія відображення моделі деталей у вигляді каркаса, площин і об'ємів.
2. Закріплення і статичне навантаження зразка.

3. Теоретичний и ефективний коефіцієнти концентрації напружень. Особливості їх розрахунку чисельним методом.
4. Розрахунок напружено-деформованого стану деталей ГТД.
5. Графічне відображення компонент напруженого стану, деформацій та переміщень.



2. Відтворіть координати точок контуру і впевніться, що координата X відповідає вказаним на кресленні радіусам.
3. Оберіть тип плоского кінцевого елемента другого порядку (Solid 8node 82)
4. Визначіть 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.
5. Визначіть властивості матеріалу диска (сплав жароміцний на основі нікелю ЭК79-ИД): модуль пружності  $2 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона 0,3; щільність  $8,3 \text{ г/см}^3$ .  
 Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models  
 Виберіть по черзі Structural, Linear, Elastic, Isotropic.  
 Введіть 2.0E11 в полі EX. Введіть 0.3 в полі PRXY. Потім [OK].  
 Виберіть Density (щільність).  
 Введіть 8.3E3 в полі DENS. Потім [OK].
6. Виконайте розбиття за допомогою вільної сітки кінцевих елементів. Використовуйте діалогове вікно MeshTool. Загальна кількість елементів в моделі не повинна перевищувати 800 шт.
7. Виконайте "згущення" сітки KE 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 3.
8. Обмежте переміщення диску за віссю шляхом задання нульового переміщення за віссю OY, яка є границею для центрального отвору диску:  
 Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Lines
9. Оберіть швидкість обертання диску:  
 Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Inertia → Angular Velocity... → Global  
 У панелі, яка призначено для вибору окружної швидкості, задати швидкості обертання навколо вісей X,Y,Z. Враховуючи, що віссю обертання є вісь Y, необхідно задати:  
 - X-comp – 0; Y-comp – 500; Z-comp – 0 [OK]

Де  $\dot{\gamma}$ -comp – швидкість обертання навколо  $\dot{\gamma}$ , рад/сек.

10. Виконайте розрахунок напруженого стану диску:  
Main Menu → Solution → Solve → Current LS
11. Проаналізуйте розташування головних компонентів напруженого стану та напружень за Мізесом на перетині диску (рис. 8.2). Визначити еквівалентне напруження у конструктивних концентраторах диску та розмір коефіцієнту концентрації.

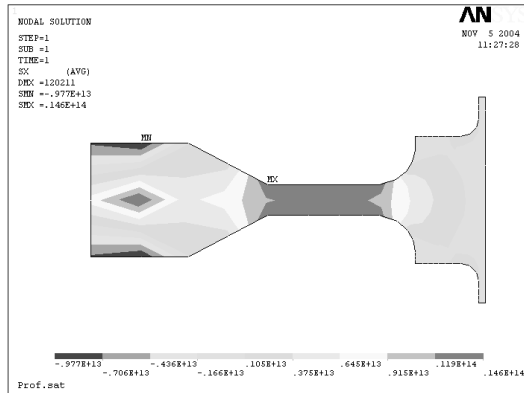


Рисунок 8.2 – Розташування напружень у профілі диску.

12. Визначити 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 ЭК79-ИД, яка дорівнює 950 МПа.
13. Ще раз розрахуйте диск на міцність за умовою, що його навантажено силами інерції від своєї маси (при номінальній частоті обертання ротора ГТД) та розподіленою силою тиску газового потоку, прикладеною до верхньої частини бокової поверхні диску (100 МПа).
14. Визначте максимальний і номінальний розмір газового потоку.
15. Оформіть звіт практичного заняття, у якому має бути: креслення диску, послідовність розрахунку напружено-деформованого стану та загальні результати розрахунку.

### Контрольні запитання

1. Порядок закріплення та навантаження вісесіметричних тіл обертання, типу дисків.

2. Поняття запасу міцності та концентрації напружень. Послідовність їх визначення в ANSYS 8.0.
3. Особливості напруженого стану дисків ГТД. Характерні точки.
4. Засоби забезпечення достатньої точності розрахунку напружено-деформованого стану деталей ГТД у місцях концентрації напружень.

### Завдання для самостійної роботи 8.1

Виконати аналіз надійності диску компресора ГТД на міцність згідно варіанту завдання, який приведено на рисунках 8.3 і 8.4 і таблицях 8.1 та 8.2.

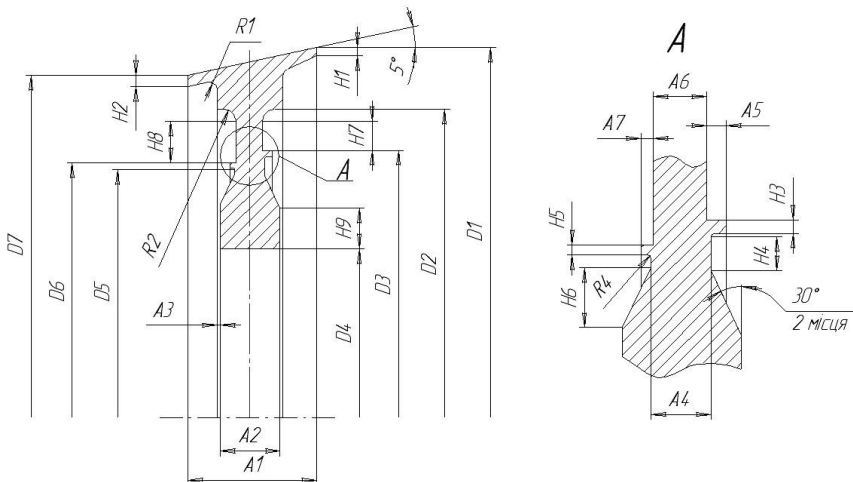


Рисунок 8.3 – Диск компресору ГТД (варіанти 1-5)

Таблиця 8.1 – Розміри диску компресору (до варіантів 1-5)

Розмір	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5
D <sub>1</sub>	431.32	517.58	647	345	388.1
D <sub>2</sub>	392.26	470.71	588.4	313.8	353
D <sub>3</sub>	339	407	509	271	305
D <sub>4</sub>	256	307	384	204	230
D <sub>5</sub>	332.26	386.7	483.4	257.8	290
D <sub>6</sub>	332	398	498	266	299
D <sub>7</sub>	422.1	506.5	633.1	337.7	379.9

Продовження табл. 8.1

Розмір	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5
A <sub>1</sub>	51.2	61.4	76.8	41	46.1
A <sub>2</sub>	27	32	40	21	24
A <sub>3</sub>	1.5	1.8	2.25	1.2	1.3
A <sub>4</sub>	9	10	13	7	8
A <sub>5</sub>	4	5	6	4	3.6
A <sub>6</sub>	8	9.5	12	9	7
A <sub>7</sub>	4	5	6	4	3.6
H <sub>1</sub>	1.5	1.8	2.25	1.2	1.3
H <sub>2</sub>	1.5	1.8	2.25	1.2	1.3
H <sub>3</sub>	1.75	2.1	2.6	41.4	1.58
H <sub>4</sub>	4.7	5.6	7	3.8	4.2
H <sub>5</sub>	1.75	2.1	2.6	1.4	1.58
H <sub>6</sub>	18.5	22.2	27.8	14.8	16.7
H <sub>7</sub>	16	19	24	13	14
H <sub>8</sub>	21	25	31	17	19
R <sub>1</sub>	4	5	6	4	3.6
R <sub>2</sub>	10	12	15	8	9
R <sub>3</sub>	2.5	3	3.7	2	2.25
R <sub>4</sub>	2.5	3	3.7	2	2.25

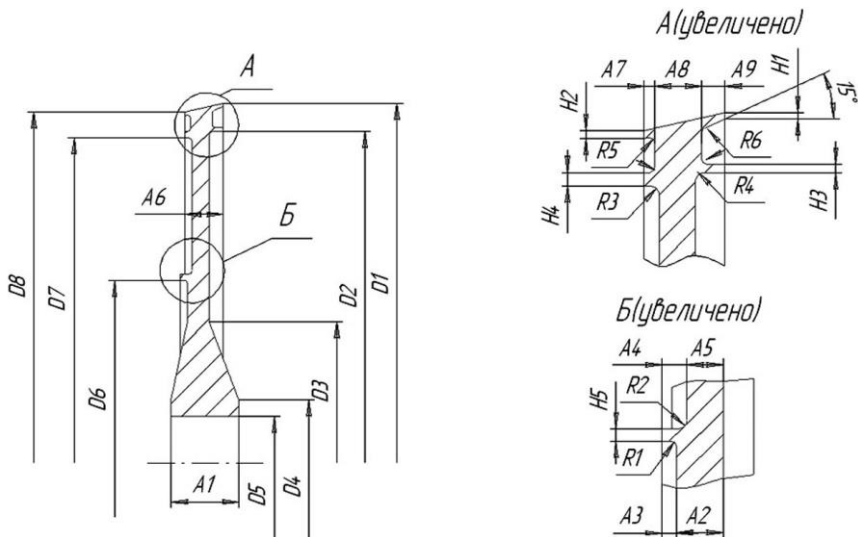


Рисунок 8.4 – Диск компресору ГТД (варіанти 6-10)

Таблиця 8.2 – Розміри диску компресору (до варіантів 6-10)

Розмір	Вар. 6	Вар. 7	Вар. 8	Вар. 9	Вар. 10
D <sub>1</sub>	461,93	369,5	554,3	693	231
D <sub>2</sub>	440	352	528	660	220
D <sub>3</sub>	226	180	271	339	113
D <sub>4</sub>	149	119	179	224	74,5
D <sub>5</sub>	130	111	167	209	70
D <sub>6</sub>	278	222	334	417	139
D <sub>7</sub>	436	349	523	654	218
D <sub>8</sub>	460,4	368	553	691	230
A <sub>1</sub>	30	24	36	45	15
A <sub>2</sub>	7,1	5,7	8,5	10,7	3,6
A <sub>3</sub>	2,1	1,7	2,5	3,1	1
A <sub>4</sub>	3,5	2,8	4,2	5,3	1,75
A <sub>5</sub>	6,2	5	7,4	9,3	3,1
A <sub>6</sub>	12,2	9,8	14,6	18,3	6,1
A <sub>7</sub>	3	2,4	3,6	4,5	5,1
A <sub>8</sub>	6	4,8	7	9	3
A <sub>9</sub>	4,8	3,8	5,8	7,2	2,4
H <sub>1</sub>	0,8	0,64	0,96	1,2	0,4
H <sub>2</sub>	0,8	0,64	0,96	1,2	0,4
H <sub>3</sub>	1,5	1,2	1,8	2,25	0,75
H <sub>4</sub>	3,5	2,8	4,2	5,25	1,75
H <sub>5</sub>	1,8	1,44	2,6	2,7	0,9
R <sub>1</sub>	0,8	0,64	0,96	1,2	0,4
R <sub>2</sub>	2,5	2	3	3,75	1,25
R <sub>3</sub>	0,8	0,64	0,96	1,2	0,4
R <sub>4</sub>	0,8	0,64	0,96	1,2	0,4
R <sub>5</sub>	1,6	1,28	1,92	2,4	0,8
R <sub>6</sub>	1	0,8	1,2	1,5	0,5
R <sub>7</sub>	1,6	1,28	1,92	2,4	0,8

## 9. РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД

**Мета роботи:** Закріпити теоретичні знання і послідовність розрахунків деталей ГТД.

**Постановка задачі:** Виконати міцностний і модальний аналіз моделі лопатки компресора ГТД, навантаженої силами інерції власної маси і тиском газового потоку.

### Необхідне обладнання та матеріали:

1. ПК (персональний комп'ютер з операційною системою Windows XP).
2. Програма ANSYS 8.0.
3. Методичні вказівки до лабораторної роботи.
4. Комплект індивідуальних завдань.

### Порядок виконання роботи

1. Завантажте модель лопатки компресора: файл "loparka.db" (рисунок 9.1).
2. Перемістіть модель лопатки таким чином, щоб вона знаходилася на відстані 300 мм (0,3 м) від осі Y, яка є віссю обертання. Для цього визначте координати точки, що знаходиться в площині підшви лопатки і розрахуйте величину і напрямок необхідного зсуву. При необхідності поверніть модель таким чином, щоб подовжня вісь лопатки була перпендикулярна осі Y.

Для переміщення моделі лопатки використовуйте команди:

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

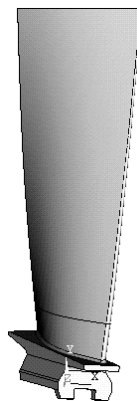


Рисунок 9.1 – Лопатка компресора дв. ТВ3-117

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

4. 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

5. Визначте властивості матеріалу лопатки (титановий сплав ВТ3, модуль пружності  $1,1 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3).

6. Виберіть тип кінцевих елементів Solid 95.

7. Створіть сітку кінцевих елементів в об'ємі пера і хвостовика моделі лопатки. В об'ємі пера лопатки створіть регулярну сітку кінцевих елементів розміром 3,6 мм, аналогічно тому, як виконувалося розбиття на кінцеві елементи моделі в практичній роботі №4. В об'ємі хвостовика створіть вільну сітку кінцевих елементів. Розмір елементів вибирайте в межах 1,2 мм

8. Задайте кутову швидкість обертання лопатки:

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

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

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

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

10. Виконайте розрахунок напруженого стану пера лопатки:

Main Menu → Solution → Solve → Current LS

11. Проаналізуйте розподіл головних компонент напруженого стану і еквівалентних напруг по четвертій теорії міцності.

12. Закріпіть лопатку по бічних поверхнях хвостовика і прикладіть до поверхні корита тиск повітряного потоку (100 МПа).

13. Виконайте розрахунок лопатки на міцність при комплексному навантаженні. Визначте еквівалентне напруження у конструктивних концентраторах напружень лопатки і значення теоретичного коефіцієнта концентрації.

14. Задаючись різними значеннями кутової швидкості обертання ротора ГТД, визначте критичну частоту обертання ротора, при якій запас міцності лопатки знаходиться в діапазоні 1,4...1,6.

15. Виконайте модальний аналіз лопатки компресора. Визначте частоти власних коливань лопатки і вузлові перетини.

16. Оформіть звіт практичної роботи.

### Контрольні питання

1. Послідовність завдання кутової швидкості обертання деталей типу лопаток і дисків ГТД.
2. Закономірності розподілу компонент напруженого стану при навантаженні відцентровими силами і 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.
5. Модальний аналіз лопаток. Призначення і особливості його реалізації в системі ANSYS. Технологія визначення власних частот коливань і вузлових перетинів.

### Перелік джерел

1. Mary Kathryn Thompson, John M. Thompson. ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis / Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2017. – 447 p.
2. Xiaolin Chen, Yijun Liu. Finite element modeling and simulation with ansys workbench. Second edition / CRS Press. Teylor & Francis Group, 2019. – 458 p.
3. Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. Second edition / Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2015. – 657 p.
4. Y. Nakasone, S. Yoshimoto, T. A. Stolarski. Engineering Analysis with ANSYS Software / Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. – 456 p.
5. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Електронний ресурс. Режим доступу: [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_thry/ans\\_thry.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_thry/ans_thry.html).
6. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide ANSYS. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.pdfdrive.com/ansys-mechanical-apdl-structural-analysis-guidepdf-e12262220.html>.
7. ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide ANSYS. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.pdfdrive.com/ansys-mechanical-apdl-advanced-analysis-guidepdf-e16678560.html>.